

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Využití dusíku z hnojiv jarním ječmenem a ozimou pšenicí
doktorská disertační práce

Autor: **Ing. Šárka Buráňová**

Školitel: **prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.**

Konzultant: **Ing. Jindřich Černý, Ph.D.**

Praha 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Využití dusíku z hnojiv jarním ječmenem a ozimou pšenicí“ vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v přiložené bibliografii.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Dovolte mi touto cestou poděkovat kolektivu katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin za podporu, bez které bych tuto práci nedokázala realizovat. Zvláštní poděkování patří mému školiteli prof. Ing. Jiřímu Balíkovi, CSc., dr. h. c. a konzultantovi Ing. Jindřichu Černému, Ph.D. Velký dík patří i mému manželovi, za nekonečnou trpělivost a podporu po celou dobu mého doktorského studia.

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	7
2.1 Koloběh dusíku	7
2.1.1 Bilance N v agroekosystému.....	8
2.1.2 Haber-Boschova syntéza N	10
2.1.3 Atmosférické depozice N	10
2.1.4 Fixace N.....	11
2.2 Přeměny dusíku v půdě	12
2.2.1 Mineralizace	14
2.2.2 Nitrifikace.....	15
2.2.3 Denitrifikace.....	16
2.2.4 Volatilizace.....	16
2.3 Příjem dusíku rostlinou a jeho asimilace	17
2.3.1 Využití N v rostlině.....	19
2.3.2 Nedostatek a nadbytek N	21
2.4 Využití dusíku z hnojiv	22
2.4.1 Využitelnost dusíku při hnojení obilnin	26
2.5 Kvalita pšenice	28
2.6 Dlouhodobé pokusy.....	30
3. HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE	32
4. METODIKA POKUSU.....	33
4.1 Charakteristika pokusů	33
4.2 Dávky živin a hnojiv	34
4.3 Sklizeň a odběr vzorků	37
4.4 Analýzy rostlinného materiálu a hodnocení kvalitativních parametrů	37
4.5 Výpočty	38
5. VÝSLEDKY	40
5.1 Shejbalová et al., 2014, Plant, Soil and Environment	41

5.2 Buráňová et al., 2015, International Journal of Plant Production	48
5.3 Černý et al., 2015, Úroda	64
5.4 Buráňová et al., 2016, Scientia Agriculturae Bohemica	72
6. SUMÁRNÍ DISKUZE.....	80
6.1 Pšenice ozimá	80
6.1.1 Výnos zrna	80
6.1.2 Obsah dusíku v zrně	82
6.1.3 Ukazatele využití N z hnojiv	83
6.1.4 Kvalitativní parametry	84
6.2 Jarní ječmen	86
6.2.1 Výnos zrna	86
6.2.2 Obsah dusíku v zrně	87
6.2.3 Ukazatele využití N z hnojiv	87
7. ZÁVĚR.....	89
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
9. SEZNAM PŘÍLOH.....	111
9.1 Přílohy.....	112

1. ÚVOD

Dusík je celosvětově nejvíce aplikovanou živinou v hnojivech, avšak pouze 30 – 50 % z tohoto dusíku je bezprostředně přijato plodinami. Efektivita využití dusíku je ovlivněna především stanovištními podmínkami, průběhem počasí a přeměnami dusíku v půdě. Na půdách s vysokou úrodností využívají rostliny většinu dusíku z půdy a menší podíl z hnojiv, zatímco na půdách méně úrodných tvoří většinu přijatého dusíku plodinou aplikovaný dusík v hnojivech.

Jedním z nástrojů, sloužícím k vyhodnocení využití dusíku z hnojiv, je stanovení bilance dusíku. Znalost bilance dusíku na pozemku umožňuje předcházet snížení půdní úrodnosti, ke které dochází, pokud výstupy dusíku převyšují vstupy, nebo naopak zamezit ohrožení životního prostředí a ekonomickým ztrátám v podobě nadměrných vstupů dusíku. Cílem každého pěstitel by tedy měla být snaha o dosažení vyrovnané bilance dusíku na pozemku, který obhospodařuje. Dlouhodobé sledování efektivity využití dusíku nám umožňuje posoudit potřeby hnojení dusíkem na konkrétním stanovišti a osevním sledu. Zároveň je však nezbytné sledovat krátkodobé faktory, které mohou mít významný vliv na efektivitu využití dusíku v daném roce, především aktuální teplotní podmínky (a to jak vzduchu, tak i půdy) a rozložení srážek. Zvláště pak v druhé polovině vegetace totiž může vlivem počasí docházet ke snižování zásoby potenciálně mineralizovatelného dusíku v půdě, a tím následně ke snížení výnosů a kvalitativních parametrů zrna.

Cílem disertační práce je porovnání, zda má na stanovištích s odlišnými půdními a klimatickými podmínkami stejný systém organického a minerálního hnojení různý vliv na výnosotvorné prvky a následný výnos a kvalitativní parametry jarního ječmene a ozimé pšenice, a to jak z dlouhodobého, tak krátkodobého hlediska.

2. LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 Koloběh dusíku

Největší část atmosféry je tvořena dusíkem, který je nezbytný pro růst rostlin a zvířat a hraje důležitou roli v ekologii prostředí. Nejdůležitějším aspektem cyklu dusíku v životním prostředí je dynamická výměna forem, která probíhá mezi atmosférou, povrchem země a oceány.

Globální cyklus N popisuje hlavní zdroje a formy N, a procesy, při kterých je N transformován v terestrických ekosystémech (St. Luce et al., 2011). Na rozdíl od jiných makroprvků se dusík podílí na mnoha negativních vlivech, jako je eutrofizace vod, změna klimatu, okyselení půd, poškozování lidského zdraví, ztráta biodiverzity apod. (Erisman, 2011).

Cyklus živin v agroekosystému se liší od toho v neobhospodařovaném ekosystému tím, že je více otevřený. Ztráty (výstupy) a zisky (vstupy) jsou větší a toky, jimiž živiny vstupují do systému, nebo ho opouštějí, jsou mnohem rozmanitější a rozsáhlejší (Tivy, 1987).

Přibližně 78 % atmosféry tvoří dusík (N_2), který je pro většinu organismů nedostupný díky pevnosti trojné vazby, která drží dva atomy dusíku pohromadě. Pohyb N mezi atmosférou a povrchem země se děje toky pěti plynů: NH_3 , N_2O , NO, NO_2 a N_2 (Nátr, 1998). Na rozdíl od nereaktivního plynu N_2 , který nemá vliv na kvalitu prostředí (Follett, 2001), jsou jako reaktivní dusík (Nr) označovány všechny anorganické redukované formy N, anorganické oxidované formy (např. NO_x , HNO_3 , N_2O , NO_3^-), NH_3 a NH_4^+ (značené jako NH_x) a organické sloučeniny (např. močovina, aminy, proteiny). Ve srovnání s předindustriální érou se vlivem lidské činnosti množství reaktivního N, které vstupuje do biosféry, přibližně zdvojnásobilo (Smil, 1999b; Bobbink et al., 2010).

Zatímco hlavním zdrojem NO_x v atmosféře je spalování fosilních paliv a biomasy, NH_3 se do atmosféry dostává především emisemi z hnojiv (Bobbink et al., 2010; Olsthoorn et Fong, 1998). N_2O je účinný skleníkový plyn v troposféře, jenž přispívá i k poškozování ozonové vrstvy ve stratosféře (Hall et Matson, 1999). Dle Grübler (2002) je na rozdíl od NO_x a NH_3 pro N_2O typická delší doba působení v atmosféře, a to až 120 let.

Zvýšená koncentrace Nr v atmosféře, která se prostřednictvím depozic dostává do suchozemských a vodních ekosystémů, má negativní dopad na lidské zdraví, může způsobit chemické změny v půdě a vodě, ovlivnit emise skleníkových plynů a snížit biologickou rozmanitost (Liu et al., 2013). Z půdy se do atmosféry NO_x (převážně NO) a N_2O uvolňuje pomocí

bakteriální nitrifikace (oxidace NH_4^+) a denitrifikace (redukce NO_3^- nebo NO_2^-) (Smil, 1999b). Rychlost denitrifikace a její vztah k míře vytváření N_r a vlastnostem ekosystémů, které řídí cyklus N_r a jeho ukládání, patří k doposud neobjasněným částem v cyklu N v ekosystémech (Galloway et al., 2004).

Globálně se potýkáme se dvěma hlavními problémy s dusíkem: některé regiony světa nemají dostatek reaktivního dusíku k udržení lidského života, což vede k hladu a podvýživě, zatímco jiné regiony mají příliš mnoho dusíku (hlavně kvůli spalování fosilních paliv a neúčinnému začlenění dusíku do potravinářských výrobků), což vede k mnohým závažným zdravotním a ekologickým dopadům (Erisman et al., 2007).

Polovina minerálních dusíkatých hnojiv, která kdy byla použita na planetě, byla aplikována v posledních desetiletích (Erisman et al., 2007). Změny v koloběhu N však mají mnohostranné důsledky:

1. globálně se zvyšuje koncentrace skleníkových plynů - oxidů dusíku,
2. zvyšují se toky dusíkatých sloučenin (přes dvě třetiny emisí N_2O a NH_3 jsou produkovány lidskou činností),
3. přispívají ke kyselým dešťům a fotochemickému smogu (Nátr, 1998).

Dusík má na okolní prostředí jak kladný, tak záporný vliv. Kladem je především podpora růstu rostlin v zemědělství pro výrobu potravin, krmiv a paliv, zatímco negativní je dopad na životní prostředí (Erisman, 2011). Významně se podílí na výnosu i kvalitě produkce a většinou rozhoduje o ekonomice hnojařských i ostatních agrotechnických zásahů (Balík, 1993).

Významným aspektem koloběhu N je fixace dusíku, neboť doplňuje celkový obsah N v biosféře a kompenzuje ztráty, které vznikly v důsledku denitrifikace (Dixon et Kahn, 2004; Morris et Blackwood, 2007). Přibližně 10 % fixovaného dusíku se do půdy dostává povětrnostními vlivy (elektrické bouře) a fotochemickými reakcemi mezi ozónem a oxidem dusnatým, rostliny a bakterie fixují zbylou část N (Scott, 2008).

Cyklus N je složitý a obtížně sledovatelný. Pomoci nám mohou stabilní izotopy, neboť poskytují nové kvantitativní informace o vztazích mezi cykly N , P a C v agroekosystémech (Dungait et al., 2012; Brearley, 2013).

2.1.1 Bilance N v agroekosystému

Pro praktické účely se využívají údaje biologické a hospodářské bilance živin. Biologická bilance zahrnuje téměř všechny položky příjmu živin účastníků se koloběhu, tzn. i živiny

obsažené v kořenových soustavách a ve strništi. Hospodářská bilance počítá s využitím živin v hlavním i vedlejším produktu a s jejich kompenzací pomocí minerálních a organických hnojiv (Vostal et Matousch, 1988).

Východiskem pro pochopení cyklu N v agroekosystému je podrobná hmotnostní bilance dusíku (Baker et al., 2001; Krug et Winstanley, 2002; Liu et al., 2008), neboť poskytuje informace o tocích N a jeho koloběhu (Öborn et al., 2003).

Bilance N je definována jako rozdíl mezi vstupy (v minerálních a organických hnojivech, biologicky fixovaném N a atmosférické depozici) a výstupy (především odběrem živin ve sklizených plodinách) do a z půdy (Slak et al., 1998; Grignani et al., 2007).

Přebytek nebo deficit je měřítkem čistého ochuzení (výstupy > vstupy) nebo obohacování (výstupy < vstupy) systému, případně se může jednat o ztráty N (Dobermann, 2005).

Bilance musí být pozitivní pro kompenzaci nevyhnutelných ztrát do okolního prostředí, ale měla by být udržována na co nejnižší možné úrovni, aby nedocházelo ke ztrátám emisemi (Watson et Atkinson, 1999; Ju et al., 2006; Wang et al., 2008) nebo nadměrnému hromadění živin v půdě (Vos et Putten, 2000; Spiess, 2011). Podle Spiess (2011) biologické fixace a atmosférické depozice N nejvíce přispívají k nepřesnostem při výpočtu bilance živin.

Vstupy minerálních a statkových hnojiv a výstupy sklizenými plodinami jsou obvykle hlavní faktory ovlivňující bilanci dusíku zemědělských oblastí (Bechmann et al., 1998; Wang et al., 2008) a mívají větší vliv než počasí (Chloupek et al., 2004). Proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost racionálnějšímu použití organických hnojiv a zohlednit i aplikaci hnojiv minerálních (Bučiene et al., 2003). Pokud odběr jednotlivých živin převyšuje jejich vstupy do půdy, tak během několika let dochází k poklesu výnosů plodin i úrodnosti půdy (Nátr, 1998).

Pro hodnocení bilancí N jsou využívány dvě základní metody. První počítá s celkovým množstvím N, a dokumentuje příslušné vstupy a výstupy N, včetně sklizně plodin. Druhá používá vstupů značeného izotopu ^{15}N , ze kterého se počítají bilance značeného N (Stevenson et Cole, 1999).

Odhadovaná bilance dusíku v České republice dle Chloupeka et al. (2004) byla negativní mezi lety 1947 - 1960, pozitivní během let 1970 - 1990, a znovu mírně negativní v letech 1995 - 2000. Nadbytek aplikovaného minerálního dusíku dosažený v letech s kladnou bilancí se pohyboval v rozmezí 18,5 až 36,8 kg N/ha.

2.1.2 Haber-Boschova syntéza N

Ze všech technologických vynálezů 20. století měl Haber-Boschův proces syntézy amoniaku největší dopad na naši schopnost přežití (Smil, 1999a). Haberovy experimenty započaly v roce 1903 a pokračovaly snahou Carla Bosche zkomercializovat je, počínaje rokem 1909 ve firmě BASF (Smil, 2004b). Haber-Boschova syntéza amoniaku pomocí hydrogenace N_2 probíhá za vysokých teplot ($> 500\text{ }^\circ\text{C}$) a tlaku (20-100 MPa) přes železo-rutheniový povrch, což vyžaduje značné množství energie. Průmyslová fixace N je proto drahý proces (Gordon et al., 2001; Chirik, 2009).

Bez dostupnosti dusíkatých hnojiv vyrobených z průmyslového procesu by nebyl možný nárůst produkce potravin v průběhu minulého století. (Gruber et Galloway, 2008). Rostoucí aplikace dusíkatých sloučenin v zemědělství měla značné demografické, ekonomické a ekologické důsledky (Smil, 2004b) a umožnila zdvojnásobení počtu obyvatel země (Schrock, 2011). Průmyslově vyrobený amoniak tvořil již v roce 1931 polovinu anorganického dusíku používaného k hnojení, v roce 1950 to bylo téměř 80 %. Ke konci 90. let 20. století poskytovala Haber-Boschova syntéza již více než 99 % z celkové spotřeby anorganického dusíku, zbylé množství pokrývá především chilský ledek a amoniak vzniklý jako vedlejší produkt v koksovacích pecích (Smil, 2004a).

Více než 10^8 tun amoniaku za rok vzniká v prostředí redukcí molekulárního dusíku ze vzduchu enzymem nitrogenázou. Zhruba stejné množství je vytvořeno průmyslovou syntézou amoniaku (Schrock, 2011).

Okolo 7 % syntetizovaného amoniaku je ztraceno při produkci, transportu a skladování a téměř 10 % je využíváno pro jiné produkty, než jsou hnojiva (Smil, 2004a).

2.1.3 Atmosférické depozice N

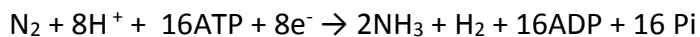
Depozice dusíku představují mokré i suché spady anorganických i organických forem N, avšak ve většině případů je měřena pouze depozice anorganického dusíku (NH_4^+ a NO_3^-) (Liu et al., 2013). Mokrá depozice je hlavní způsob pronikání dusíku do systému pomocí srážek, při suché depozici dochází ke spadu pevných a plynných látek (Rosén, 1990). Zavlažovaná pole získávají i dodatečný N, převážně z dusičnanů rozpustných ve vodě (Smil, 1999b).

Emise N z prostředí a atmosférické suché depozice jsou neoddělitelně spojeny (Baker et al., 2001). Velké množství NO_x a amoniaku vstupujícího do atmosféry je recyklováno na zemském povrchu prostřednictvím atmosférické depozice (Reay et al., 2008). Množství depozic N se

pohybuje kolem 20 kg/ha/rok. Je však třeba si uvědomit, že většina tohoto N nemůže být využita rostlinami, protože dopadá na půdu i mimo vegetaci, kdy ho porost není schopen využít (Richter et Hlušek, 2006; Liu et al., 2013).

2.1.4 Fixace N

Fixace N₂ je proces, při kterém je plynný N₂ redukován na dvě molekuly amoniaku. Reakce spotřebovává energii buněk a je ji možno znázornit následovně:



Tato reakce je katalyzována enzymem nitrogenázou.

O fixaci dusíku je známo, že je kódována širokou škálou genů, které jsou zodpovědné nejen za proces fixace dusíku enzymem nitrogenázou, ale i za příslušné funkce zapojené do tvorby nodů, kořenovou invazi apod. (Crossman et Thomson, 2006). Nitrogenáza je enzym, který k poutání dusíku využívají jak volně žijící, tak symbiotické bakterie (Smil, 2004b). Nitrogenáza je zodpovědná za většinu biologických fixací dusíku (Mendel, 2011; Hernandez et al., 2009). Je to složitý a pravděpodobně velmi starý metaloenzym, u kterého během evoluce došlo ke konzervaci struktury a mechanických vlastností. Tento enzym obsahuje dvě složky, které jsou pojmenovány podle obsaženého kovu (Dixon et Kahn, 2004).

Existují tři rozdílné enzymy nitrogenázy obsahující: 1. molybden a železo, 2. vanad a železo, nebo 3. samotné železo. Všechny tři jsou citlivé na chlad a přítomnost kyslíku (Gordon et al., 2001; Hoffman et al., 2009; Tarselli, 2012).

Většina rostlin nemůže využívat plynný dusík z atmosféry k růstu. Vyžadují nejdříve jeho přeměnu, například v amonný iont (Law, 2013; Sutton et Bleeker, 2013). Pouze některé mikroorganismy jsou schopny transformovat plynný N₂ na amoniak nebo vytvořit organicky vázaný N biologicky dostupný mineralizací (Dixon et Kahn, 2004; Ollivier et al., 2011). Organismy, které fixují N₂ jsou běžně rozdělovány do tří skupin:

1. nesymbiotické (volně žijící), jež poutají molekulární N odděleně od hostitelské rostliny
2. asociativní, které tvoří relativně náhodné a špatně strukturované vztahy s kořeny nebo s nadzemními částmi rostlin
3. symbiotické, které fixují N₂ ve spojení s vyššími rostlinami (Stevenson et Cole, 1999).

Symbiotická fixace N je možná u většiny bobovitých a půdních bakterií patřících do rodů: *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium*, *Allorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* a *Photrhizobium* (Gordon et al., 2001). Kromě této fixace produkují *Rhizobia* molekuly (auxiny,

cytokininy, kyselinu abscisovou, riboflaviny, lipochitooligosacharidy a vitamíny), které podporují růst rostlin (Rifat et al., 2010). *Rhizobia* při symbióze získávají od rostlin energii a uhlík ve formě dikarboxylových kyselin (Lodwig et al., 2003). Fixace probíhá v kořenových uzlinách (nodech), které vznikají, když *Rhizobia* infikují hostitele skrze kořenové vlášení a způsobí změny v morfologii kořenů (Powell et Klironomos, 2007).

Actinorhizní symbióza probíhá především mezi dřevinami a aktinomycetami. S rodem *Frankia* je symbióza méně častá než mezi rodem *Rhizobium* a bobovitými, avšak je důležitá pro rostlinné druhy, které se obvykle potýkají se stresory, jako jsou např. lokality chudé na N v oblastech mírného pásma (Powell et Klironomos, 2007).

He et al. (2009) odhadují, že se fixace N₂ může pohybovat od desítek až po několik stovek kg/ha/rok. Množství poutaného N závisí na půdních podmínkách (pH, dostatek organických látek, biologická činnost) a také na obsahu minerálního N v půdě, přičemž vyšší množství N v půdě výrazně snižuje fixaci N mikroorganismy, neboť rostliny využívají snadněji dostupný minerální N v půdě (Vaněk et al., 2012).

Bobovité plodiny přijímají více kationtů než aniontů, protože do jejich kořenů vstupuje molekula vzdušného dusíku N₂, tedy částice bez elektrického náboje (Balík et al., 2008). Ozimé bobovité plodiny mohou fixovat až sto kilogramů dusíku na hektar, jenž může být dostupný již první následné plodině v rotaci (Kramberger et al., 2009). Výhodou biologicky fixovaného dusíku je jeho menší náchylnost k vyplavování a volatilizaci (Dixon et Kahn, 2004).

2.2 Přeměny dusíku v půdě

V půdě je dusík přítomen ve čtyřech hlavních formách: (a) v organické hmotě, např. rostlinný materiál, houby a humus; (b) v půdních organismech a mikroorganismech; (c) jako amonný iont (N-NH₄⁺) v jílových minerálech a (d) jako minerální N v půdním roztoku, včetně amonného N, nitrátového N (N-NO₃⁻) a dusitanového iontu (NO₂⁻) (Cameron et al., 2013).

Jednotlivé formy N jsou v půdě zastoupeny následovně: N v půdní organické hmotě > reziduální N > N-NO₃⁻ > N-NH₄⁺ > plynné formy N (Shaffer et Ma, 2001; Krug et Winstanley, 2002). Celkový obsah N v půdě se běžně pohybuje v rozmezí 0,1 - 0,2 %, což v ornici představuje 3000 - 6000 kg N/ha. Převážnou část N v půdě (přes 95 %) představuje N organických sloučenin. Tvoří je rostlinné a živočišné zbytky, biomasa mikrobů, jejich metabolity, humusové látky vznikající při přeměně organických látek (Vaněk et al., 2012) a aplikovaná organická hnojiva, jako jsou čistírenský kal, hnůj aj. (Camberato, 2001). Jako tzv. reziduální dusík označujeme anorganický

dusík (amonný a nitrátový), který zůstává v půdě na konci vegetačního období (Drury et al., 2007).

Minerální a organické hnojení, zejména dusíkem, nejenže zvyšuje úrodnost půdy, ale také ovlivňuje její chemické, fyzikální a biologické vlastnosti. Tyto změny mohou být dobře pozorovatelné v dlouhodobých polních pokusech (Mikanová et al., 2009).

Většina dusíku, potřebného pro rostoucí organismy, je dodávána přeměnou, při které se z organických látek uvolňuje dusík ve formách, které jsou přijatelné pro rostliny a mikroorganismy (Schoor, 2011). Půdní forma N a jeho dostupnost rostlinám je však přechodná, a množství se mohou rychle měnit v závislosti na klimatických podmínkách (Miller et Chapman, 2011).

Anorganické a organické rozpustné sloučeniny N v půdě mohou být asimilovány následujícími způsoby: začleněním do mikrobiální biomasy (imobilizací), remineralizací, přeměnou oxidačními nebo redukčními procesy, a přenosem v rámci mikrobiálního potravinového řetězce (Cassman et al., 1998).

Mikrobiální přeměny dusíku v půdě jsou rozhodující pro výživu rostlin (Ondrášek et Čunderlík, 2008). V půdním ekosystému jsou mikroorganismy (bakterie, streptomycey, houby) přímými příjemci biogenních prvků (zejména uhlíku, dusíku a síry) a současně tvoří jejich zásoby a nestabilní zdroje (Janowiak et Smoliński, 2003).

Přímé ztráty N pocházejí z jeho aplikace na půdu, která převyšuje požadavky rostlin a živočichů nebo z depozic a odtoku z pozemků, zatímco nepřímé ztráty jsou výsledkem rostoucího počtu chovaných zvířat a odpadů pocházejících ze sklizených plodin (Schipper et al., 2010).

Pro udržitelné zemědělství je nezbytné uchovat úrodnost půdy a současně zamezit negativním dopadům na okolní ekosystémy (Wang et al., 2008). Ztráty dusíku do prostředí nastávají v případě, že je množství rozpustného dusíku v půdním roztoku vyšší, než jsou rostliny schopny přijmout nebo pokud v daném období nebo na daném místě nejsou přítomny rostliny, které by dusík z půdního profilu přijaly (Chien et al., 2009).

Pouze malá část dusíku se akumuluje v půdě: nitrátový N se nesorbuje na půdní sorpční komplex a rychle se proplavuje, amonný N je látka, která se sorbuje na půdní sorpční komplex, ale rychle se přeměňuje na nitrát. Ztráty nitrátového dusíku nastávají při denitrifikaci a vyplavování do podzemních a povrchových vod (Boogaard et Kroes, 1998; Raun et Johnson, 1999; Cassman et al., 2002).

Ke ztrátám N dochází při nadměrném používání dusíkatých hnojiv nebo aplikaci N v nevhodnou dobu (např. pozdní podzim), při orbě pastvin brzy na podzim, nebo u dlouhodobých

úhorů (Di et Cameron, 2002; Ju et al., 2006; Yang et al., 2006). Odběr dusíku sklizní tvoří přibližně 25 % (Peterson et al., 2012).

K činitelům ovlivňujícím vyplavování dusíku patří: povětrnostní podmínky (suma srážek a jejich rozdělení, teplota), pedologické podmínky (zrnitostní složení půd a jejich propustnost, obsah humusu, sorpční schopnost, meliorační zásahy), vliv rostlin (druh pěstovaných rostlin, nároky na vodu, délka vegetační doby) a vliv hnojiv (druh a dávka použitého hnojiva, jeho forma, způsob aplikace) (Vostal et al., 1989).

Výzkumy ukazují, že ztráty N vyplavováním odpovídají tomuto pořadí: lesy < sečené pastviny < louky a pastviny, orná půda < zorané pastviny < zahradní plodiny (Cameron et al., 2013).

Sledování sezónních změn obsahu minerálního dusíku je důležité pro hodnocení zásoby N v půdě, jeho synchronizaci s potřebou rostlin v určité fázi vegetace a určením termínu a potřebné dávky minerálních N hnojiv (Balík et Olf, 1998; Černý et al., 2007) a současně pro minimalizování rizik souvisejících se znečištěním podzemních vod (Crohn, 2004). Rizika spojená s kontaminací pitné vody nitráty představují především methemoglobinémie neboli „modráni“ kojenců, potenciální rizika karcinogenity a teratogenity (Chabani et al., 2006).

2.2.1 Mineralizace

Minerální dusík v půdě představuje pouze malý podíl (0 až 5 %) z celkového půdního dusíku (Steege et al., 2001). Obsah minerálního dusíku v půdě je velmi nestabilní a ovlivňují ho půdní a klimatické podmínky, vegetační pokryv, způsob využití půdy, aplikace hnojiv, existence průmyslu, resp. celá antropogenní činnost ovlivňující intenzitu uvolňování a vázání anorganického dusíku z a do organických sloučenin (Olsthoorn et Fong, 1998; Florián et al. 2003; Šilha et Vaněk, 2003; Ňaršanská et al., 2009; Kunzová, 2010).

Maximální mineralizace N nastane, když teplota půdy dosáhne 30 až 35 °C. Se snižující se teplotou intenzita mineralizace klesá a ustává kolem bodu mrazu. V suchých půdách je mineralizace N nízká, neboť aktivita půdních mikroorganismů je omezena dostupností vody (Deenik, 2006).

V důsledku příznivějších podmínek pro mineralizaci N ve vrchní části půdy (vyšší obsah organické hmoty) je obsah minerálního dusíku obecně vyšší v této vrstvě půdy ve srovnání s vrstvou spodní (Gastal et Lemaire, 2002). Fyzikální a chemické půdní vlastnosti jsou prostorově variabilní a ovlivňují dynamiku N a mechanismy jeho ztrát (Khosla et al., 2002).

Mineralizace organických látek probíhá pomocí rozkladu dusíkatých organických látek, humusových látek a bílkovin proteolytickými enzymy vylučovanými různými skupinami mikroorganismů na polypeptidy (Richter et Hlušek, 2006). Mineralizace vzniká převážně prostřednictvím biologických aktivit, které jsou závislé na teplotě a vlhkosti (St. Luce et al., 2011).

2.2.2 Nitrifikace

Procesy v půdě, při nichž vznikají nové nitráty, se nazývají nitrifikace. Nitrifikace probíhá v půdách s pH mezi 5,5 a 10, přičemž optimální pH se pohybuje kolem 7 (Camberato, 2001; Hipkin et al., 2004). Na počátku 20. století převládal názor, že nitrifikace neprobíhá v kyselých půdách, avšak v průběhu druhé poloviny 20. století se začalo všeobecně přijímat, že k nitrifikaci může docházet i v široké škále kyselých půd (Boer et Kowalchuk, 2000). Nízké pH, nízká teplota (přeměna na nitrátový N je inhibována při 3 - 5 °C), akumulace alelopatických sloučenin na bázi fenolů a nedostatečný přívod kyslíku inhibují mnoho nitrifikačních mikroorganismů (Addiscott et Brookes, 2002; Britto et Kronzucker, 2002).

Nitrátový dusík se vytváří mikrobiální konverzí jiných půdních forem N a tento proces probíhá přes meziproducty, jako je amonný dusík a dusitan, které se obvykle v půdě nacházejí pouze v nízkých koncentracích (Miller et al., 2007).

Půdní dusík je přeměňován pomocí heterotrofních mikroorganismů, které jsou závislé na dostupném organickém C. Chemoautotrofní nitrifikanti *Nitrosomonas* a *Nitrobacter* však tvoří výjimku, využívají totiž anorganický C a získávají energii oxidací anorganických sloučenin N (Hodge et al., 2000; Fontaine et al., 2003).

Ztráty nitrátového dusíku z půdy představují ekonomickou neefektivnost zemědělské výroby (Subbarao et al., 2006; Loecke et al., 2012), kterou je možné omezit pomocí inhibitorů nitrifikace.

Účinné inhibitory nitrifikace mají schopnost prodloužit období nitrifikace z týdne na měsíc či dokonce několik měsíců. Inhibitory nitrifikace by měly být účinné v půdách, které mohou poutat/adsorbovat amonný dusík a v půdách, na kterých přidání inhibitorů nitrifikace může skutečně výrazně snížit aktivitu nitrifikačních organismů. Proto se předpokládá, že je pouze malý vliv inhibitorů nitrifikace na lehkých půdách s velmi nízkou schopností výměny kationtů, které mají v mnoha případech malou mikrobiální aktivitu (Shaviv, 2005).

Pro účinné působení inhibitoru nitrifikace je třeba, aby po aplikaci hnojiva na povrch půdy došlo co nejdříve k transportu dusíku spolu s inhibitorem do půdního profilu, například

v důsledku srážek, nebo aby bylo hnojivo s inhibitorem nitrifikace zapraveno do půdy při předsetové přípravě. Jestliže hnojivo s inhibitorem nitrifikace zůstane delší dobu na povrchu půdy, může inhibitor zvyšovat ztráty dusíku únikem amoniaku (Růžek et Pišánová, 2007).

2.2.3 Denitrifikace

Při denitrifikaci dochází k přeměně nitrátového dusíku na N_2 , N_2O a NO_x . Proces je nejčastěji způsobován fakultativně anaerobními bakteriemi, které oxidují organický uhlík a redukují oxidy dusíku v prostředí s absencí kyslíku (Bouwman, 1998; Shaffer et Ma, 2001). Míra denitrifikace stoupá se snižujícím se množstvím kyslíku v půdě (Follett, 2001).

Denitrifikace může být mikrobiální či chemická, avšak mikrobiální ve většině půd převažuje. Mezi půdní faktory, které nejsilněji ovlivňují denitrifikaci, patří kyslík (který je primárně regulován obsahem vody v půdě), koncentrace nitrátů, pH, teplota a organický uhlík (Vostal et al., 1989; Mosier et al., 2002; Munch et Velthof, 2007).

Podle podmínek se při mikrobiální denitrifikaci uvolní určitý podíl oxidů N, nejvíce N_2O , dále NO a nejméně NO_2 , ale většinou přes 80 % ztrát tvoří N_2 (Vaněk et al., 2012).

Méně významná je chemická denitrifikace, tedy redukce nitrátů v kyselém prostředí za přítomnosti amidů a bez účasti mikroorganismů, neboť nitrity se mohou v půdě vyskytovat pouze ojedinele a krátkodobě (Vaněk et al., 1997).

2.2.4 Volatilizace

Volatilizace amoniaku je zásadní problém, který může negativně ovlivnit životní prostředí (Ndegwa et al., 2008). Poměrně velké množství NH_3 může být ztraceno v rádech dnů či týdnů po aplikaci: hnojiv s amonnou formou N, močoviny, zvířecích a lidských výkalů (Liu et al., 2008). Emise amoniaku se zvyšují se vzrůstající teplotou, rychlostí větru, přítomností posklizňových zbytků a klesají s rostoucí vlhkostí půdy a kationtovou výměnou kapacitou (Olf et al., 2005; Erisman et al., 2008).

Volatilizace amoniaku je hlavní příčinou ztrát dusíku z močoviny aplikované na povrch půdy. U všech hnojiv s amonnou formou N může docházet ke ztrátám dusíku volatilizací, avšak riziko je nejvyšší u močoviny a kapalin obsahujících močovinu (Ahmed et al., 2010).

Ztráty amoniaku z hnojiv volatilizací mohou nabývat hodnot od 0 do 65 % z aplikovaného dusíku, v závislosti na půdě a podmínkách prostředí (sucho, karbonátové půdy) (Nátr, 1998; Cameron et al., 2013).

S alkalizací půdy rostou i ztráty NH_3 . Je to způsobeno tím, že při vyšším pH je i větší nasycení sorpčního půdního komplexu kationty, čímž se snižuje možnost sorpce amoniaku. Kromě toho se při vyšším pH zvyšuje aktivita NH_4^+ a OH^- a proto stoupá i množství vytvořeného NH_3 (Vostal et al., 1989).

2.3 Příjem dusíku rostlinou a jeho asimilace

Příjem dusíku rostlinami je klíčový faktor jejich růstu (Gallais et Hirel, 2004). Již v 19. století zkoumal tuto problematiku Justus von Liebig, který se domníval, že atmosférický dusík je zdrojem N pro rostliny. Naopak Gilbert a Lawes z Rothamstedu (Anglie) podpořili myšlenku, že rostliny přijímají dusík z půdy a hnojiv (Merbach et Deubel, 2008).

Růst rostlin závisí na dostatečném přísunu N, avšak téměř všechen N nacházející se v přírodě je v inertní formě (plynný dusík N_2), který není pro rostliny přímo využitelný (Erisman et al., 2007). Rostliny potřebují k růstu reaktivní fixovanou formu dusíku, která je navázaná na uhlík, vodík nebo kyslík, nejčastěji ve formě organických sloučenin (např. aminokyseliny, NH_4^+ nebo NO_3^-) (Fields, 2004).

Dostupnost N ovlivňuje několik vývojových procesů rostlin v závislosti na druhu, např. počet listů a jejich vzhled, počet nodů a odnoží (Firoz et al., 2011).

Podle Gastal et Lemaire (2002) je odběr N plodinou velmi variabilní v rámci jednoho roku, mezi jednotlivými lety, stanovišti a plodinami, a to i v případě, že je množství N z půdní zásoby a z hnojiv dostatečné. Příjem dusíku a metabolismus jsou řízeny faktory životního prostředí a spojeny s metabolismem C a dostupností dalších živin (Schmidt et al., 2004).

Dusík je rostlinou přijímán převážně v anorganické formě, ačkoli i půdní organický dusík (močovina, aminokyseliny) může být přijat rostlinou a představovat významný podíl celkového příjmu N za specifických podmínek, jako jsou např. kyselé půdy a nízká teplota (Gastal et Lemaire, 2002).

Výživa NH_4^+ hraje důležitou roli v podmáčených a kyselých půdách, nebo v chladném podnebí, kde je inhibována nitrifikace (Wirén et al., 2001). I relativně nízký obsah NH_4^+ může v některých případech omezovat odběr NO_3^- (Garnett et al., 2009; Gärdenäs et al., 2011). Navzdory obvykle nízké koncentraci v půdě může probíhat příjem NH_4^+ kořeny rostlin velmi rychle, neboť v kořenové plazmatické membráně jsou přítomny transportní systémy s obzvláště vysokou afinitou (Wirén et al., 2001). Některé kulturní plodiny jsou citlivé k toxicitě NH_4^+ , patří

mezi ně např. brambory, ječmen, hrách, fazole, hořčice a cukrová řepa (Britto et Kronzucker, 2002).

Rostlina přijímá NO_3^- převážně aktivně symportem s H^+ tak, že na jeden iont NO_3^- jsou zapotřebí dva ionty H^+ . Rostlina má pro příjem iontu NO_3^- jednak tzv. vysoce afinitní transportní systémy, které slouží k příjmu při nižších koncentracích, a transportní systém s nízkou afinitou, sloužící k příjmu při vyšší koncentraci NO_3^- (nad 0,5 mmol/L). Oba transportní systémy umožňují v určitých mezích upravit příjem NO_3^- podle podmínek prostředí a potřeby rostliny (jsou indukovány přítomností NO_3^- v prostředí, a naopak inhibovány NH_4^+ a některými aminokyselinami a také vyšším obsahem glutaminu v cytosolu) (Vaněk et al., 2012). Jakmile NO_3^- pronikne do kořenových epidermálních a kortikálních buněk, může být buď redukován na NO_2^- a poté na NH_4^+ , uložen ve vakuolách, přesunut do xylému pro transport na dlouhou vzdálenost do prýtů nebo navrácen zpět přes plazmatickou membránu do apoplastu nebo půdního roztoku (Touraine et al., 2001; Schrock, 2008; Garnett et al., 2009).

Redukce NO_3^- probíhá v cytosolu, kde se pomocí nitrátreduktázy vytváří dusitany (Firoz et al., 2011). Dusitany vstupují do chloroplastu (v případě kořenů do plastidů) a jsou redukovány na amonný iont pomocí nitritreduktázy (Tischner, 2000; Glass, 2003; Scott, 2008). Tento proces vyžaduje přesun šesti elektronů z redukováného ferredoxinu na nitrit (Meyer et Stitt, 2001) a je ovlivněn dalšími živinami, zejména obsahem Mg a S, které se přímo účastní této přeměny, obsahem P, který ovlivňuje energetické pochody a K působící na transport látek. Významnou úlohu při využití nitrátového dusíku mají některé mikroprvky (Mn, Fe, Cu a Mo), které se také podílejí přímo na enzymatické redukci jako kofaktory (Černý et al., 2016a).

Amonné ionty mohou být přijaty i přímo kořeny z půdy. Jsou fyto toxické již při relativně nízkých koncentracích (Hay et Porter, 2006) a musejí tedy být rychle využity při syntéze glutaminu pomocí reakce glutamin syntetázy v kořenech. Glutamin je následně přeměněn na glutamát, který je klíčovou aminokyselinou pro syntézu řady aminokyselin pomocí reakce glutamát syntázy (Crawford, 1995; Morot-Gaudry et Lea, 2001; Goyal et al., 2005; Tabuchi et al., 2007). Tyto dva amidy - glutamin a glutamát jsou přímé či nepřímé zdroje dusíku pro syntézu všech ostatních rostlinných metabolitů obsahujících tento makroelement (Pavlíková et al., 2007). Mohou být přeměněny na širokou škálu aminokyselin, nukleových kyselin, ureidů a polyamidů (Lea et Azevedo, 2007). Aminokyseliny jsou syntetizovány buď v kořenech, listech, semenech nebo plodech, v závislosti na místě redukce nitrátu a remobilizaci dusíku (Morot-Gaudry et al., 2001).

Amoniak může být také vytvářen uvnitř rostliny různými metabolickými cestami, jako je fotorespirace, fenylypropanový metabolismus, utilizace transportních sloučenin dusíku a katabolismus aminokyselin nebo ze symbioticky fixovaného dusíku (Morot-Gaudry et Lea, 2001).

Dusík se v rostlině může nacházet i jako oxid dusnatý (NO), což je důležitá signální molekula s různými fyziologickými funkcemi (Popova et Tuan, 2010). NO se podílí na mnoha rostlinných fyziologických procesech, např. na stimulaci tvorby zrna a klíčení pylu, na diferenciaci buněk a dřevnatění pletiv, regulaci kvetení, stárnutí a zrání, uzavírání průduchů, vývoji kořenů, prýtlů apod. (Planchet et Kaiser, 2006; Procházková et al., 2014).

Příjem dusíku nadzemními částmi rostlin je komplikovanější než kořeny. Hlavní bariérou pro vstup jednotlivých forem N do pletiv listů je kutikula, která pokrývá vnější povrch pokožky a vyvíjí se po celou dobu životnosti listů. K průniku aplikovaných živin kutikulou slouží velké množství pórů ($10^{10}/\text{cm}^2$) s velikostí okolo 1 nm. Póry dobře prostupují malé molekuly látek, jako je např. močovina (průměr 0,44 nm). Mnohem menší význam pro příjem živin mají průduchy, protože i jejich vnitřní buněčné stěny jsou pokryty kutikulou (Trčková et al., 2006; Pavlíková et al., 2007).

Příjem jednotlivých iontů N a jejich využití v rostlině ovlivňuje i příjem ostatních iontů. Při jednostranné výživě NO_3^- je v rostlině zvýšená tvorba organických aniontů (následek redukce nitrátů na NH_3), a tím je zvýšen příjem kationtů, hlavně K^+ , Ca^{2+} a Mg^{2+} . Při převažujícím příjmu NH_4^+ je celkově snížen příjem iontů, hlavně kationtů (Vaněk et al., 2007). Rhizosférní bakterie mohou zlepšit příjem živin rostlinami a/nebo mohou produkovat látky, jež podporují růst rostlin (Rifat et al., 2010).

2.3.1 Využití N v rostlině

Dusík je pro rostliny nepostradatelná makroživina, jenž je nejvíce limitující pro rostliny, u kterých je vyžadována tvorba velkého množství biomasy. V sušině rostlin je obsaženo 1-3 % N (Firoz et al., 2011).

K hlavním rolím N ve výživě rostlin patří: (1) součást chlorofylu, DNA a RNA, (2) nezbytnost pro utilizaci sacharidů, (3) složka enzymů a jiných proteinů, vitamínů a hormonů, (4) stimulace vývoje a aktivity kořenů, a (5) podpora příjmu ostatních živin (Stevenson et Cole, 1999; Morot-Gaudry, 2001; Rifat et al., 2010; Schrock, 2011; Schuur, 2011).

U většiny plodin můžeme s ohledem na požadavky dusíku rozlišit dvě fáze:

1. vegetativní růstová fáze, kdy mladé vyvíjející se kořeny a listy plní funkci zásobních orgánů, které účinně asimilují anorganický dusík (zvláště ve formě nitrátové a v menší míře ve formě amonné) pro syntézu aminokyselin a proteinů (Hirel et al., 2007),

2. remobilizační fáze, kdy listy a prýty fungují jako zdroj aminokyselin pro tvorbu reprodukčních a zásobních orgánů (Hirel et Lea, 2011; Kant et al., 2011).

Recyklace a remobilizace dusíku ze starších listů má zásadní význam pro tvorbu zásobních orgánů jako jsou semena, hlízy a cibule (Maslaux et al., 2001).

Obsah N se liší mezi různými orgány rostlin a mění se i během vegetace (za normálních podmínek se snižuje s nárůstem sušiny) (Olfs et al., 2005). Nejvyšší koncentrace NO_3^- se nacházejí v listových řapících, žilkách a žebrech, v košťálech, stoncích, špičkách kořenů a vnějších listech, naopak nejnižší v plodech, v listových čepelích a ve vnitřních listech hlávek (Prugar et al., 2008).

Uložení dusíku v rostlině může být krátkodobé či dlouhodobé. Pokud je příjem dusíku vyšší než jeho potřeba pro růst, může být krátkodobě uložen ve formě nitrátů, aminokyselin a vegetativně uložených bílkovin s malou molekulární hmotností v nadzemních částech rostlin (stonky a listy). Aminokyseliny jsou také přechodně akumulovány ve vakuolách listových buněk, převážně jako glutamin a asparagin. K dlouhodobému ukládání nastává, pokud je příjem dusíku nižší než jeho potřeba pro růst, a dochází k němu v listech, semenech, hlízách, kořenech a kůře stromů (Delrot et al., 2001).

Glass (2003) uvádí faktory, jež omezují akumulaci N v rostlinách, jsou jimi odtok N skrze plazmatickou membránu, nižší transport nitrátového a amonného dusíku s vysokou afinitou ve vyšších rostlinách, inhibice odběru nitrátového N pomocí amonného N a nižší příjem N v noci a v podmínkách s nižší intenzitou záření. Zvláště důležitá je činnost nitrátoreduktázy v místech silného hromadění nitrátů. Je-li omezena, může docházet k omezení transportu nitrátů do míst jejich předpokládané redukce a jejich aktivního přerozdělování do pletiv sousedících s vodivými cévními svazky (Prugar et al., 2008).

Akumulace dusíku rostlinou a jeho transport do semen jsou kritickým procesem při tvorbě výnosu (Lecoeur et Sinclair, 2001). Vyšší dávky N zvyšují u obilnin počet odnoží a zrn v klasu, avšak dochází ke snížení hmotnosti zrn (Fageria et al., 2006).

Dusík může být získán buď akumulací N během plnění zrna nebo přesunem z vegetativních částí (Lecoeur et Sinclair, 2001). Pro dosažení vysokého obsahu bílkovin v zrna a dobré kvality by měla být většina přijatého N přemístěna do zrna ještě před plnou zralostí (Le Gouis et al., 2000).

U pšenice závisí obsah N v zrně na třech parametrech:

1. dostupnosti nitrátů v půdě před květem,
2. průběžném příjmu nitrátů během plnění zrna a
3. remobilizaci dusíku z listů (Maslaux et al., 2001).

2.3.2 Nedostatek a nadbytek N

Při nedostatku dusíku se výrazně snižuje intenzita dělení buněk a tvorba chlorofylu, která se projeví zpomalením růstu a zmenšením rozměrů jednotlivých orgánů. Deficit N se v polních podmínkách projevuje až po přechodu rostlin z výživy ze semene na výživu prostřednictvím kořenů. U rostlin bez dostatečného zásobování N dochází k zakrnělému růstu a postupnému žloutnutí nejstarších listů (Kováčik, 2007). Pouze málo půd disponuje dostatečnou zásobou N k udržení uspokojivé produkce plodin bez použití hnojiv. Nedostatek N je častější, než nedostatek jakékoli jiné živiny v půdě (St. Luce et al., 2011).

Dusík je v rostlině velmi pohyblivý. Mladší listy a vyvíjející se orgány s velkými nároky na N, jako jsou plody a semena, ho mohou čerpat ze starších nebo zastíněných listů (Gardner et al., 2003). Nízký příjem N obecně vede k menšímu růstu kořenů, potlačení tvorby postranních kořenů, zvýšení poměru C/N v rostlině, snížení fotosyntézy, a předčasnému stárnutí listů (Kant et al., 2011).

Nadbytek dusíku je méně častý a projevuje se většinou latentně. Působení nadbytku N je rozdílné podle druhů rostlin a jejich růstové fáze. Nadbytek N v povrchových horizontech půdy, zvláště na podzim a v předjaří, působí zvýšené větvení kořenů v zónách vyšší koncentrace N a omezení růstu hlavního a vedlejších kořenů (Pavlíková et al., 2007). Růst kořenů vůči růstu nadzemní biomasy je při nadbytku N snížen (Garnett et al., 2009).

Hospodaření s živinami může ovlivnit spotřebu vody plodinou. Příliš mnoho dusíku, ať už z hnojiv nebo z nadměrné mineralizace půdní organické hmoty, může mít za následek, že jsou plodiny ve vegetativní fázi příliš silné a před květem spotřebují příliš mnoho vody. Mohou vytvořit velké množství semen, ale nejsou schopny produkovat dostatečné množství sacharidů, aby je dostatečně vyplnily, což vede k předčasnému stárnutí plodin, a nízkému výnosu zrna (Basso et al., 2010).

2.4 Využití dusíku z hnojiv

Dusík je jednou z nejdůležitějších živin pro tvorbu výnosu plodin a zároveň nejvíce aplikovanou živinou v hnojivech (Keeney et Hatfield, 2001; Gallais et Hirel, 2004). K pokrytí značné potřeby dusíku aplikují zemědělci po celém světě každý rok na zemědělskou půdu okolo 90 milionů tun dusíkatých hnojiv (Firoz et al., 2011).

Avšak i přes téměř 200 let, které uplynuly od doby, kdy byly zjištěny přínosy dávek minerálních hnojiv, je pouze zřídka využíván plný genetický potenciál rostlin pro maximální výnos. Vlivem negativních faktorů jako jsou nedostatečná vlhkost nebo mobilita živin potřebných pro růst rostlin, nemusí některé plodiny dostatečně reagovat na doplnění živin (Kennedy et al., 2004).

Ze všech živin potřebných k růstu rostlin je N nejmobilnější a dochází u něj k největším ztrátám v systému půda-rostlina (Stevenson et Cole, 1999). Aplikovaný N prochází řadou složitých přeměn, a to zejména biologických, které vedou ke čtyřem hlavním alternativám: (1) příjem rostlinou a následný odběr sklizní; (2) proplavení NO_3^- , organicky rozpustného N a částic N do podzemní a povrchové vody; (3) atmosférické ztráty ve formě N_2O , NO_x , NH_3 nebo N_2 ; a (4) uložení do systému ve formě anorganického N, v půdní organické hmotě z rostlinných zbytků a mikrobiální biomasy, nebo v trvalých travních porostech (Robertson et al., 2013).

Vyšší výnos plodin, pokles ploch úhorů, a menší zastoupení plodin z čeledi bobovitých v osevním postupu zvýšily potřebu používání dusíkatých hnojiv pro dosažení optimálního výnosu. Z tohoto důvodu je nezbytné volit vhodnou metodu a strategii hnojení, aby využití dusíku bylo co nejefektivnější (Rasmussen et al., 1998; Balík et al., 2003; Balasubramanian et al., 2004; Anbessa et Juskiw, 2012; Bingham et al., 2012).

Zvyšující se používání dusíkatých hnojiv za účelem produkce plodin vyžaduje přesnější odhady obsahu dusíku v půdě, aby se zabránilo nedostatečnému hnojení nebo naopak přehnojení a nepříznivému účinku na výživu rostlin a kvalitu životního prostředí. Laboratorní testy a modely mineralizace N jsou nezbytné pro lepší odhad potřeby hnojiv (Rasmussen et al., 1998).

Efektivita využití N je definována jako výnos zrna na jednotku přístupné živiny (z půdy a/nebo z hnojiv) a může být rozdělena na dvě části: 1. efektivita odběru N, což je schopnost rostlin přijmout N z půdy a 2. efektivita využití N, což je schopnost rostlin transportovat N do zrna, kde je dále přítomen převážně jako bílkovina (Goyal et al., 2005; Lea et Azevedo, 2006; Foulknes et Murchie, 2011).

Efektivita využití dusíku je ovlivněna příjmem N z půdy, asimilací N v rostlině a distribucí N z vegetativních částí do zrna (Tivy, 1987; Andersson et Holm, 2011). Využití dusíku z hnojiv je určováno i půdní texturou, klimatickými podmínkami, interakcí mezi půdou a mikrobiálními procesy, původem organických nebo anorganických zdrojů N a ztrátami N z půdy (Bøckman et Ols, 1998; Hirel et al., 2007).

Při určování dávky dusíkatého hnojiva je nutné zohlednit potřebu dané plodiny i pro omezení rizika ztrát dusíku vyplavením (Dobermann et al., 2003; Garcia et Salvagiotti, 2009; Gómez-Muñoz et al., 2012). Ztrátám dusíku se dá předcházet např. vhodně zvolenou dávkou hnojiva, která respektuje potřebu daných plodin, umístěním hnojiva do prostoru, kterého jsou rostliny schopny dosáhnout a správným načasováním aplikace (Lehmann et al., 2003; Chien et al., 2009; Garnett et al., 2009).

Účinné využití dusíku z hnojiv má zásadní význam pro udržitelnou produkci potravin (Sylvester-Bradley et Kindred, 2009). V praxi je možné pro zjištění efektivity využití dusíku počítat s různými agronomickými ukazateli. V polních studiích jsou tyto indexy buď vypočteny na základě rozdílů ve výnosu plodin a celkového odběru N nadzemní biomasou mezi hnojenými variantami a nehnojenou kontrolou („metoda rozdílů“), nebo je užito ^{15}N značené hnojivo, díky kterému je možné sledovat účinnost remobilizace z aplikovaného N (Dobermann, 2005). Metoda rozdílů poskytuje vyšší hodnoty účinnosti hnojiv, než je tomu u metody izotopové. Oba způsoby mají svá omezení a jejich vhodnost závisí na systému hospodaření s N a podmínkách okolního prostředí (Nannen et al., 2011).

U izotopové metody se aplikují hnojiva obohacená o izotop ^{15}N , což nám umožňuje zjistit využití dusíku z hnojiv rostlinou pomocí poměru méně zastoupeného izotopu ^{15}N a hojně se vyskytujícího izotopu ^{14}N (Stevenson et Cole, 1999; Zehr et Montoya, 2007).

Využívání metody ^{15}N je nákladnější a interpretace výsledků může být zkreslena např. nejednotným značením hnojiv. Metoda rozdílů je levnější a jednodušší a může být přímo aplikována u materiálů, které nejsou homogenní a byl by tedy problém s jejich značením (např. hnůj) (Breland et Hansen, 1998).

Díky používání hnojiv se značeným izotopem ^{15}N byly zjištěny důležité vlastnosti:

1. Podíl N z hnojiv v plodinách (nadzemní biomasa a kořeny) při sklizni, obvykle nazývaný účinnost využití dusíku, se nejčastěji pohybuje v rozmezí 55 - 75 %.
2. Reziduální N při sklizni, tedy minerální dusík z hnojiva v půdě při sklizni, je obvykle velmi malý.

3. Navrácení ^{15}N v systému půda-rostlina je pouze částečné, což indikuje významné ztráty z půdy (Stevenson et Cole, 1999).
4. Čím větší je odběr N plodinou, tím vyšší je efektivita využití N z hnojiv, například aplikace hnojiv u pšenice v generativní fázi je lépe využívána než první aplikace ve fázi odnožování (Steege et al., 2001; Firoz et al., 2011).

Efektivitu využití N může dosahovat vysokých hodnot při použití nízkých aplikačních dávek a naopak nízkých hodnot při vysokých aplikačních dávkách N (Dobermann et Cassman, 2005).

Často se využívá i výpočtu efektivitu využití N jako podílu výnosu sušiny a odběru N plodinou (Moll et al., 1982).

Jedním z ukazatelů efektivitu využití N je tzv. agronomická efektivita aplikovaného N, jež je definována jako rozdíl výnosu na hnojené variantě a výnosu na nehnojené variantě ve vztahu k dávce dusíku na hnojené variantě.

Účinnost remobilizace N se dá vyjádřit jako rozdíl mezi odběrem N na hnojené a nehnojené variantě ve vztahu k aplikované dávce N (Balík et al., 2012). Účinnost remobilizace N z hnojiv plodinami je ovlivněna třemi hlavními faktory: 1. spotřebou N plodinami, 2. zásobou N v půdě a 3. ztrátami N. Některé procesy mohou být řízené (např. dodávání živin, regulace chorob), jiné však řízeny být nemohou (teplota, srážky, nebo struktura půdy) (Balasubramanian et al., 2004). Zvýšení remobilizace N má potenciálně za následek menší smyv a vyplavení N a snižuje ztráty plynného N do životního prostředí (Dobermann et Cassman, 2002).

Pouze 30 - 50 % N z aplikovaného minerálního hnojiva je bezprostředně přijato plodinami (Tilman et al., 2002; Delin et al., 2005; Dobermann, 2005; Fageria et al., 2005; Firoz et al., 2011), proto je zvýšení účinnosti využití dusíku důležité pro snížení vstupních nákladů, neboť hnojení N je jednou z nejvýznamnějších částí nákladů v rostlinné produkci (Delogu et al., 1998; Fageria et al., 2005; Dobermann, 2007; Snyder, 2009; Basso et al., 2010; Maselaux-Daubresse et al., 2010; Shi et al., 2012). Godinot et al. (2016) se zabývali využíváním dusíku v zemědělství jednotlivých členských států EU v letech 2000 až 2008. Z jejich sledování vyplývá, že minerální hnojiva byla hlavním vstupem ve 24 ze 27 členských zemích, s průměrnou dávkou 60 kg N/ha.

Největší spotřeba minerálních hnojiv na hektar zemědělské půdy je již dlouhodobě evidována v Nizozemí a Německu. Česká republika se v roce 2013 vyskytovala na třetím místě ve spotřebě dusíku na hektar zemědělské půdy (97 kg N/ha) v rámci EU, v roce 2014 s 113 kg N/ha již dokonce na místě druhém (Kulhánek et al., 2015).

Zlepšení využití N z hnojiv je možné dosáhnout pomocí speciálně upravených hnojiv: obalované močoviny s pozvolným rozpouštěním, pomalu se uvolňující produkty s močovino-aldehydovými polymery, supergranule močoviny pro hluboké zapravení, inhibitory nitrifikace k redukci vyplavování nitrátů a denitrifikace, inhibitory ureasy k redukci volatilizace amoniaku z močoviny (Chien et al., 2009).

I při pečlivém hospodaření se stájovými hnojivy dochází k určitým ztrátám živin (nejvíce dusíku), a připočteme-li k nim živiny v prodaných výrobcích, je zřejmé, že koloběh živin je ochuzován a u většiny z nich je výsledná bilance negativní (Černý et al., 2010).

V hnoji je dusík obsažen ze 70 % ve formě organické a ze 30 % ve formě minerální, z čehož 29 % tvoří forma amoniakální a pouhé 1 % forma nitrátová. Výhodou minerální formy dusíku je její přímá dostupnost rostlinám, avšak hrozí zde riziko ztrát a následné ohrožení životního prostředí (Černý et al., 2013). Pro omezení těchto ztrát je nezbytné včasné zaorání hnoje po jeho aplikaci, neboť v závislosti na podmínkách, může být z povrchově aplikovaného hnoje více než 85 % z celkového NH_4^+ ztraceno během 24 hodin (Maguire et al., 2011).

Množství živin v kejdě se liší dle obsahu sušiny, která je ovlivněna podílem technologické vody. Nejvíce dusíku obsahuje kejda drůbeží - průměrně 9,6 kg N v tuně hnojiva, kejda prasat pak 5 kg N v tuně a kejda skotu 3,2 kg. Dusík se v kejdě vyskytuje především ve formě amoniakální (40 - 60 %) a v této podobě je pro rostliny snadno přístupný. Další 10 % tvoří nitrátová forma a zbylou část forma organická (Černý et al., 2013). I u kejdy, a to zejména pokud se aplikuje na podzim, se projevují vyšší ztráty N vyplavením. Nižší účinnost využití N z kejdy je způsobena jejím složením a často nepříznivými podmínkami při aplikaci (Sieling et Kage, 2006).

Poměrně rychle působí v půdě kejda a močůvka, zvyšují mineralizaci, podporují činnost půdních mikroorganismů, ale obsah organických látek v půdě výrazně nezvyšují. Dodáním živin v lehce přijatelných formách ale ovlivňují tvorbu výnosu polních plodin. Zdrojem dobře přijatelných živin jsou také některá organická hnojiva, jako například zbytky po fermentaci z bioplynových stanic označovaných jako digestát, nebo kaly z čistíren odpadních vod. Zatímco u digestátu není působení plně vědecky ověřené a předpokládá se především jeho vliv z pohledu dodaných vodorozpustných forem živin. Jelikož aktivní organická hmota byla spotřebována při výrobě bioplynu, nelze předpokládat přímý vliv na dodání organické hmoty do půdy a ovlivnění činnosti půdních mikroorganismů. V případě čistírenských kalů jsou dostupné výsledky dlouhodobých pokusů, které popisují příznivý vliv jejich aplikace na výnos plodin, ale také na půdní vlastnosti (vyšší vododržnost půd, vyšší retenční kapacitu, zvýšení agregace půd, zvýšení aerace, vyšší

propustnost a infiltrace, snížení tvorby půdního škraloupu, vyšší sorpční schopnost půd). Aplikace čistírenských kalů výrazně ovlivňuje činnost mikroorganismů, rychlost mineralizace a z dlouhodobého hlediska také obsah organické hmoty v půdě (Černý et al., 2010)

V moči se dusík nachází zejména ve formě močoviny, kyseliny hippurové a kyseliny močové. Při přeměně těchto sloučenin vzniká amoniak, který snadno uniká do prostředí, čímž dochází k vysokým ztrátám dusíku. Pouze 10 % N je v močůvce obsaženo ve stabilní formě – vázáno na organické látky. Omezení ztrát živin a organických látek je možné především vhodným skladováním močůvky a jejím včasným zapravením do půdy po aplikaci (Černý et al., 2013).

Budoucí výzkum využití dusíku by se měl zaměřovat především na: 1. získávání údajů o úrovni a účinnosti využití živin v zemědělských podnicích, včetně vývoje v čase a příčinách variability, 2. využívání modelů a geoprostorových technik k pochopení reakce plodin na prostorovou a časovou variabilitu životního prostředí, 3. zefektivnění hospodaření s N v reálném čase, 4. rozšíření znalostí o požadavcích transgenních plodin se specifickým využitím na živiny, a 5. interdisciplinární terénní výzkum, který se zabývá celým spektrem zemědělských, ekologických a environmentálních funkcí intenzivních systémů obdělávání půdy, které jsou základem pro produkci potravin (Dobermann et Cassman, 2002).

2.4.1 Využitelnost dusíku při hnojení obilnin

Dle Gilland (2015) průměrný světový výnos pšenice vzrostl z 1,2 t/ha v roce 1956 na 3,3 t/ha v roce 2013. V roce 2014 byla průměrná světová dávka dusíku k obilninám 87 kg/ha, přičemž průměrný výnos činil 3,8 t/ha. Pro rok 2050 je odhadována průměrná dávka dusíku k obilninám již na 108 kg/ha při průměrném výnosu 4,3 t/ha.

Z analýz Dobermanna et Cassmana (2005) vyplývá, že očekávaný nárůst celosvětové poptávky obilnin o 38 % v roce 2025 může pokrýt zvýšení používání N o 30 % u obilnin, za předpokladu, že se pokles sklizňové plochy obilnin zastaví a reakce výnosu na aplikovaný N se zvýší o 20 %. Rozdíly průměrné efektivity využití N u obilnin mezi jednotlivými světovými regiony závisí na tom, jaké obilniny jsou zde pěstovány, na jejich dosažitelném výnosovém potenciálu, na kvalitě půdy, množství a formě aplikovaného N a na načasování a kvalitě provedení agrotechnických prací.

Hodnoty NUE se v různých částech světa liší. Průměrné hodnoty NUE u obilnin v letech 1999-2003 byly publikovány Dobermannem a Cassmanem (2005) a nacházely se v rozpětí od těch nejnižších ve východní Asii (32 kg/kg) přes průměrné v severní Americe (45 kg/kg), Oceánii (46

kg/kg) a jižní Americe (55 kg/kg) až po nejvyšší ve východní Evropě, střední Asii (90 kg/kg) a Africe (123 kg/kg).

Pro určování účinnosti N u pšenice slouží - výnos zrna, obsah N v zrnu, celkový příjem N, sklizňový index dusíku - a vztahy mezi těmito proměnnými (Barraclough, 2010).

Pokus s 6 různými dávkami N u pšenice v Itálii ukázal, že výnos se průkazně nelišil u dávek 60 a 90 kg N/ha. Výsledky ukazují, že dávka 120 kg N/ha podporuje vyšší výnos a vyšší zisk, ale dochází k podstatně většímu vyplavování dusíku než u dávek 90 a 60 kg N/ha. Vyšší vyplavování nitrátů po aplikaci dávky 180 kg N/ha znevýhodňuje tuto dávku z hlediska výnosu, zisku i životního prostředí (Basso a kol., 2010).

Hnojení N před setím a na podzim je otázkou širšího posouzení. Nedostatek či naopak nadbytek dusíku již na počátku vegetace ovlivňuje další vývoj rostlin. Porost ozimé pšenice přijme v podzimním a zimním období jen malé množství dusíku. Většinou toto množství není větší, než 20 kg N/ha. Vhodným ukazatelem pro rozhodování o aplikaci dusíku před setím by měly být rozborů půd na obsah minerálního dusíku (N_{min}). Obsah minerálního dusíku v letním období je totiž poměrně proměnlivý a závisí na využití dusíku z hnojiv aplikovaných k předplodině, nakládání s posklizňovými zbytky a výrazně na průběhu počasí, které ovlivňuje mineralizaci organických látek v půdě (Černý et al., 2014b).

V zahraničí (např. v Německu, Anglii) někteří pěstitelé využívají malé plochy v porostu, kterou pohnojí nižší dávkou N, než zbylou část pozemku (tzv. „fertilizer windows“). Pokud se na nedohnojené ploše začne projevovat nedostatek N, bude potřeba provést další přihnojení celého porostu. Nedohnojená plocha tak dříve reaguje na pokles obsahu N_{min} v půdě vlivem odběru N porostem, zhoršením podmínek pro mineralizaci nebo i ztrátou N z půdy třeba vyplavením (Černý et al., 2016b).

Při setí ozimé pšenice a ozimého ječmene je vhodné podpořit podzimní růst rostlin dávkou dusíku 10 - 30 kg N/ha aplikovanou k osivu po horší předplodině, při zapravení slámy, pozdějším termínu setí apod. Výhodou takto aplikovaného dusíku, případně i dalších živin je jejich lepší využití rostlinami než po plošné aplikaci, která mimo jiné více podporuje také růst plevelů (Růžek et al., 2010).

Odběr dusíku se zvyšuje na jaře, kdy rostliny po zimě musí obnovit biomasu. Do začátku sloupkování rostliny přijmou v průměru asi 40 % N a intenzita jeho příjmu roste až do konce kvetení, kdy odebere dalších 30 % této živiny. Po odkvětu se požadavky rostlin na dusík relativně

snižují, poněvadž se N přemísťuje z ostatních částí rostliny do tvořícího se zrna. Na konci vegetace je v zrna nahromaděno až 75 % dusíku (Hřivna, 2012).

Při regeneračním hnojení středně odnožených porostů ozimé pšenice postupujeme podle zásady, že čím dříve začínáme s hnojením, tím více používáme hnojiva s amonnou a amidickou formou dusíku (DASA, močovina, UREAstabil) v dávce 40 – 60 kg N/ha. Naopak při pozdějším a rychlém nástupu jara má nezastupitelnou úlohu nitratový dusík, který nejčastěji dodáváme v ledkových typech hnojiv. Ledky jsou také nejvhodnějším hnojivem pro slabší porosty, u kterých potřebujeme podpořit odnožování. Naopak pro již dostatečně odnožené rostliny se 2 – 3 silnými odnožemi, jestliže nechceme výrazněji podpořit další odnožování a přitom nechceme, aby rostliny hladověly, používáme hnojiva nejlépe s amidickou formou dusíku (Růžek et al., 2009).

Obecně je známo, že nejvíce dusíku přijmou obilniny v období intenzivního růstu. Jelikož jsou dusíkatá hnojiva většinou aplikována na povrch, je nezbytné počítat s určitou dobou pro jeho transport ke kořenům a následně podmínkami pro jeho příjem a využití. Z tohoto důvodu je důležité sledovat nejen průběh počasí a vývoj nadzemní vegetace, ale také stav půdy a kořenů. Zde máme na mysli především teplotu a vlhkost půdy, tedy zda tyto podmínky umožňují pohyb vody (a živin v půdním roztoku) a také růst kořenů. Podle těchto faktorů se pak rozhodujeme o dávce dusíku pro regenerační a produkční přihnojení, případně upravujeme poměr těchto dávek, tak abychom dosáhli celkové potřebné výše aplikovaného dusíku (Černý et al., 2016b).

V prvním roce aplikace se průměrné využití dusíku z hnoje pohybuje kolem 25 % z celkového obsahu a s každým následujícím rokem klesá - 2. rok po aplikaci 15 %, 3. rok 5 % (Černý et al., 2013).

2.5 Kvalita pšenice

Pšenice se vyznačuje vysokým produkčním potenciálem a mírou kvality odpovídající zařazení odrůdy do skupiny, charakterizující možnosti jejího využití. Schopnost odrůdy plně projevit produkční i jakostní potenciál je do značné míry ovlivněna vnějšími vlivy (Prugar et al., 2008).

Požadavek 28 % lepku, tedy vysoká hladina bílkovinných frakcí prolaminů a glutelinů, potřebná pro dobré rheologické vlastnosti těsta a schopnost mouky vázat vodu, je bez racionální výživy dusíkem nemožný (Kolář, 1997).

Kvalitní pšeničná surovina, určená pro zpracování ve mlýnech, je dána odrůdovou skladbou potravinářských pekárenských pšeníc. Odrůdy jsou zařazeny do kategorií pekařské jakosti – třída elitní (E), kvalitní (A), chlebová (B) a pšenice nevhodné (C) (Zimolka et al., 2005).

Technologická jakost zrna pšenice je komplexní veličinou, která souvisí s chemickým složením zrna a především se složením zásobních bílkovin endospermu zrna. Jde především o tzv. lepkové bílkoviny, které tvoří asi 80 % obsahu veškerých bílkovin (Zimolka et al., 2005).

Hmotnost tisíce zrn – funkce tvaru zrna a hustoty zrna. Velké zrno s velkou hustotou má zpravidla větší poměr endospermu k ostatním morfologickým částem zrna. Z toho důvodu je hmotnost tisíce zrn také potencionálním měřítkem výtěžnosti mouky. Uvádí se v jednotce gram (Hubík et Mareček, 2002).

Obsah hrubých bílkovin v zrně – Obsah všech organických dusíkatých látek v zrně (proteinů, peptidů, aminokyselin) převedených mineralizací podle Kjeldahla na anorganickou amonnou formu a následně stanovených destilací. Pro stanovení obsahu hrubých bílkovin v zrně je možné použít i nechemické NIR (reflektance v blízké části infračerveného spektra) a NIT (transmitance v blízké části infračerveného spektra) metody, popřípadě spalovací metody podle Dumase v instrumentální modifikaci. V tomto případě je nutné provést kalibraci na standardní metodu podle Kjeldahla. Obsah hrubých bílkovin v zrně je důležitým technologickým kvalitativním parametrem pro svůj vysoký kladný korelační vztah k objemu pečiva (Hubík et Mareček, 2002).

Obsah dusíkatých látek v sušině významně ovlivňuje zpracovatelské vlastnosti zrna. Pro pekárenství je rozhodující, že obsah dusíkatých látek v zrnu kladně koreluje s obsahem lepkových bílkovin, ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti těsta a objem pečiva (Palík et al., 2009).

Obsah bílkovin do značné míry ovlivňuje kvalitu piva, a proto je nutné, aby byl mezi 10,5 až 11,7 %. Nízká aktivita enzymů v ječmeni s nižším obsahem bílkovin má za následek sníženou kvalitu sladu a piva (Váňová et al., 2006).

Podobně pozitivně jako obsah bílkovin ovlivňuje hnojení dusíkem i obsah mokrého lepku v sušině zrna. S množstvím a jakostí bílkovin je úzce spojena i kvalita mouky, charakterizovaná např. objemem sedimentu při Zelenyho testu (Prugar et al., 2008).

Pozdní kvalitativní přihnojení dusíkem pozitivně působí na obsah bílkovin v zrnu a produkci bílkovin. Přihnojením v období metání se zvyšuje HTZ. Pozdější přihnojení v době kvetení má vliv na obsah lepku. Nedoporučuje se však k odrůdám se slabým lepkem (příliš

tažným, málo pružným), jehož vlastnosti by se takto mohly ještě dále zhoršit až k roztékavosti (Prugar et al., 2008).

Stupňovitými dávkami dusíkatých hnojiv můžeme do určité úrovně podpořit příjem ostatních živin. Obsah bílkovin a tím i technologická jakost zrna se při stupňování dávek dusíku rovnoměrně zvyšuje. Podobně pozitivně jako obsah bílkovin ovlivňuje hnojení dusíkem i obsah mokrého lepku v sušině zrna. Bobtnavost a tažnost lepku však vyšší úroveň hnojení dusíkem ovlivňuje negativně. S množstvím a jakostí bílkovin je úzce spojena i kvalita mouky, charakterizována výškou sedimentu při SDS-testu. Výsledky jednoznačně potvrzují pozitivní účinek hnojení dusíkem na hodnotu sedimentačního testu a tím i na kvalitu mouk (Hřivna, 2012).

Číslo poklesu se stalo v Evropě používaným kritériem pro odhalování poškození zásobních látek endospermu pšeničného zrna hydrolytickými enzymy, syntetizovanými v zrně v důsledku startu procesu klíčení zrna v klasu před sklizní vlivem nadměrného příjmu vlhkosti. Je tedy významně ovlivněno průběhem počasí v době dozrávání zrna a sklizně, ale také odrůdou (Zimolka et al., 2005).

Objemová hmotnost pšenice je ukazatelem mlynářské jakosti a souvisí s výtěžností mouky. Závisí na odrůdě, pěstitelských podmínkách, ročníku, zdravotním stavu, vlhkosti a polehlosti. Při deštivém počasí v době sklizně rychle klesá (Prugar et al., 2008).

2.6 Dlouhodobé pokusy

Dlouhodobé polní pokusy nám umožnily získat soudobé poznatky týkající se udržitelného využívání půdy. Tyto experimenty budou nezbytné i v budoucnu, neboť nemohou být nahrazeny novými analytickými technikami a modely, ba naopak jsou nezbytným základem pro kalibraci a validaci těchto postupů (Berzsenyi et al., 2000; Körschens, 2006; Kubát et Lipavský, 2006).

Dlouhodobé polní experimenty prováděné v různých půdních a klimatických podmínkách poskytují neocenitelné informace a jsou nepostradatelným prostředkem pro studium produktivity a udržitelnosti systémů hospodaření (Kubát et al., 2003; Basso et al., 2010).

Mnohé klíčové procesy v půdě probíhají pomalým tempem, trvají několik desetiletí, a tak nemohou být snadno identifikovatelné krátkodobým sledováním (Kubát et al., 2003; Peterson et al., 2012).

Vztahy mezi hnojením plodin a výnosy, stanovení výnosotvorných prvků, tvorba půdní úrodnosti, bilance půdní organické hmoty, bilance živin v půdě a dynamika dostupných živin v půdě, patří mezi nejvýznamnější problémy, které jsou řešeny na základě výsledků dlouhodobých

polních experimentů (Lipavský et al., 2005). Dlouhodobé pokusy pomáhají také při sledování vlivu orby a střídání plodin na úrodnost půdy a k dosažení udržitelného hospodaření se živinami (Neugschwandtner et al., 2014).

Dlouhodobé pokusy lze rozdělit podle:

1. jejich využití na:

- plodinové (odrůdové, osevní postupy),
- výživářské (organické a minerální hnojení),
- agrotechnické (zpracování půdy, ochrana),

2. doby existence na:

- klasické (starší 50 let),
- středně dlouhodobé (20 – 50 let trvání)
- mladší (5 – 20 let s prognózovanou kontinuitou) (Lipavský et al., 2010).

Při výpočtu bilancí N by měla být zohledněna prostorová a časová variabilita (Öborn et al., 2003; Liu et al., 2008). K jejich náležitému vyhodnocení je zapotřebí výsledků z dlouhodobých pokusů, abychom pochopili, jak se přebytky N rozdělují mezi půdní zásobu N a ztráty N z půdy, nebo jaký vliv mohou mít deficity N na půdní rezervy N (Powlson et Jenkinson, 1990; Ross et al., 2008).

Dlouhodobé pokusy jsou nepostradatelné při zjišťování vstupů dusíku do systému plodina-půda jiným způsobem, než hnojivy (Powlson et Jenkinson, 1990). Tyto pokusy jsou sice velmi nákladné, avšak při komplexním a koordinovaném hodnocení stále představují nejefektivnější výzkumnou metodu. Díky poznatkům z nich získaných mohli v posledních desetiletích zemědělci zdvojnásobit výnosy, zlepšit kvalitu produktů a ochranu životního prostředí a zajistit dostatečnou výživu lidí (Körschens, 2006).

3. HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE

Předpokládá se, že různá organická a minerální hnojiva budou mít rozdílný vliv na výnosotvorné a kvalitativní parametry ječmene a pšenice, zároveň se také očekávají významné rozdíly mezi jednotlivými lokalitami.

Předpokládá se, že využití dusíku z aplikovaných hnojiv se bude na stanovištích lišit dle varianty hnojení a bude tedy možné pro jednotlivé plodiny vyhodnotit účinnost aplikace těchto hnojiv a použitých dávek pro konkrétní stanoviště.

Předpokládá se, že vývoj bilancí dusíku se na jednotlivých stanovištích bude v dlouhodobém časovém intervalu měnit, díky čemuž bude možné predikovat, zda v budoucnu bude na daném stanovišti hrozit spíše nedostatek či přebytek dusíku z aplikovaných hnojiv, či zda bude bilance vyrovnaná.

Pro disertační práci byly stanoveny následující cíle:

- vyhodnocení vlivu jednotlivých hnojiv a stanoviště na výnos plodin a obsah dusíku v hlavním a vedlejším produktu
- vyhodnocení vlivu hnojení a stanoviště na vybrané kvalitativní a výnosotvorné parametry plodin
- výpočet odběru dusíku hlavním a vedlejším produktem a výpočet obsahu dusíkatých látek
- výpočet vybraných ukazatelů využití dusíku a vyhodnocení vlivu hnojení a stanoviště na využití dusíku z aplikovaných hnojiv
- výpočet bilancí dusíku a posouzení dlouhodobého vlivu odlišných hnojiv a půdně-klimatických podmínek stanoviště na tyto bilance při pěstování ječmene a pšenice

4. METODIKA POKUSU

4.1 Charakteristika pokusů

Tab. 1: Půdní a klimatická charakteristika pokusných stanovišť

Stanoviště	Humpolec	Lukavec	Červený Újezd	Praha - Suchdol
GPS souřadnice	49°33'16''N, 15°21'2''E	49°33'23''N, 14°58'39''E	50°4'22''N, 14°10'19''E	50°7'40''N, 14°22'33''E
Nadmořská výška (m n. m.)	525	610	400	286
Průměrná roční teplota (°C)	7,0	7,7	7,7	9,1
Průměrný roční úhrn srážek (mm)	665	666	493	495
Půdní typ	kambizem	kambizem	hnědozem	černozem
Půdní druh	písčito-hlinitá	hlinito-písčitá	hlinitá	hlinito-písčitá
KVK (mmol(+)/kg) ¹	90	45	118	262
C _{ox} (%) ²	1,24	1,09	1,01	1,76
pH _{KCl}	4,9	5,2	6,6	7,2
P (mg/kg) ³	103 – 146	187 – 204	117 – 174	63 – 96
K (mg/kg) ³	178 – 221	277 – 326	166 – 214	218 – 257
Mg (mg/kg) ³	104 – 162	73 – 93	99 – 144	171 – 201

¹ metoda dle Gillmana

² modifikovaná Tjurinova metoda

³ metoda Mehlich 3

V disertační práci byl posuzován vliv rozdílných organických a minerálních hnojiv a vliv stanoviště na bilance a využití dusíku z aplikovaných hnojiv při pěstování jarního ječmene (*Hordeum vulgare* L.) a pšenice ozimé (*Triticum aestivum* L.) v dlouhodobých přesných polních pokusech katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin. Hodnoceny byly výsledky ze čtyř stanovišť v ČR s rozdílnými půdně-klimatickými podmínkami (tabulka č. 1). Pokusy byly založeny na podzim roku 1996, první sklizeň plodin se uskutečnila v roce 1997. Detailnější obsah živin v půdě před založením pokusu na jednotlivých stanovištích je uveden v přílohách 1 až 4.

Jednoduchý osevni postup má tuto rotaci plodin: brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen, přičemž každý rok byly pěstovány všechny plodiny (tabulka č. 2). Na lokalitě Červený Újezd byla z agrotechnických důvodů pěstována místo brambor silážní kukuřice. Pro účely disertační práce bylo hodnoceno šest variant hnojení: Kontrola, Kal, Hnůj, N, NPK, N+sláma.

Tab. 2: Rotace plodin v jednotlivých letech

	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014
Blok 1	ječmen	brambory	pšenice	ječmen
Blok 2	brambory	pšenice	ječmen	brambory
Blok 3	pšenice	ječmen	brambory	pšenice

4.2 Dávky živin a hnojiv

K plodinám byla v tříletém cyklu aplikována jednotná dávka 330 kg N/ha. Organická hnojiva (čistírenský kal, hnůj, ječná sláma) byla aplikována na podzim, a to pouze k bramborám a silážní kukuřici.

Minerální dusíkatá hnojiva (ledek amonný s vápencem) byla aplikována u brambor a ječmene před založením porostu v jedné dávce. U pšenice byla dávka rozdělena do dvou aplikací, jako regenerační a produkční hnojení. Dávky dusíku k jednotlivým plodinám, tedy 120 kg N k bramborám, 140 kg N k pšenici a 70 kg N k ječmeni byly stanoveny dle odběrových normativů těchto plodin. Fosforečná hnojiva (trojitý superfosfát) a draselná hnojiva (draselná sůl 50%) byla u varianty NPK aplikována ke všem plodinám na podzim. Množství aplikovaných živin je uvedeno v tabulce č. 3. Plochy pokusných parcel měly v Hněvčevsi, Humpolci a Lukavci 60 m², na Suchdole 60,5 m² a v Červeném Újezdě 80 m².

Tab. 3: Dávky živin N-P-K (kg/ha) během rotace plodin

Varianta	Brambory/Silážní kukuřice	Pšenice ozimá	Ječmen jarní
Kontrola	-	-	-
Kal ¹	330-207-44	-	-
Hnůj ¹	330-117-421	-	-
N ²	120-0-0	140-0-0	70-0-0
NPK ²	120-30-100	140-30-100	70-30-100
N ² +sláma ^{1,3}	138-6-47	140-0-0	70-0-0

¹ průměrné dávky podle obsahu P a K v organických hnojivech

² minerální hnojiva: N - ledek amonný s vápencem (27 % N), P – trojitý superfosfát (21 % P), K - draselná sůl (50 % K)

³ 5 t/ha slámy z ječmene

Použitý čistírenský kal pocházel z ČOV Praha - Trója. Množství aplikovaných makroprvků na jednotlivých blocích jsou uvedeny v tabulce č. 4. Blok 1 je součtem aplikací prováděných jednou za tři roky počínaje rokem 1996, blok 2 počínaje rokem 1997 a blok 3 počínaje rokem 1998.

Tab. 4: Množství živin (kg/ha) aplikované v čistírenském kalu na jednotlivých blocích

Blok	dávka (t/ha)	dávka suš. (t/ha)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)
1	142	45	1650	1303	229	1759	229
2	150	46	1650	1087	258	1372	199
3	155	49	1650	1516	297	1543	254

Hnůj byl pro potřeby pokusu získáván z jednotlivých pokusných stanic. Tabulka č. 5 udává množství aplikovaných makroprvků na jednotlivých blocích, které odpovídají výše popsaným u čistírenských kalů.

Tab. 5: Množství živin (kg/ha) aplikovaných v hnoji na jednotlivých blocích

Stanoviště	Blok	dávka (t/ha)	dávka suš. (t/ha)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)
Lukavec	1	348	111	1650	549	2391	1490	449
	2	342	73	1650	450	2200	1149	347
	3	329	82	1650	548	1726	1201	434
Humpolec	1	316	69	1650	567	1712	1048	459
	2	268	69	1650	441	1151	1178	448
	3	309	66	1650	490	1610	1006	417
Červený Újezd	1	274	76	1650	654	1958	1573	372
	2	209	62	1650	356	1057	1236	322
	3	250	72	1650	554	1378	1482	380
Suchdol	1	246	86	1650	680	1852	1659	373
	2	249	79	1650	377	1270	1307	426
	3	237	71	1650	585	1343	1493	403

Vzhledem k rozmanitosti podmínek na experimentálních stanovištích jsou odrůdy pěstovaných plodin vybírány především vzhledem k jejich plastičnosti. Během jednotlivých let byly odrůdy obměňovány dle množení odrůd v ČR. V prvních třech vegetačních obdobích byla pěstována odrůda ozimé pšenice Samanta, od roku 2000 do současnosti pak odrůda Alana. Kvalitativní parametry byly v disertační práci hodnoceny u poslední pěstované odrůdy pšenice Alana. V letech 1997 až 2004 byla pěstována odrůda jarního ječmene Akcent, následovaná odrůdou Calgary (2005 - 2011) a od roku 2012 do současnosti je pěstována odrůda Xanadu, u které byl stanovován počet odnoží, počet zrn v klasu a podíl předního zrna.

Alana je charakterizována jako polopozdní až pozdní odrůda kvalitní (A) jakosti se středně vysokým až nízkým výnosem doporučená pro pěstování v řepařské oblasti Čech a v obilnářské oblasti. Vzhledem k menší odolnosti proti poléhání je doporučená aplikace morforegulatoru. Rostliny jsou vysoké, středně odnožující, zrno je velké. Předností je odolnost proti napadení braničnatkou plevovou v klasu, střední odolnost proti napadení fuzariózami klasů. Kvalitní pekařská jakost na hranici s E kategorií. Rizikem je náchylnost k poléhání (Horáková et al., 2008).

Xanadu je sladovnická odrůda s výběrovou sladovnickou jakostí, preferovaná některými sladovnicemi. Rostliny středně vysoké. Zrno středně velké. Rizikem je menší odolnost proti napadení rzí ječnou, menší odolnost proti napadení komplexem hnědých skvrnitostí, menší odolnost proti poléhání a nízký výnos předního zrna v obou variantách pěstování v řepařské a obilnářské oblasti a v neošetřené variantě v bramborářské oblasti (Horáková et Dvořáčková, 2016).

4.3 Sklizeň a odběr vzorků

Sklizeň byla realizována pomocí maloparcelkového sklízeče. Vzorky zrna a slámy byly odebrány po sklizni v období zralosti. Zrno bylo vyčištěno od nečistot na laboratorním pneumatickém tříděči K 293 (Petkus). Vzorky byly sušeny na vzduchu s řízenou ventilací a následně homogenizovány na laboratorním střížném mlýně SM 100 (Retsch, Německo) o velikosti síta <1 mm.

4.4 Analýzy rostlinného materiálu a hodnocení kvalitativních parametrů

Výnos zrna (t/ha) byl stanoven přímo ze zrna z jednotlivých sklizňových parcel z dílčích průseků. Vážení bylo provedeno přesnými mostovými váhami. Výsledky byly přepočteny na t/ha vyjádřeny v sušině 100 %.

Výnos slámy (t/ha) byl stanoven přímo ze slámy sklizené z dílčích průseků jednotlivých parcel. Vážení bylo provedeno přesnými mostovými váhami. Výsledky byly přepočteny na t/ha vyjádřeny v sušině 100 %.

Stanovení obsahu dusíku v zrnu a slámě (%) bylo realizováno pomocí metody dle Dumase na přístroji LECO v letech 1997-2005, metodou dle Kjeldahla na přístroji KJELTEC AUTO 1030 ANALYZER (Tecator, Švédsko) v letech 2006-2008, od roku 2009 na přístroji Vapodest 50s (Gerhardt GmbH & Co. KG, Německo).

Hmotnost tisíce zrn (g) byla změřena odpočítáním 2 x 500 zrn pšenice pomocí elektronického čítače zrn (DIPOS, SP JZD Libuň) a následným zvážením.

Objemová hmotnost (kg/hl) zrna pšenice byla zjištěna pomocí laboratorního měřiče vzor 1938 (Meopta, Česká republika).

Číslo poklesu (s) bylo stanoveno z namletého zrna pšenice na přístroji PSY MP40 (Mezos, Czech Republic) o velikosti síta 0,8 mm pomocí přístroje Falling number 1400 (Perten, Švédsko) dle ČSN EN ISO 3093.

Počet odnoží byl počítán ze čtyř čtvrtmetrovek, **počet zrn v klasu** byl počítán ze dvaceti klasů a **podíl předního zrna** u ječmene byl stanoven na sítu 2,5 x 2,2 mm prosévacím přístrojem Swing 160 (Mezos, Česká republika).

4.5 Výpočty

Z analýz rostlinného materiálu byly vypočítány následující ukazatele využití dusíku z aplikovaných hnojiv:

Obsah dusíkatých látek byl vypočten z procentuálního obsahu celkového dusíku v zrnu stanoveného Kjeldahlovou metodou a vynásobeného koeficientem 6,25 pro ječmen a koeficientem 5,7 pro potravinářskou pšenici dle ČSN 46 1011–18.

Odběr dusíku zrnem v době sklizně (kg N/ha) = výnos zrna (kg/ha, 100 % sušina) x obsah celkového dusíku v zrnu (%).

Odběr dusíku slámou v době sklizně (kg N/ha) = výnos slámy (kg/ha, 100 % sušina) x obsah celkového dusíku ve slámě (%).

Sklizňový index (% , HI – Harvest index) = výnos zrna (kg/ha, 100 % sušina) / (výnos zrna (kg/ha, 100 % sušina) + výnos slámy (kg/ha, 100 % sušina)) (Donald, 1962).

Sklizňový index odběru dusíku (% , NHI – Nitrogen harvest index) = odběr dusíku zrnem (kg/ha) / (odběr dusíku zrnem (kg/ha) + odběr dusíku slámou (kg/ha)) (Delogu et al., 1998).

Využití dusíku (kg/kg, NUE – Nitrogen use efficiency) = výnos zrna (kg/ha, 100 % sušina) / aplikovaná dávka dusíku (kg/ha) (Moll et al., 1982).

Účinnost využití dusíku (kg/kg, NUtE – Nitrogen utilization efficiency) = výnos zrna (kg/ha, 100 % sušina) / odběr dusíku zrnem (kg/ha) (Moll et al., 1982).

Účinnost remobilizace dusíku (% , RE_N – Recovery efficiency of applied nitrogen) = (odběr dusíku zrnem (kg/ha) na hnojené variantě – odběr dusíku zrnem na nehnojené variantě (kg/ha)) / dávka dusíku na hnojené variantě (kg/ha) (Dobermann, 2005).

Agronomická efektivita aplikovaného dusíku (% , AE_N – Agronomic efficiency of nitrogen) = (výnos zrna na hnojené variantě (kg/ha) – výnos zrna na nehnojené variantě (kg/ha)) / dávka dusíku na hnojené variantě (kg/ha) (Dobermann, 2005).

Bilance aplikovaného - odebraného dusíku (kg N/ha, ΔN – Nitrogen input - output balance) = dávka dusíku (kg/ha) - (odběr dusíku zrnem (kg/ha) + odběr dusíku slámou (kg/ha)) (Liu et al., 2010).

Statistické vyhodnocení bylo provedeno v programu STATISTICA 12,0 (StatSoft, Tulsa, USA) za pomoci analýzy rozptylu (ANOVA) s následným podrobnějším vyhodnocením Tukeyho testem na hladině významnosti $\alpha < 0,05$. Koeficienty korelace (r) hodnocených vlastností byly uvedeny v korelační matici.

5. VÝSLEDKY

Shejbalová, Š. (Buráňová), Černý, J., Vašák, F., Kulhánek, M., Balík, J. (2014). Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment. *Plant, Soil and Environment*, 7. 291-296

Buráňová, Š., Černý, J., Kulhánek, M., Vašák, F., Balík, J. (2015). Influence of mineral and organic fertilizers on yield and nitrogen efficiency of winter wheat. *International Journal of Plant Production*, 9 (2). 257-271

Černý, J., Buráňová, Š., Sedlář, O., Kovářík, J., Kulhánek, M., Mužík, J. (2015). Vliv hnojení a stanoviště na výnos jarního ječmene. *Úroda*, 4. 42-48

Buráňová, Š., Černý, J., Mitura, K., Lipińska, K. J., Kovářík, J., Balík, J. (2016). Effect of organic and mineral fertilizers on yield parameters and quality of wheat grain. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 47 (2). 47-53

5.1

Shejbalová, Š. (Buráňová), Černý, J., Vašák, F., Kulhánek, M., Balík, J. (2014). Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment. *Plant, Soil and Environment*, 7. 291-296

V článku byl hodnocen jarní ječmen v pokusných letech 1997 – 2012 na stanovištích Humpolec a Červený Újezd. Zpracovány byly výsledky následujících parametrů: výnos zrna (t/ha), výnos slámy (t/ha), obsah dusíku v zrně (%), obsah dusíku ve slámě (%), odběr dusíku zrnem (kg/ha), odběr dusíku slámou (kg/ha). Efektivita využití dusíku byla zjišťována pomocí NUtE (kg/kg), RE_N (%) a AE_N (kg/kg). Sumární bilance dusíku byly zpracovány pro kontrolní variantu a varianty s minerálním hnojením.



Influence of mineral and organic fertilizers on yield and nitrogen efficiency of winter wheat

Š. Buráňová*, J. Černý, M. Kulhánek, F. Vašák, J. Balík

Department of Agro-Environmental Chemistry and Plant Nutrition, Faculty of Agrobiological, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic.

*Corresponding author. E-mail: shejbalova@af.czu.cz

Received 26 June 2014; Accepted after revision 26 October 2014; Published online 20 February 2015

Abstract

The aim of this study was to evaluate the long-term (16-years) nitrogen efficiency after the application of organic and mineral fertilizers at two sites Lukavec (S_1) and Suchdol (S_2) with different soil and climatic conditions in the Czech Republic (Central Europe) and to determine grain yield and nitrogen content with regard to the requirements of protein content for baking quality of wheat. After the application of NPK treatment the highest average values from both sites of grain yield (6.22 t ha^{-1}), nitrogen content (2.01%) and nitrogen uptake (123.6 kg ha^{-1}) were determined, which means 78%, 26% and 121% increases compared to the unfertilized treatment. At the less fertile S_1 , located on Cambisol, the significant effect of nitrogen fertilization on yield was observed. The yield of the NPK treatment was by 144% higher compared to the unfertilized Control treatment. The limit of 11.5% of protein content for bakery wheat was not achieved for any of treatments at S_1 , at S_2 for unfertilized treatment and treatments with organic fertilizers. Lower values of recovery efficiency of nitrogen and N input-output balance were found at S_2 situated on Chernozem.

Keywords: Nitrogen; Nitrogen balance; Wheat; Fertilization; Yield.

Introduction

Wheat is grown across a wide range of environments around the world (Blumenthal et al., 2001) and it is the most cultivated plant in the Czech Republic. In 2012 winter wheat was cultivated on 30.1% from the total

sown area (Czech Statistical Office, 2012). Nitrogen is the key element in achieving consistently high yields in cereals (Delogu et al., 1998; Shi et al., 2012) and to improve the grain quality of wheat (Hussain et al., 1996; McKenzie et al., 2005; Pan et al., 2005). Increasing N supply generally improves kernel integrity and strength, resulting in better milling properties of the grain (Blumenthal et al., 2001). Crop response to applied N and use efficiency are important criteria for evaluating crop N requirements for maximum economic yield, because nitrogen is one of the most expensive nutrients to supply and commercial fertilizers represent the major cost in plant production. Worldwide, crops do not directly utilize about half of the applied N (Fageria et al., 2005; Dobermann, 2007; Maselaux-Daubresse et al., 2010). Values of NUE (nitrogen use efficiency) differed between world regions. Averages of cereal NUE between years 1999-2003 published Dobermann and Cassman (2005) differed from the lowest in East Asia (32 kg kg⁻¹) to middle in North America (45 kg kg⁻¹), Oceania (46 kg kg⁻¹) and Latin America (55 kg kg⁻¹) to the highest in East Europe, Central Asia (90 kg kg⁻¹) and Africa (123 kg kg⁻¹). Low recovery of N is not only responsible for higher cost of crop production, but also for environmental pollution (Fageria et al., 2005). Hence, nitrogen fertilization plays a central role in improving yield in wheat and high N use efficiency is desirable to protect ground and surface waters (Salvagiotti et al., 2009).

The objectives of this paper were to answer the following questions: (1) Which of the treatments supported the highest dry matter (DM) yield and nitrogen content in grain? (2) Which site achieved the greatest effect of nitrogen fertilization on yield? (3) Which of the treatments and sites comply with the requirements of the protein content for baking wheat? (4) Which location indicated the highest risk of nitrogen losses?

Material and Methods

Experimental site

The long-term field experiments were established in 1996 at two sites with different soil and climatic conditions (Table 1) in the Czech Republic: Lukavec (S₁) and Suchdol (S₂). A simple crop rotation contained: potatoes (*Solanum tuberosum* L.), winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and spring barley (*Hordeum vulgare* L.). Each year all of the crops were grown. Fertilization treatments were repeated in three blocks. The size of experimental plots was 60 m² at S₁ and 60.5 m² at S₂.

Table 1. Characteristic of experimental sites.

Site	Lukavec (S ₁)	Suchdol (S ₂)
Location	49° 33' 23" N, 14° 58' 39" E	50° 7' 40" N, 14° 22' 33" E
Altitude (m a.s.l.)	610	286
Average annual temperature (°C)	7.7	9.1
Average annual precipitation (mm)	666	495
pH	4.3	7.5
Soil type	Cambisol	Chernozem
Soil texture	sandy loam	silt loam

Field experiment

For the purpose of this research 6 fertilizing treatments were evaluated: 1. no fertilization (Control), 2. sewage sludge (SS), 3. farmyard manure (FYM), 4. N as mineral fertilizer (N), 5. NPK as mineral fertilizer (NPK) and 6. N as mineral fertilizer + spring barley straw (N+ST). Calcium ammonium nitrate was used for mineral nitrogen fertilization. The whole experiment was based on the same nitrogen rate of 330 kg N ha⁻¹ to the crop rotation (of which 140 kg N ha⁻¹ was applied to winter wheat) except the Control treatment, which was not fertilized. Organic fertilizers were applied in autumn only to potatoes in crop rotation. In the second year after the application of manure the availability of total applied N is assumed to be 11% (Eghball et al., 2002) and in case of anaerobically digested sludge 10% (Mininni et al., 1987). Nitrogen mineral fertilizers were applied before the vegetation to the potatoes and spring barley. For winter wheat the nitrogen rate was divided into two doses, the first rate (70 kg N ha⁻¹) was applied as regeneration fertilization and the second rate (70 kg N ha⁻¹) was applied as productive fertilization. Cereal straw was moved from experimental plots after harvest. Fertilization is shown in more details in Table 2. Between the years 1997-2000 the Samanta variety of winter wheat was grown and between 2001-2012 the Alana variety.

Table 2. Rates of nutrients N-P-K (kg ha⁻¹) during crop rotation cycle.

Treatment	Fertilization	Potatoes	Winter wheat	Spring barley
1	Control	-	-	-
2	SS ¹	330-207-44	-	-
3	FYM ¹	330-117-421	-	-
4	N ²	120-0-0	140-0-0	70-0-0
5	NPK ²	120-30-100	140-30-100	70-30-100
6	N ² +ST ^{1,3}	138-6-47	140-0-0	70-0-0

¹ P and K in organic fertilizers - average dose taking into account nutrient content in organic fertilizers; ² mineral fertilizers: N - calcium ammonium nitrate (27% N), P - triple super phosphate (21% P), K - potassium chloride (50% K); ³ 5 t/ha spring barley straw.

Plant sampling and analysis

Plant samples were taken after the harvest of the mature plants (at maturity). Afterwards the samples were homogenized in a laboratory knife mill (Cutting mill, SM 100, Retch, Haan, Germany) equipped with normalised mesh with circle holes to sieve the particles <1 mm. Determination of total nitrogen was carried out by the Kjeldahl method (Kjeltec Auto 1030 Analyzer (Tecator, Hoganas, Sweden) (1997-2005) and Vapodest 50s (Gerhardt GmbH & Co. KG, Germany) (2006-2012)). Statistical evaluation of the results was performed between treatments and between years with data over 16 years in the STATISTICA 12.0 program (StatSoft, Tulsa, USA) with the Main effects ANOVA followed by the Tukey's test at the level of significance $P < 0.05$. Results of the experiment were obtained from the years 1997-2012, which covered five crop rotations. To obtain the protein content in grain, the measured values of nitrogen were multiplied by a coefficient 5.7 (ČSN 46 1011-18). In the Czech Republic it is necessary to reach a minimum value of protein content in grain 11.5% to be classified as baking wheat. For the purpose of experiment ten characteristic features for winter wheat were observed: 1. DM yield of grain (t ha⁻¹), 2. nitrogen content in grain (%), 3. nitrogen uptake by grain (kg ha⁻¹), 4. nitrogen use efficiency (NUE, kg kg⁻¹) (Moll et al., 1982), 5. nitrogen utilization efficiency (NUE, kg kg⁻¹), 6. recovery efficiency of applied N (RE_N, %) 7. agronomic efficiency of nitrogen (AE_N, kg kg⁻¹), 8. harvest index (HI, %) (Donald, 1962), 9. nitrogen harvest index (NHI, %) and 10. N input-output balance (ΔN , kg N ha⁻¹) (Liu et al., 2010).

$$\text{NUE} = Y/F$$

$$\text{NUtE} = Y/U$$

$$\text{RE}_N = (U_x - U_0)/F$$

$$\text{AE}_N = (Y_x - Y_0)/F$$

$$\text{HI} = Y/Y_t$$

$$\text{NHI} = U/U_t$$

$$\Delta N = F - U_t$$

Y - grain yield (t ha^{-1})

Y_t - yield of grain + straw (t ha^{-1})

U - uptake of nitrogen (kg ha^{-1})

U_t - total uptake (grain + straw) of nitrogen (kg ha^{-1})

F - amount of applied nitrogen (kg ha^{-1})

0 - control treatment with no N fertilizing

x - treatments with N fertilizing

Results

At S₁ the lowest average yields of the Control treatment was only 2.59 t ha^{-1} , but the NPK treatment increased the average of the DM yield by 144% to 6.31 t ha^{-1} . The effect of treatment on DM yield was highly significant at S₁ (DF=5; F=36.870; P<0.05), differences in the post-hoc test are in Table 3. About 23% higher harvest index than Control was recorded for SS treatment (Table 4). Average values of nitrogen uptake were about 189% higher for NPK treatment than for Control. The highest nitrogen content was achieved in the grain of winter wheat at S₁ after the application of nitrogen in mineral form compared to the unfertilized treatment (NPK about 21% higher than Control). The lowest average nitrogen content was observed in the Control treatment. Values of protein content ranged between 8.93% and 10.82%, which means, that any of the treatments had sufficient protein content. At S₁ we determined a significantly higher N harvest index for mineral fertilized treatments compared to the Control. Average values of nitrogen harvest index for treatments with mineral fertilization were about 14% higher than for Control. Treatments with organic fertilizing achieved increases of about 8%. Significantly higher AE_N compare to other treatments was found for SS treatment at S₁ (Table 4), it was approximately about 65% higher than for treatments with fertilization in mineral form. The highest values of NUE occurred after the application of sewage sludge. The average values of NUE for treatments with mineral nitrogen were about 44 kg kg^{-1} .

At S₁ the highest average values of nitrogen utilization efficiency for SS treatment were observed (Table 5). In the NPK treatment average values of NUtE were about 17% lower than for the Control. The highest average RE_N was observed at S₁ for FYM (not significant).

Table 3. Average DM yield (t ha⁻¹), Nitrogen uptake (kg ha⁻¹) and Nitrogen content (%) of winter wheat grain at S₁ and S₂ site (average from years 1997-2012).

Treatment	DM yield (t ha ⁻¹)		Nitrogen uptake (kg ha ⁻¹)		Nitrogen content (%)	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
Control	2.59 ^a	4.42 ^a	40.7 ^a	71.2 ^a	1.56 ^{ac}	1.63 ^a
SS	4.94 ^b	5.38 ^{ab}	61.8 ^b	99.2 ^b	1.62 ^{abcd}	1.86 ^{ab}
FYM	3.87 ^c	4.80 ^{ab}	61.1 ^b	81.4 ^{ab}	1.59 ^{ace}	1.72 ^a
N	6.28 ^{dc}	5.81 ^{ab}	113.2 ^c	120.8 ^{bc}	1.83 ^{abcd}	2.11 ^b
NPK	6.31 ^{de}	6.13 ^b	117.6 ^c	129.6 ^c	1.88 ^{bd}	2.14 ^c
N+ST	5.98 ^{bde}	5.80 ^{ab}	108.7 ^c	121.5 ^{bc}	1.84 ^{bc}	2.12 ^c

Values in the column with the same letter were not significantly different at P<0.05.

Table 4. Harvest index (%), Nitrogen harvest index (%) and Agronomic efficiency of nitrogen (%) by winter wheat grain at S₁ and S₂ site (average from years 1997-2012).

Treatment	HI (%)		NHI (%)		AE _N (%)	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
Control	47.04 ^a	59.30 ^a	73.93 ^a	87.17 ^a	-	-
SS	57.87 ^b	56.81 ^a	79.54 ^{ab}	86.52 ^a	76.44 ^a	31.75 ^a
FYM	51.35 ^{ab}	56.84 ^a	80.82 ^{ab}	85.35 ^a	37.79 ^b	13.14 ^b
N	53.82 ^{ab}	56.44 ^a	83.94 ^b	85.42 ^a	27.96 ^b	10.58 ^b
NPK	55.77 ^{ab}	56.92 ^a	84.50 ^b	86.98 ^a	28.07 ^b	12.50 ^b
N+ST	56.31 ^{ab}	54.30 ^a	85.29 ^b	84.11 ^a	25.55 ^b	10.21 ^b

Values in the column with the same letter were not significantly different at P<0.05.

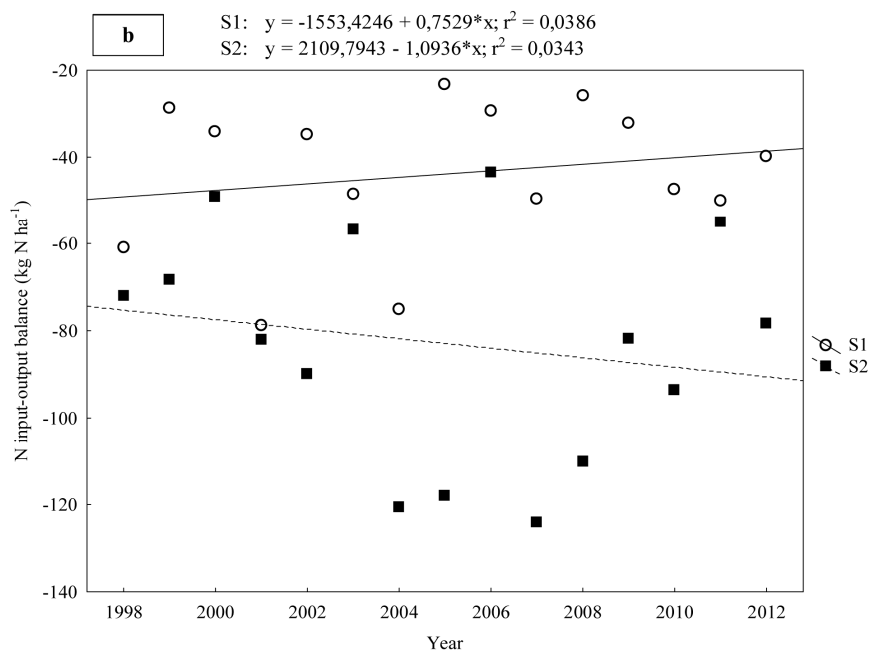
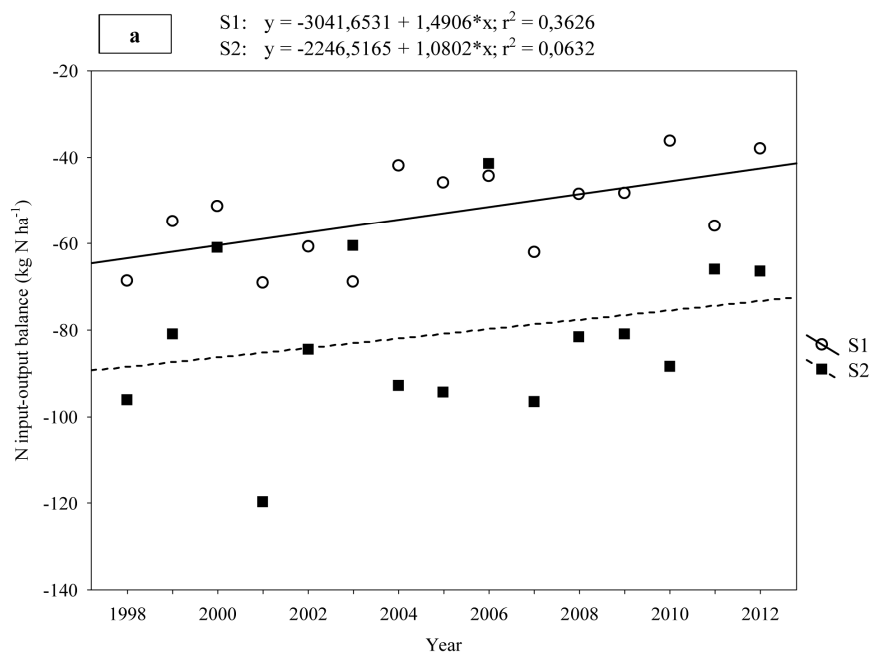
Table 5. Average Nitrogen use efficiency (kg kg⁻¹), Nitrogen utilization (kg kg⁻¹) and Recovery efficiency of nitrogen (%) of winter wheat grain at S₁ and S₂ site.

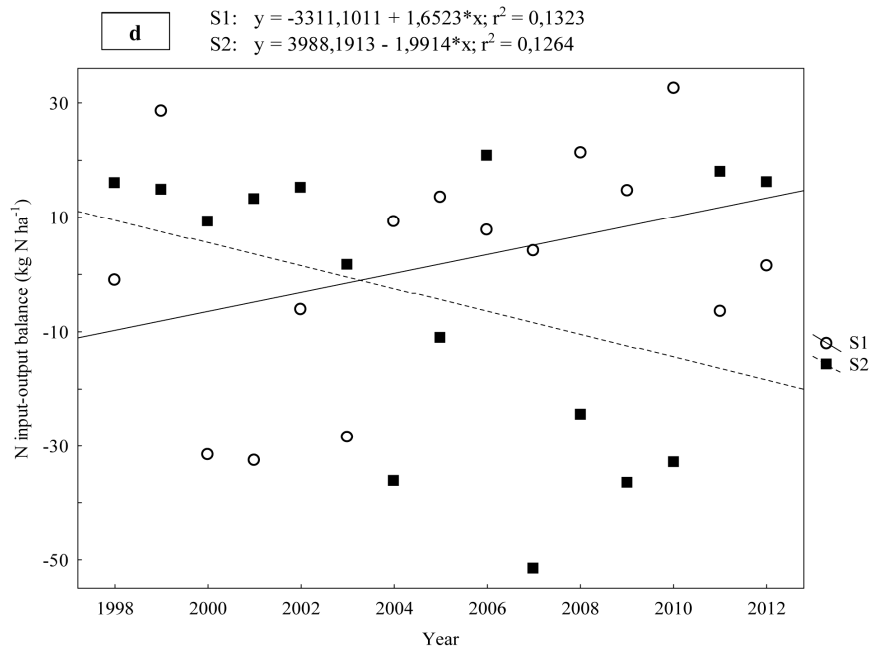
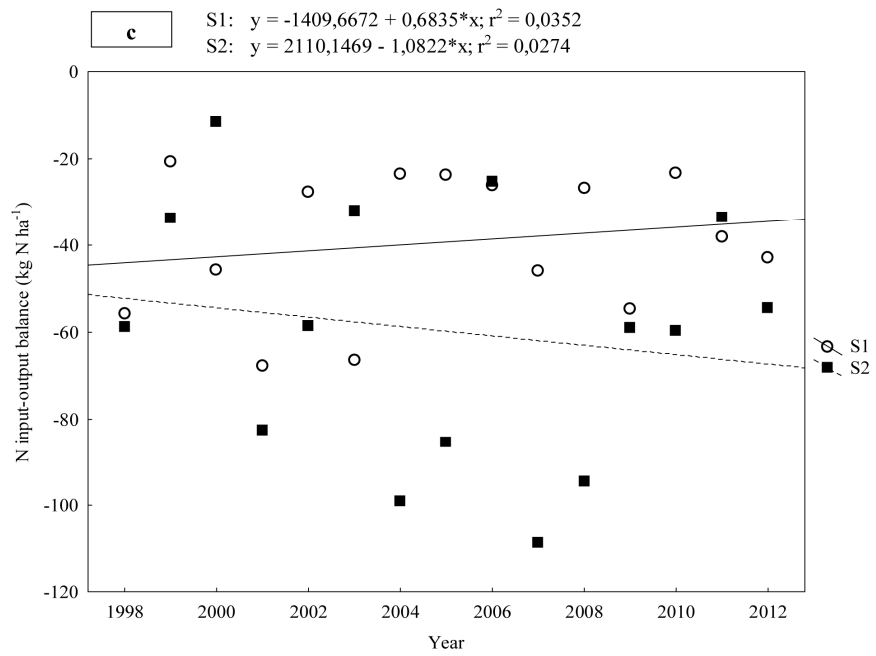
Treatment	NUE (kg kg ⁻¹)		NUtE (kg kg ⁻¹)		RE _N (%)	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
Control	-	-	64.90 ^a	62.84 ^a	-	-
SS	149.80 ^a	133.83 ^a	80.98 ^b	54.08 ^b	60.67 ^a	90.93 ^a
FYM	106.54 ^b	148.24 ^a	63.80 ^{ac}	59.18 ^a	66.54 ^a	32.82 ^b
N	44.87 ^c	34.29 ^b	55.67 ^{ac}	47.73 ^c	41.36 ^a	36.00 ^b
NPK	45.08 ^c	41.48 ^b	54.09 ^c	47.07 ^c	61.69 ^a	40.85 ^b
N+ST	42.69 ^c	43.80 ^b	55.34 ^{ac}	47.50 ^c	55.48 ^a	36.50 ^b

Values in the column with the same letter were not significantly different at P<0.05.

Positive average values from all experimental years were only found at S_1 for treatments with mineral nitrogen application and its combination with straw. At these two treatments (N and N+ST) were obtained the highest N input-output balances: N $1.82 \text{ kg N ha}^{-1}$ ($p=0.1827$; $r=0.3637$); N+ST $9.32 \text{ kg N ha}^{-1}$ ($p=0.0666$; $r=-0.4855$). All treatments showed a high variability between experimental years, but at S_1 rising tendency of ΔN for all treatments over time was observed, for the Control treatment at both sites (Figure 1). Average value of ΔN from all years was at S_1 for Control - 52.97 ($p=0.0175$; $r=0.6021$); SS -43.89 ($p=0.4831$; $r=0.1963$); FYM $-39.27 \text{ kg N ha}^{-1}$ ($p=0.5029$; $r=0.1877$).

At S_2 the highest yield was achieved for NPK treatment (6.13 t ha^{-1}) (Table 3). Values of harvest index from all fertilized treatments were lower compared to the Control treatment (not significant). In the Control treatment significantly lower average nitrogen uptake of winter wheat grain was found as compared to treatments with mineral fertilizers. In the NPK treatment nitrogen uptake was about 82% higher than in the Control. At this location the highest content of N in grain (2.1%) was obtained in the treatments with mineral N fertilization. Sufficient protein content for baking wheat was achieved at S_2 only in treatments with mineral fertilizers (12%). Nitrogen harvest index was lower in mineral and organic fertilized treatments, than for unfertilized Control, but the differences were not significant. The lowest average values of AE_N were found after the application of N+ST at S_2 (11 kg kg^{-1}). Use of mineral fertilizers resulted in low NUE values. Values of treatments with mineral fertilizers decreased about 73% compared to the FYM treatment. At S_2 was the significantly highest RE_N at SS treatment, for the other treatments values were about 60% lower. The highest N input-output balances were obtained for N treatment with $-4.49 \text{ kg N ha}^{-1}$ ($p=0.1934$; $r=-0.3555$) and N+ST treatment with $-4.65 \text{ kg N ha}^{-1}$ ($p=0.1594$; $r=-0.3825$). Average value of ΔN from all years was at S_1 only $-80.80 \text{ kg N ha}^{-1}$ for Control ($p=0.3660$; $r=0.2514$); $-82.91 \text{ kg N ha}^{-1}$ for SS ($p=0.5088$; $r=-0.1852$) and $-59.75 \text{ kg N ha}^{-1}$ for FYM ($p=0.5558$; $r=-0.1654$). The averages of ΔN were higher for all treatments at S_1 than at S_2 .





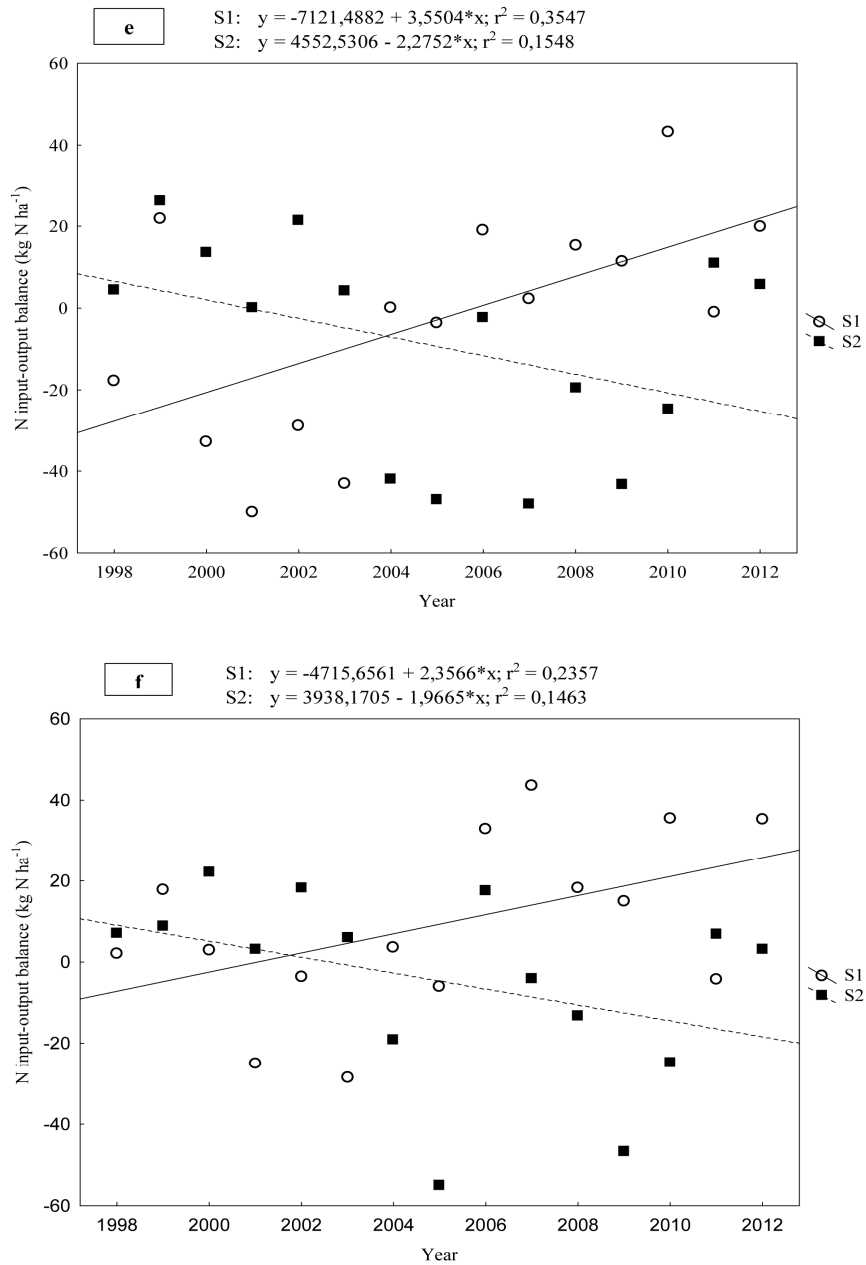


Figure 1. N input-output balances (ΔN , kg N ha⁻¹) in different experimental years at S₁ and S₂ at different treatments: a) Control (unfertilized), b) SS (sewage sludge), c) FYM (farm yard manure), d) N, e) NPK, f) N+ST.

Discussion

Many previous experiments documented that the use of nitrogen fertilization supported production of higher yields (Hussain et al., 1996; Delogu et al., 1998; Latiri-Souki et al., 1998; Balík et al., 2003; Modhej et al., 2008; Shah et al., 2009). The highest yields were observed in our experiment after using mineral nitrogen. The higher influence of fertilizer application on yield was achieved at S₁. Černý et al. (2010) presented results of winter wheat and spring barley, where the highest influence of nitrogen fertilizer application was observed on less fertile locations and relatively little direct influence of applied nitrogen fertilizer was on more fertile. Hejčman et al. (2010) evaluated a long-term experiment with winter wheat at our S₁, where the lowest increases of yield were at unfertilized control treatment and after the application of lower doses of nitrogen (15 kg N ha⁻¹), which indicates the low natural fertility of sandy loam Cambisol (predominant soil type in Central Europe). After the application of 140 kg N ha⁻¹ an increase of nitrogen uptake of about 116 % compared to the Control treatment was found. Cossani et al. (2012) described, that at intermediate fertilized treatments (lower than 100 kg N ha⁻¹) N uptake was about 60% higher, as compared to the unfertilized treatment and for high fertilized treatments (≥ 100 kg N ha⁻¹) N uptake was even about 80% higher compared to the unfertilized treatments. In our experiment the lowest N uptake we found in the Control treatment (40.7 kg N ha⁻¹) and the highest nitrogen uptake at NPK treatment (117.6 kg N ha⁻¹). Grain N concentration is one of the main quality parameters of winter wheat grain. At both experimental sites the lowest average N content we found in the Control treatment, which is in agreement with the results of Delogu et al. (1998). Kozlovský et al. (2009) achieved with the application of 150 kg N ha⁻¹ to winter wheat similar values to our mineral fertilized treatments (about 2%). The limit for baking wheat as an average for all reporting years was not achieved for the Control treatment and after the application of organic fertilizers (FYM, SS) at S₂. The minimal value of the N content for baking wheat at S₁ was not achieved for any of the treatments, which is assumed to be caused by the low natural fertility of this location. From our results it is evident that the highest response to nitrogen fertilization was at the less fertile S₁, especially after use of nitrogen in mineral fertilizers.

The average values of AE_N at S₁ for treatments with mineral fertilizer application ranged about 27% and 11% at S₂, which is comparable with similar experiments with winter wheat (Delogu et al., 1998; Chuan et al.,

2013; Duan et al., 2014). According to Dobermann and Cassman (2005) global NUE for cereal production is at the level of 37 kg kg^{-1} , which was mostly exceeded by our results. The only exception was treatment N at S_2 , where the average was 34.3 kg kg^{-1} . At S_1 we found higher values of NUtE than at S_2 , which could be due to insufficient precipitation at S_2 . This assumption is supported by results of Hejcman et al. (2012). The average of NUtE from both sites for Control treatment was about 25% higher than for treatments with mineral nitrogen fertilizers. Similar decreases in NUtE as in our experiment were observed with the increasing N application in many experiments with nitrogen fertilizing of wheat (Hussain et al., 1996; Delogu et al., 1998; Limon-Ortega et al., 2000; López-Bellido et al., 2005; Dobermann, 2007; Cossani et al., 2012). According to Dobermann et al. (2004) RE_N depends on the congruence between plant N demand and the quantity of N released from applied N. After the application of 140 kg N ha^{-1} we obtained average values of RE_N for N treatment 46%, 55% NPK treatment and 53% N+ST, similar values observed Shi et al. (2012) in the experiment with the nitrogen application for winter wheat. At S_2 were low values for FYM (33%) and treatments with fertilization in mineral form (37%). According to Fageria et al. (2005) low recovery of N in annual crop is associated with its loss by volatilization, leaching, surface runoff and denitrification. The use of organic fertilizers or any application of nitrogen led at both sites to considerably negative balances of nitrogen compare to fertilization in mineral form. There was variability between the experimental years for ΔN . Lower N uptake by plants resulted in some years in higher values of ΔN after the use of N in mineral form (especially treatment N+ST). It can be caused by higher microbial immobilization after application of higher doses of nitrogen and straw (Bremer and Kuikman, 1997).

Conclusions

(1) In our study we proved, that the highest positive influence on DM yield and nitrogen content in grain was for NPK treatment. Average DM yield from both sites increased about 78% for NPK treatment compared to the unfertilized Control treatment.

(2) At less fertile S_1 location was observed the greatest effect of nitrogen fertilization on yield, especially for fertilizers in mineral form. The average yield for NPK treatment at this site was 6.31 t ha^{-1} , which means an increase of about 144% compared to the Control treatment.

(3) Three of our six experimental treatments comply with the protein content requirements for baking wheat. Only treatments with mineral nitrogen fertilizers exceeded the minimal limit of 11.5% at S₂. At S₁ the limit was not exceeded for any of the treatments.

(4) From lower values of RE_N for treatments with mineral nitrogen and farmyard manure and from lower values of ΔN for treatments with organic fertilizers and without fertilization at S₂, it can be concluded, that this location has greater risks of nitrogen losses compared to S₁. Higher efficiency of nitrogen from mineral fertilizers was found at the low productive S₁, situated on Cambisol, compare to the naturally more fertile S₂, situated on Chernozem. On fertile sites with less precipitation, it is necessary to select a dose of N fertilizers with regard to the higher rate of nitrogen losses to the environment.

Acknowledgements

This study was supported by CULS in Prague Project CIGA, Project No. 20112005 and FAFNR IGA Project No. 211401312/3104002.

References

- Balík, J., Černý, J., Tlustoš, P., Zitková, M., 2003. Nitrogen balance and mineral nitrogen content in the soil in a long experiment with maize under different systems of N fertilization. *Plant Soil Environ.* 49, 554-559.
- Blumenthal, J.M., Baltensperger, D.D., Cassman, K.G., Mason, S.C., Pavlista, A.D., 2001. Importance and Effect of Nitrogen on Crop Quality and Health. in: *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems and Management*. Elsevier Science, USA.
- Bremer, E., Kuikman, P., 1997. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen. *Plant Soil.* 190, 119-126.
- Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Čásová, K., Nedvěd, V., 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant Soil Environ.* 56, 28-36.
- Chuan, L., He, P., Pampolino, M.F., Johnston, A.M., Jin, J., Xu, X., Schicheng, Z., Qiu, S., Zhou, W., 2013. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Res.* 140, 1-8.
- Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2012. Nitrogen and water use efficiencies of wheat and barley under a Mediterranean environment in Catalonia. *Field Crops Res.* 128, 109-118.
- ČSN 46 1011-18. Czech national standard, 2003. Testing of cereals, pulses and oilseeds. Czech Standards Institutes.
- Czech Statistical Office, 2012. Development of areas and a first estimate of harvest.
- Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., Falcis, D.D., Maggiore, T., Stanca, A.M., 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *Eur. J. Agron.* 9, 11-20.

- Dobermann, A.R., Cassman, K.G., 2005. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Sci. China Ser. C* 48, 745-758.
- Dobermann, A.R., Simbahan, G.C., Moya, P.F., Adviento, M.A.A., Tiongco, M., Witt, C., Dawe, D., 2004. Methodology for socioeconomic and agronomic on-farm research in the RTDP project, in: Dobermann, A.R., Witt, C., Dawe, D., *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems through Site-Specific Nutrient Management*. Science Publishers, Inc., International Rice Institute, Enfield, USA and Philippines.
- Dobermann, A.R., 2007. Nutrient use efficiency, measurement and management. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 7-9 March 2007, Brussels, Belgium, International Fertilizer Industry Association.
- Donald, C.M., 1962. In search of yield. *J. Aust. I. Agr. Sci.* 28, 171-178.
- Duan, Y., Xu, M., Gao, S., Yang, X., Huang, S., Liu, H., Wang, B., 2014. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications. *Field Crops Res.* 157, 47-56.
- Eghball, B., Wienhold, B.J., Gilley, J.E., Eigenberg, R.A., 2002. Mineralization of manure nutrients. *J. Soil Water Conserv.* 57, 470-473.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., 2005. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Adv. Agron.* 88, 97-185.
- Hejman, M., Kunzová, E., 2010. Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. *Field Crops Res.* 115, 191-199.
- Hejman, M., Kunzová, E., Šrek, P., 2012. Sustainability of winter wheat production over 50 years of crop rotation and N, P and K fertilizer application on illimerized luvisol in the Czech Republic. *Field Crops Res.* 139, 30-38.
- Hussain, G., Al-Jaloud, A.A., Karimulla, S., 1996. Effect of treated effluent irrigation and nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of wheat. *Agr. Water Manage.* 30, 175-184.
- Kozlovský, O., Balík, J., Černý, J., Kulhánek, M., Kos, M., Prášilová, M., 2009. Influence of nitrogen fertilizer injection (CULTAN) on yield, yield components formation and quality of winter wheat grain. *Plant Soil Environ.* 55, 536-543.
- Latiri-Souki, K., Nortcliff, S., Lawlor, D.W., 1998. Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. *Eur. J. Agron.* 9, 21-34.
- Limon-Ortega, A., Sayre, K.D., Francis, C.A., 2000. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in Northwest Mexico. *Agron. J.* 92, 303-308.
- Liu, J., Liu, H., Huang, S., Yang, X., Wang, B., Li, X., Ma, Y., 2010. Nitrogen efficiency in long-term wheat-maize cropping systems under diverse field sites in China. *Field Crops Res.* 118, 145-151.
- López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Redondo, R., 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Res.* 94, 86-97.
- Maselaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., Suzuki, A., 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Ann Bot-London.* 105, 1141-1157.
- McKenzie, R.H., Middleton, A.B., Bremer, E., 2005. Fertilization, seeding date and seeding rate for malting barley yield and quality in southern Alberta. *Can. J. Plant Sci.* 85, 603-614.

- Mininni, G., Santori, M., 1987. Problems and perspectives of sludge utilization in agriculture. *Agr. Ecosyst. Environ.* 18, 291-311.
- Modhej, A., Naderi, A., Emam, Y., Ayneband, A., Normohamadi, G., 2008. Effects of post-anthesis heat stress and nitrogen levels on grain yield in wheat (*T. durum* and *T. aestivum*) genotypes. *Int. J. Plant Prod.* 2, 258-267.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74, 562-565.
- Pan, J., Zhu, Y., Jiang, D., Dai, T., Li, Y., Cao, W., 2005. Modelling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Res.* 97, 322-336.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J.M., Miralles, D.J., Pedrol, H.M., 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Res.* 113, 170-177.
- Shah, S.A., Shah, S.M., Mohammad, W., Shafi, M., Nawaz, H., 2009. N uptake and yield of wheat as influenced by integrated use of organic and mineral nitrogen. *Int. J. Plant Prod.* 3, 45-56.
- Shi, Z., Li, D., Jing, Q., Cai, J., Jiang, D., Cao, W., Dai, T., 2012. Effects of nitrogen applications on soil nitrogen balance and nitrogen utilization of winter wheat in a rice-wheat rotation. *Field Crops Res.* 127, 241-247.

5.2

Buráňová, Š., Černý, J., Kulhánek, M., Vašák, F., Balík, J. (2015). Influence of mineral and organic fertilizers on yield and nitrogen efficiency of winter wheat. *International Journal of Plant Production*, 9 (2). 257-271

V článku byla zpracována data ze stanovišť Lukavec a Suchdol z pokusných let 1997 - 2012. U pšenice ozimé byl hodnocen výnos zrna (t/ha), obsah dusíku v zrně (%) a odběr dusíku zrnem (kg/ha). Pro detailnější upřesnění hodnocených parametrů byl počítán sklizňový index (%) a sklizňový index odběru dusíku (%). Pro zjištění efektivity využití dusíku bylo počítáno s následujícími ukazateli: NUE (kg/kg), NUtE (kg/kg), RE_N (%) a AE_N (kg/kg). Na všech variantách byly zjišťovány bilance aplikovaného – odebraného dusíku (kg N/ha).

Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment

Š. Shejbalová, J. Černý, F. Vašák, M. Kulhánek, J. Balík

Department of Agro-Environmental Chemistry and Plant Nutrition, Faculty of Agrobiological Sciences, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate nitrogen (N) efficiency from different organic and mineral fertilizers applied to the spring barley. Dry matter yield, N content and N uptake of spring barley from 16 years of experiments at two sites in the Czech Republic with different soil and climatic conditions were analyzed. For assessing of nitrogen efficiency nitrogen utilization efficiency (NUE, kg/kg), recovery efficiency of applied N (%), agronomic efficiency of applied N (kg/kg) and summary N balances ($\Sigma\Delta N$, kg/ha) were observed. Six fertilization treatments were utilized: no fertilization (control); sewage sludge; farmyard manure (FYM); N in mineral fertilizers (N); NPK in mineral fertilizers (NPK) and N in mineral fertilizers + straw (N + ST). Yields were about 68% higher at NPK (S1 site) and 55% at N + ST (S2 site) in comparison with control. The highest NUE was recorded at both locations after application of FYM. Higher NUE from mineral fertilizers was obtained at low productive S1 site. At both sites a trend of decreasing $\Sigma\Delta N$ over time was observed. At both sites a trend of decreasing negative N balance was observed. At lower productive site the decline of N balance was minimized for mineral fertilizers treatments in last experimental years. At higher productive site the differences between treatments with mineral nitrogen and control were lower and the decline of N balance continued over all 16 years of experiment duration.

Keywords: N balance; mineral fertilizers; organic fertilizers; yield; nitrogen utilization

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is an important cereal, which is grown in many parts of world. In 2011 the total growing area for barley was 54 million hectares with production of around 152 million tons. It is the third most important cereal in Europe after wheat and maize (FAO 2011). Efficient nitrogen fertilization is essential for economic production and protection of the environment. For this reason improvement in nitrogen use efficiency (NUE) has become a desirable goal in barley research. Nitrogen use efficiency in the crop is influenced by N uptake from the soil, N assimilation in the plant and N redistribution from vegetative parts to the grain (Andersson and Holm 2011). The key targets of the NUE research are to increase the proportion of N recovered from the soil (RE_N) and to obtain an enhanced efficiency

of utilization of the N taken-up for yield formation (NUE). Increased N recovery and utilization efficiency may allow growers to maximize yield under a moderate rate of N fertilization instead of the high rate of N fertilization (Anbessa and Juskiw 2012, Bingham et al. 2012). If N is applied and not taken up by the crop or immobilized in soil organic N pools, which include both microbial biomass and soil organic matter, is vulnerable to losses from volatilization, denitrification and leaching (Cassman et al. 2002). Only 30–50% of applied nitrogen fertilizer is taken up by crops (Dobermann 2005), hence the improvement in NUE is important to reduce input costs and the negative impact of excessive N on the environment (Snyder 2009, Anbessa and Juskiw 2012). Fertilizer N crop recovery efficiency is driven by three main sets of

controls: 1. crop N demand; 2. N supply and 3. N losses. Each set of controls comprises several processes and variables. Some processes can be managed in a field (e.g., delivery of nutrients, disease control), but other variables cannot be controlled (temperature, rainfall, or soil texture) (Balasubramanian et al. 2004). Nitrogen budgeting approaches are often used to evaluate system-level N use efficiency, and to understand N cycling by estimates of input, storage and export processes by mass balance (Dobermann 2005).

The objective of this paper was to investigate: treatments reaching the highest dry matter (DM) yield, N content and N uptake by spring barley grain, treatments and site supporting the highest N efficiency and their effect on summary N balance.

MATERIAL AND METHODS

Experimental site. The experiment was established in 1996 in the Czech Republic – at two sites with different soil and climatic conditions: S1 (Humpolec, 49°33'16"N, 15°21'2"E), S2 (Červený Újezd, 50°4'22"N, 14°10'19"E). S1 site is localized 525 m a.s.l., average annual temperature is 7°C with 665 mm average annual precipitation. The soil type is Cambisol with sandy loam soil texture. S2 site is 410 m a.s.l., average annual temperature is 7.7°C with 493 mm average annual precipitation. The soil texture at S2 site is silt loam (Luvisol). A simple crop rotation included: potatoes (S1)/silage maize (S2), winter wheat and spring barley. Each year all of the crops were grown. Fertilization treatments were repeated in three blocks. The size of experimental plots was 60 m² at S1 and 80 m² at S2 site.

Field experiment. Six fertilization treatments were utilized: 1. no fertilization (control); 2. sew-

age sludge (SS); 3. farmyard manure (FYM); 4. N in mineral fertilizers (in calcium ammonium nitrate) (N); 5. NPK in mineral fertilizers (NPK) and 6. mineral N fertilizers + 5 t/ha spring barley straw (N + ST). The whole experiment was based on the same nitrogen rate 330 kg N/ha to the crop rotation (of which 70 kg N/ha to the spring barley) except the non-fertilized control treatment as detailed in Table 1. By this rate of nitrogen high yields with adequate grain crude protein were achieved for malting barley (Pettersson and Eckersten 2007). Organic fertilizers (sewage sludge, farmyard manure, straw) were applied in autumn only to the potatoes (S1)/silage maize (S2) in the crop rotation. Mineral N fertilizers were applied to the spring barley before sowing. Between the years 1996–2004 cv. Akcent of spring barley was grown, between 2005–2011 cv. Calgary and then in 2012 cv. Xanadu.

Plant sampling and analysis. Plant samples were collected after the plants were harvested (at maturity). Results of the experiment were obtained from the years 1997–2012, which means five crop rotations. Determination of total nitrogen was carried out by the Kjeldahl method on the KjeltecAuto 1030 Analyzer (Tecator, Hoganas, Sweden) (1997–2005) and Vapodest 50s (Gerhardt GmbH & Co. KG, Germany) (2006–2012). Statistical evaluation of the results was performed between treatments, with data over 16 years pooled together in the Statistica 9.0 program (StatSoft, Tulsa, USA) with the single-factorial ANOVA followed by the Tukey's test at the level of significance $P < 0.05$.

The following characteristics were calculated: 1. Nitrogen utilization efficiency (NUE, kg/kg); 2. Recovery efficiency of applied N (RE_N , %); 3. Agronomic efficiency of applied N (AE_N , kg/kg) and 4. Summary N balances ($\Sigma\Delta N$, kg/ha). According

Table 1. Rates of nutrients NPK (kg/ha) during crop rotation cycle

Treatment	Fertilization	Potatoes/Silage maize	Winter wheat	Spring barley
1	control	–	–	–
2	SS ¹	330-207-44	–	–
3	FYM ¹	330-102-307	–	–
4	N ²	120-0-0	140-0-0	70-0-0
5	NPK ²	120-30-100	140-30-100	70-30-100
6	N ² + ST ^{1,3}	138-6-47	140-0-0	70-0-0

¹P and K in organic fertilizers – average dose taking into account nutrient content in organic fertilizers; ²mineral fertilizers: N – calcium ammonium nitrate (27% N), P – triple super phosphate (21% P), K – potassium chloride (50% K); 35 t/ha spring barley straw; SS – sewage sludge; FYM – farmyard manure; ST – straw

Table 2. Influence of different fertilizers on dry matter (DM) yield, nitrogen content and nitrogen uptake by grain and straw of spring barley

Treatment	DM yield (t/ha)		Nitrogen content (%)		Nitrogen uptake (kg/ha)	
	grain	straw	grain	straw	grain	straw
S1 location						
Control	2.81 ^a	2.22 ^a	1.61 ^a	0.48 ^a	46.0 ^a	11.7 ^a
SS	3.45 ^a	2.58 ^a	1.65 ^a	0.50 ^a	57.0 ^a	13.7 ^a
FYM	3.49 ^a	2.62 ^a	1.60 ^a	0.48 ^a	55.7 ^a	14.3 ^a
N	4.40 ^b	3.38 ^a	1.78 ^a	0.57 ^a	76.2 ^b	19.6 ^a
NPK	4.73 ^b	3.74 ^b	1.67 ^a	0.51 ^a	78.1 ^b	20.3 ^a
N + ST	4.55 ^b	3.46 ^b	1.76 ^a	0.55 ^a	78.6 ^b	19.1 ^a
S2 location						
Control	2.78 ^a	2.10 ^a	1.59 ^a	0.54 ^a	43.7 ^a	10.7 ^a
SS	3.75 ^b	2.53 ^a	1.60 ^a	0.52 ^a	58.6 ^b	12.4 ^a
FYM	3.63 ^b	2.43 ^a	1.58 ^a	0.51 ^a	55.3 ^a	11.8 ^a
N	4.22 ^b	3.21 ^b	1.97 ^b	0.70 ^b	82.3 ^b	22.6 ^b
NPK	4.34 ^b	3.32 ^b	1.93 ^b	0.67 ^b	82.6 ^b	21.7 ^b
N + ST	4.35 ^b	3.36 ^b	2.00 ^b	0.75 ^b	85.2 ^b	23.6 ^b

Treatments with the same letter are not significantly different ($P \leq 0.05$). SS – sewage sludge; FYM – farmyard manure; ST – straw

to Dobermann (2005) RE_N depends on the congruence between plant N demand and the quantity of N released from applied N. Summary N balances were calculated as differences between applied N and uptake N (grain + straw) (Liu et al. 2010) summarized in consecutive years.

1. $NUtE = Y/U$ (Moll et al. 1982)
2. $RE_N = (U_x - U_0)/F \times 100$
3. $AE_N = (Y_x - Y_0)/F$
4. $\Sigma \Delta N$

Where: x – treatments with N fertilizing; 0 – control treatment with no N fertilizing; Y – crop yield of grain (kg/ha); U – uptake of N by grain (kg/ha); U_t – total (grain + straw) uptake of N (kg/ha); F – amount of applied N (kg/ha)

$$\Delta N = F - U_t$$

RESULTS AND DISCUSSION

The average dry matter yield, N content in DM and N uptake by grain and straw of spring barley are shown in Table 2 (S1 and S2). DM yield of grain and straw was similar at both locations, however a slightly larger yield was achieved at S1 site. The highest increases of yield were obtained after using nitrogen in mineral form. The increased yields were about 68% by NPK (S1) and 55% by N + ST (S2) higher in comparison with non-fertilized treatment. Obtaining the highest yields after us-

ing nitrogen in mineral forms confirm Cossani et al. (2009), who achieved 4.5 t/ha of barley grain after the application of 80 kg N/ha and by Cantero-Martinéz et al. (2003), who obtained, in a 3 year experiment, an average yield of 4.3 t/ha after an annual dose of 75 kg N/ha. The effect of treatment on grain yield was highly significant at both sites: S1 ($df = 5$; $F = 11.833$; $P < 0.05$), S2 ($df = 5$; $F = 9.532$; $P < 0.05$), differences in post-hoc test are in Tables 2 and 3. DM yields of unfertilized control treatment were more balanced at S2 site, situated on Luvisol. The effect of soil type on sustainable production of crops confirms the results of many studies (Kunzová and Hejcman 2009, Černý et al. 2010, Hejcman et al. 2012). The highest increase of nitrogen content in grain was achieved at S1 by N treatment (10% higher than control) and at S2 by N + ST (26% higher than control) and by uptake of nitrogen at both sites by N + ST. Use of fertilizers with nitrogen in mineral form at S2 site led to significantly higher content of nitrogen in grain and straw compared to unfertilized treatment, which is in agreement with many researchers (Pettersson and Eckersten 2007, Sedlář et al. 2011, Hejcman et al. 2013). Previous application of organic fertilizers resulted in lower or comparable value of nitrogen content to unfertilized treatment. Delogu et al. (1998) in the experiment with nitrogen fertilization of barley, described

Table 3. Efficiency of nitrogen

Treatment	NUE (kg/kg)		RE _N (%)		AE _N (kg/kg)	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Control	63.0 ^a	65.1 ^a	–	–	–	–
SS	61.4 ^a	64.2 ^a	–	–	–	–
FYM	64.2 ^a	66.5 ^a	–	–	–	–
N	58.7 ^a	51.4 ^b	46.2 ^b	58.2 ^a	25.0 ^a	22.0 ^a
NPK	61.8 ^a	53.1 ^b	46.7 ^b	56.9 ^a	29.0 ^a	23.3 ^a
N + ST	59.2 ^a	51.5 ^b	48.7 ^b	60.3 ^a	26.5 ^a	23.6 ^a

Treatments with the same letter are not significantly different ($P \leq 0.05$). SS – sewage sludge; FYM – farmyard manure; ST – straw; NUE – nitrogen utilization efficiency; RE_N – recovery efficiency of applied N; AE_N – agronomic efficiency of applied N; S1 – Humpolec; S2 – Červený Újezd

that after using of 80 kg N/ha average nitrogen content in grain increased about 18% compared to unfertilized treatment.

Average values of NUE, RE_N and AE_N can be found in Table 3. Higher efficiency of nitrogen from mineral fertilizers was evaluated at low productive S1 site. This confirms Hejzman et al. (2012), who found a negative influence of naturally fertile soils (situated in lowlands) on the efficiency of mineral N application due to insufficient precipitation at these sites. On the contrary the efficiency of nitrogen from organic fertilizers was greater at S2 site. Angás et al. (2006) published results from the 3 year experiment on the effects of nitrogen fertilization on barley. After application of 75 kg N/ha in mineral form average NUE was 56.6 kg/kg, which corresponds to our results. Higher values of NUE occurred at treatments with organic fertilization compared to the treatments with mineral form of nitrogen. It was probably caused by lower available nitrogen in the third year of using organic fertilizers. The highest NUE was recorded at both

locations after application of FYM because of lower N content in grain at FYM treatment compared to treatment with mineral N fertilizers. There is also effect of increased post-anthesis nitrogen uptake from soil due the higher mineralization of organic residues from FYM at this treatment (Montemurro et al. 2006). Yield of barley is limited by the storage capacity (sink) of grains rather than the supply of assimilate for grain filling. A limited storage capacity may lead to feedback inhibition on the rate of photosynthesis post-anthesis (Bingham et al. 2007). For treatment with mineral fertilizers average values of RE_N ranged between 46.2% (N) and 60.3% (N + ST). Snyder (2009) and Ladha et al. (2005) determined values of RE_N between 30–50% as typical for N recovery in cereals and values between 50–80% as achieved in the best management in cereals. At S1 site lower values of RE_N were observed than in S2, it signaled a greater risk of nitrogen losses at S1, which can be due to sandy loam soil texture. The average of AE_N for treatments with nitrogen in mineral form was

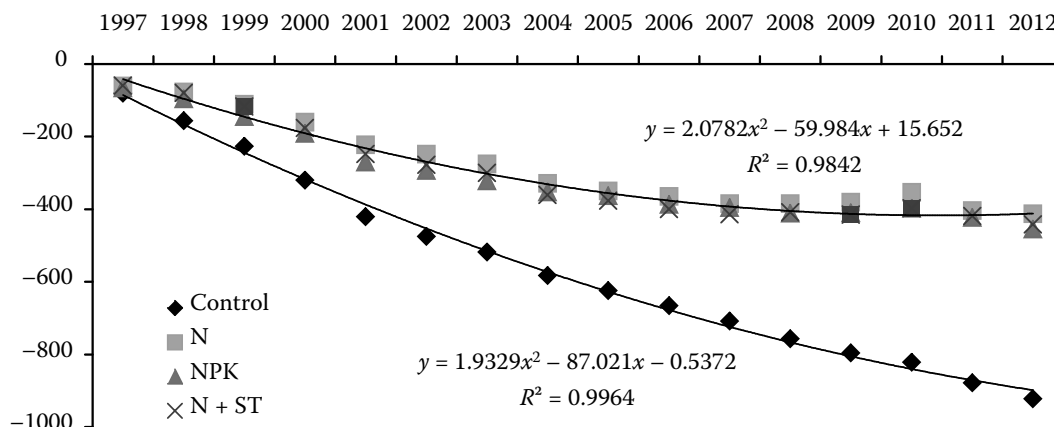


Figure 1. Summary N balances ($\Sigma\Delta N$, kg N/ha) in consecutive experimental years at S1 site. ST – straw

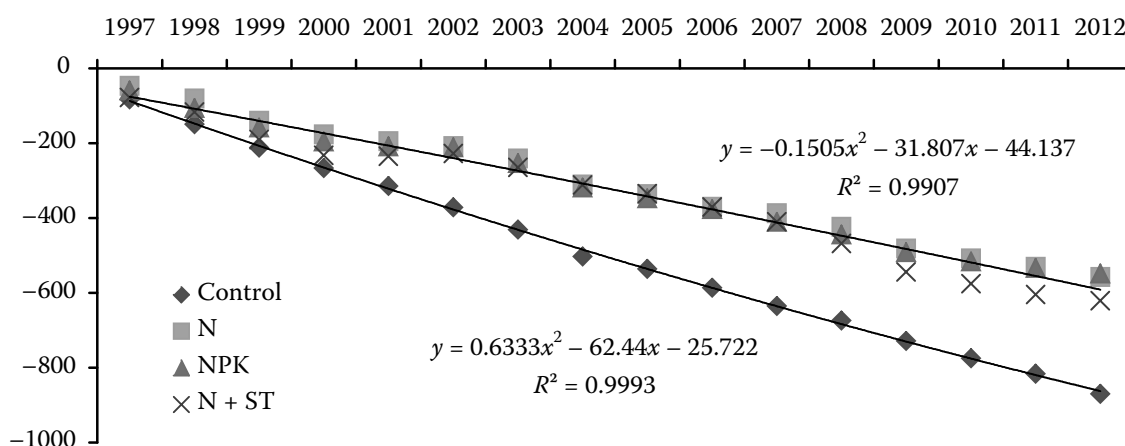


Figure 2. Summary N balances ($\Sigma\Delta N$, kg N/ha) in consecutive experimental years at S2 site. ST – straw

25 kg/kg. N agronomic efficiency is according to Delogu et al. (1998) a parameter representing the ability of the plant to increase yield in response to N applied. The agronomic efficiency of N widely depends on growing conditions (Mengel et al. 2006). Higher values of AE_N were at S1 site. It is consistent with higher efficiency of nitrogen from mineral fertilizers at this site. The highest value of AE_N was evaluated at NPK treatment at S1 site, but the data are not statistical significant due the annual variability. Agronomic efficiency was greatly dependent on meteorological situation in the growing season and therefore greatly differed between years.

Summary N balances started at first harvested year 1997 for treatments with mineral N on -62 kg N/ha at both sites and on -81 kg N/ha at S1 and -83 kg N/ha at S2 for control treatment. For treatments with mineral fertilizing values of summary N balances in the last experimental year 2012 decreased to -437 kg N/ha at S1 and -576 kg N/ha at S2, for unfertilized control treatment -922 kg N/ha at S1 and -870 kg N/ha at S2. At both sites a trend of decreasing $\Sigma\Delta N$ over time was observed, especially for treatment without any fertilizer input. At S1 nitrogen fertilization in mineral form led from a decrease of $\Sigma\Delta N$ to equalizing to slight increase in last observed years, detailed in Figures 1 and 2. At S2 site were apparent the differences between treatments with mineral nitrogen in the recent years, there were lower values for N + ST compared to other treatments with nitrogen fertilizers. From summary N balances and values of RE_N it can be assumed, that a higher risk of losses is at S1 site. Spring barley is a crop with a short growing season and weak root system, therefore

there is a greater risk of nitrogen losses into the environment.

REFERENCES

- Anbessa Y., Juskiw P. (2012): Review: Strategies to increase nitrogen use efficiency of spring barley. *Canadian Journal of Plant Science*, 92: 617–625.
- Andersson A., Holm L. (2011): Effects of mild temperature stress on grain quality and root and straw nitrogen concentration in malting barley cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197: 466–476.
- Angás P., Lampurlanés J., Cantero-Martínez C. (2006): Tillage and N fertilization: Effects on N dynamics and barley yield under semiarid Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 87: 59–71.
- Balasubramanian V., Alves B., Aulakh M., Bekunda M., Cai Z., Drinkwater L., Mugendi D., Kessel C. van, Oenema O. (2004): Crop, environmental, and management factors affecting nitrogen use efficiency. In: Mosier A., Syers J.K., Freney J.R. (eds.): *Agriculture and the Nitrogen Cycle*. Scope, USA.
- Bingham I.J., Blake J., Foulkes M.J., Spink J. (2007): Is barley yield in the UK sink limited?: I. Post-anthesis radiation interception, radiation-use efficiency and source-sink balance. *Field Crops Research*, 101: 198–211.
- Bingham I.J., Karley A.J., White P.J., Thomas W.T.B., Russell J.R. (2012): Analysis of improvements in nitrogen use efficiency associated with 75 years of spring barley breeding. *European Journal of Agronomy*, 42: 49–58.
- Cantero-Martínez C., Angas P., Lampurlanés J. (2003): Growth, yield and water productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) affected by tillage and N fertilization in Mediterranean semiarid, rainfed conditions of Spain. *Field Crops Research*, 84: 341–357.
- Cassman K.G., Dobermann A., Walters D.T. (2002): Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 31: 132–140.

- Černý J., Balík J., Kulhánek M., Čásová K., Nedvěd V. (2010): Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant, Soil and Environment*, 56: 28–36.
- Cossani C.M., Slafer G.A., Savin R. (2009): Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Research*, 112: 205–213.
- Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., de Falcis D., Maggiore T., Stanca A.M. (1998): Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9: 11–20.
- Dobermann A.R. (2005): Nitrogen Use Efficiency – State of the Art. University of Nebraska, Lincoln.
- FAO (2011): FAOSTAT Database Agricultural Production. Available at <http://apps.fao.org>. Food and Agricultural Organization of the United Nations
- Hejcman M., Kunzová E., Šrek P. (2012): Sustainability of winter wheat production over 50 years of crop rotation and N, P and K fertilizer application on illimerized luvisol in the Czech Republic. *Field Crops Research*, 139: 30–38.
- Hejcman M., Berková M., Kunzová E. (2013): Effect of long-term fertilizer application on yield and concentrations of elements (N, P, K, Ca, Mg, As, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) in grain of spring barley. *Plant, Soil and Environment*, 59: 329–334.
- Kunzová E., Hejcman M. (2009): Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. *Field Crops Research*, 111: 226–234.
- Ladha J.K., Pathak H., Krupnik T.J., Six J., van Kessel C. (2005): Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87: 85–156.
- Liu J., Liu H., Huang S., Yang X., Wang B., Li X., Ma Y. (2010): Nitrogen efficiency in long-term wheat-maize cropping systems under diverse field sites in China. *Field Crops Research*, 118: 145–151.
- Mengel K., Hütsch B., Kane Y. (2006): Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. *European Journal of Agronomy*, 24: 343–348.
- Moll R.H., Kamprath E.J., Jackson W.A. (1982): Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74: 562–564.
- Montemurro F., Maiorana M., Ferri D., Convertini G. (2006): Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and sources of N fertilization. *Field Crops Research*, 99: 114–124.
- Pettersson C.G., Eckersten H. (2007): Prediction of grain protein in spring malting barley grown in northern Europe. *European Journal of Agronomy*, 27: 205–214.
- Sedlár O., Balík J., Kozlovský O., Peklová L., Kubešová K. (2011): Impact of nitrogen fertilizer injection on grain yield and yield formation of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant, Soil and Environment*, 57: 547–552.
- Snyder C.S. (2009): Nitrogen use efficiency: Global challenges, trends and the future. Nutrient use efficiency. In: Proceedings of the XVIII Latin American Congress of Soil Science, 16–20th November 2009, Costa Rica, 10–17.

Received on December 20, 2013

Accepted on April 30, 2014

Corresponding author:

Ing. Šárka Shejbalová, Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6-Suchdol, Česká republika
phone: + 420 224 382 816, e-mail: shejbalova@af.czu.cz

5.3

Černý, J., Buráňová, Š., Sedlář, O., Kovářík, J., Kulhánek, M., Mužík, J. (2015). Vliv hnojení a stanoviště na výnos jarního ječmene. Úroda, 4. 42-48

Na stanovištích Suchdol a Červený Újezd byly v článku porovnávány dva pokusné roky – 2013 a 2014. U jarního ječmene byl hodnocen počet odnoží, počet zrn v klasu, výnos zrna, obsah dusíku v nadzemní biomase a v zrně. Posuzován byl také vliv průběhu počasí a půdních podmínek.

Vliv hnojení a stanoviště na výnos jarního ječmene

Souhrn: V dlouhodobých polních pokusech byly v letech 2013 a 2014 hodnoceny výnosové ukazatele jarního sladovnického ječmene (počet odnoží, počet zrn v klasu, výnos zrna, obsah dusíku v nadzemní biomase a v zrně). Posuzován byl vliv průběhu počasí a půdních podmínek na dvou stanovištích (Červený Újezd a Praha-Suchdol) při různých systémech hnojení. Na obou stanovištích byly varianty s organickými hnojivy (chlévkový hnůj a čistírenský kal) a minerálními hnojivy (ledek amonný s vápencem, trojitý superfosfát a draselná sůl D560). Rozhodující pro tvorbu výnosu bylo v obou letech rozložení srážek v kombinaci s průběhem teplot, což především ovlivnilo podmínky pro příjem dusíku z půdy.

Klíčová slova: dlouhodobé polní pokusy, dusík, průběh počasí, výnos, systém hnojení

Effect of fertilization and location on yield parameters of spring barley

Summary: Yield parameters of spring malting barley (number of tillers, number of grains per spike, grain yield, nitrogen content in aboveground biomass and grain) were evaluated in long-term field experiments in 2013 and 2014. The impact of weather and soil conditions at two sites (Červený Újezd and Prague-Suchdol) were studied at different fertilization systems. Treatments with organic fertilizer (manure and sewage sludge) and mineral fertilizers (calcium ammonium nitrate, triple superphosphate and muriate of potash 60) were at both sites. Crucial to yield formation in both years was distribution of precipitation in combination with the temperatures, which primarily affect the conditions for nitrogen uptake from the soil.

Keywords: long-term field experiments, nitrogen, yield, weather conditions, fertilization systems

Nezbytným předpokladem stabilních výnosů zrna jarního sladovnického ječmene je dobrá zásoba přístupných živin v půdě (Hřivna a Vavroušová, 2009; Shejbalová a kol., 2014). Ve vztahu k výnosu a kvalitě zrna je velice důležité hnojení dusíkem, přičemž rozhoduje nejen dávka dusíku, ale také období jeho příjmu a využití rostlinami. Výnos a kvalita ječmene jsou podle Váňové a Klema (2009) ovlivněny v podmínkách České republiky nejvýznamněji ročníkem. Pro jarní ječmen je však také důležité správně posoudit ostatní stanovištní faktory, především půdní vlastnosti. Výsledky některých pokusů ukazují, že odlišné hnojení jarního ječmene nemusí mít průkazný vliv na výnos při stejných podmínkách stanoviště. V zemědělské praxi tak bývá často uplatňován stejný systém hnojení této plodiny v jednom podniku, přestože obhospodařované pozemky mohou mít rozdílné podmínky. V tomto příspěvku se proto zaměříme na hodnocení vlivu hnojení při zohlednění průběhu počasí a rozdílných podmínek stanoviště.

Metodika

Sledování bylo uskutečněno na dlouhodobých stacionárních polních pokusech katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin (KAVR) České



Jarní ječmen během vegetace citlivě reaguje na agrotechniku nejen v pokusech, ale také na polích

Foto Milan Kroulík

zemědělské univerzity v Praze. Dlouhodobé pokusy KAVR jsou založeny na pěti stanovištích v České republice, avšak pro potřeby tohoto příspěvku byla vybrána jen dvě – Praha-Suchdol (50°7'40"N, 14°22'33"E) a Červený Újezd (50°4'22"N, 14°10'18"E) – tabulka 1. Obě stanoviště jsou vhodná pro pěstování sladovnického ječmene a jsou od sebe vzdálena jen 20 km. V našich podmínkách je taková vzdálenost mezi pozemky obhospodařovanými jedním podnikem realitou, ale ne vždy je posuzována možná rozdílnost lokalit a případná potřeba odlišných postupů hospodaření. Na obou stanovištích je používán stejný systém pokusných variant (dávky živin, typ hnojiv), aby bylo možné stanoviště vzájemně porovnávat. Varianty s aplikací minerálních hnojiv (N, NPK) byly porovnány s variantami, kde je aplikován chlévkový hnůj (Hnůj) a čistírenské kaly (Kal). Systém pokusů je nastaven jako pravidelná rotace tří plodin (brambory/kukuřice – ozimá pšenice – jarní ječmen), kde jsou organická hnojiva aplikována pouze pod brambory/kukuřici a u dalších plodin je sledováno následné působení. Ačkoliv jsou varianty označeny jako Kal a Hnůj, je jarní ječmen pěstován až třetím rokem po aplikaci organických hnojiv. Do výsledků byla také zařazena dlouhodobě nehnojená



kontrolní varianta, neboť vliv ročníku a stanoviště je nejvíce patrný právě na této variantě. Je pochopitelné, že v zemědělské praxi nehnojené kontroly nejsou, ale pro zemědělský výzkum jsou nepostradatelnou složkou pro správnou interpretaci výsledků. Celkové dávky živin v hnojivech jsou uvedeny v tabulce 2. Minerální dusíkatá hnojiva ve formě ledku amonného s vápencem (LAV) jsou aplikována u brambor a ječmene před založením porostu, na bloku pšenice je dávka dusíku rozdělena na dvě poloviny. První jako regenerační, druhá jako produkční přihnojení. Plocha pokusných parcel je 60 m² v Suchdole a 80 m² v Červeném Újezdě. Pěstována byla odrůda Xanadu.

Pokusy byly založeny již v roce 1996 a po celou dobu je dodržován výše uvedený systém hnojení a rotace plodin. Takto jsou eliminovány faktory, s nimiž je potřeba počítat například v krátkodobých pokusech, a to je vliv předplodiny, předchozího hnojení a podobně.

Během sledovaného období byl na obou stanovištích hodnocen počet odnoží, počet zrn v klasu, výnos zrna, podíl předního zrna, obsah dusíku v nadzemní biomase v době kvetení a obsah dusíku v zrna (přepočítaný na obsah hrubého proteinu N x 6,25). Pro správné posouzení výsledků byla během vegetace také sledována dynamika obsahu minerálního dusíku v půdě (Shejbalová a kol., 2013; Kovářik a kol., 2014).

Výsledky a diskuse

Jarní ječmen má sice poměrně krátkou vegetační dobu, avšak v průběhu jeho růstu jsou rozhodující údobí pro tvorbu jednotlivých výnosotvorných prvků a formování kvalitativních parametrů. Výsledky, které jsou v tomto příspěvku prezentovány, pocházejí z posledních dvou let dlouhodobých pokusů. Tyto roky se na sledovaných stanovištích od sebe odlišovaly z pohledu průběhu počasí, především v jarním a letním období. Ačkoliv se může jednat o přehlednější rozdíl nebo v dlouhodobějším průměru nepatrné, tím, že nastaly v klíčových obdobích růstu, ovlivnily utváření výnosu jarního ječmene a měly vliv i na kvalitativní parametry zrna. Z těchto

důvodů je nezbytné využívat podrobnější údaje o průběhu počasí, nejen měsíční či roční průměry.

Vliv ročníku (průběhu počasí) na růst Již při porovnání meteorologických dat (graf 1 a 2) jsou patrné rozdíly ve sledovaných letech. V roce 2013 byl

pozdější nástup jara, chladné období trvalo až do začátku dubna a poté se výrazně oteplilo. Přestože průběh teplot byl na obou stanovištích obdobný, půdní podmínky umožnily výsev jarního ječmene na stanovišti Suchdol dříve než v Červeném Újezdě (tab. 3). Tomu pak odpovídal

další vývoj porostů. Lze však konstatovat, že toto období, zvláště první polovina vegetace, bylo poměrně krátké. V roce 2014 byly na obou stanovištích vhodné podmínky pro včasný výsev, ale s ohledem na nižší teploty po zasetí (oproti roku 2013) probíhal vývoj pomaleji. Důležitý

CARBONBOR[®] Zn+Cu+S CARBON Energo[®]

Jistota pro vaše obilniny

- Vyšší tvorba cukrů a aminokyselin
- Vyšší příjem živin z půdy
- Posílení zdravotního stavu - křemík, měď

Carbon Energo[®] : 88,- až 176,- /ha

Carbonbor[®] Zn+Cu+S : 255,- /ha



Výrobce: KLOFÁČ, spol. s r. o.

Provoz Bořitov, Průmyslová 137, 679 21 Černá Hora

tel.: 603 274 778, 603 115 814, www.klofac-hnojiva.cz



Tab. 1 – Charakteristika stanovišť

Stanoviště	Nadmožská výška (m n. m.)	Průměrná roční teplota (°C)	Průměrná roční srážky (mm)	Půdní typ	Půdní druh
Praha-Suchdol	286	9,1	495	černozem modální	hlinitopísčité
Červený Újezd	400	7,7	493	hnědozem modální	hlinitá

Tab. 2 – Celkové dávky živin aplikovaných v hnojivech v průběhu rotace plodin (kg č. ž./ha)

Varianta	Brambory			Pšenice			Ječmen		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Kontrola	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kal	330 ¹⁾	201 ²⁾	55 ²⁾	0	0	0	0	0	0
Hnůj	330 ¹⁾	118 ²⁾	374 ²⁾	0	0	0	0	0	0
N	120	0	0	140	0	0	70	0	0
NPK ³⁾	120	30	100	140	30	100	70	30	100

¹⁾ celkový dusík v organických hnojivech
²⁾ průměrná dávka podle obsahu živin v hnojivech
³⁾ P – trojitý superfosfát; K – draselná sůl DS 60

byl v obou letech ale průběh počasí v druhé polovině vegetace, kdy byly ovlivněny především podmínky pro vytváření zrna.

Odnožování ječmene

Teplé počasí v dubnu a květnu v roce 2013 vytvořilo vhodné podmínky pro intenzivní odnožování. Na variantách hnojených minerálními hnojivami byly stanoveny počty odnoží vyšší než 1700/m², což představovalo přes pět odnoží na rostlinu (tab. 4 a 5). Současně odrůdy vykazují velmi dobrou odnožovací schopnost a není výjimkou i více než šest odnoží na jednu rostlinu. Odrůda Xanadu, která je v pokusech používána, se vyznačuje vyšší odnožovací schopností. Optimálně by se měl počet klasů na rostlinu pohybovat do hodnoty 2,5, neboť při nedostatečné výživě a vyšším počtu klasů dochází k redukci výnosu v přepočtu na jeden klas.

U jarního ječmene je proto důležité hodnotit stav porostu během vegetace a podle odnoží a vytvářejících se klasů případně upravit hnojení dusíkem. Pokud je patrné utváření klasů ve více odnožích, je možné jarní ječmen i během vegetace přihnojovat, neboť vyšší úroveň intenzity pěstitelské technologie se projevuje především při vyšší hustotě porostu. Naopak nedostatek dusíku nepříznivě ovlivňuje tvorbu zrna v období po odkvětu (období plnění zrna) a může tak docházet ke snížení výnosu, jak uvedeme dále.

Avšak hnojení dusíkem nad potřeby potenciálního výnosu je neefektivní a může způsobovat také další problémy, například s poléháním porostu a případně zhoršením kvalitativních parametrů zrna.

Zvýšený počet klasů může také působit na snížení obsahu dusíkatých látek v zrně, je-li sladovnický ječmen pěstován například po plodinách jako cukrová řepa, organicky hnojené předplodině a na stanovištích, kde k většímu uvolňování (mineralizaci) dusíku může docházet. S vyšší tvorbou dusíkatých látek v zrně se však častěji můžeme setkat u málo odnožených porostů s po-

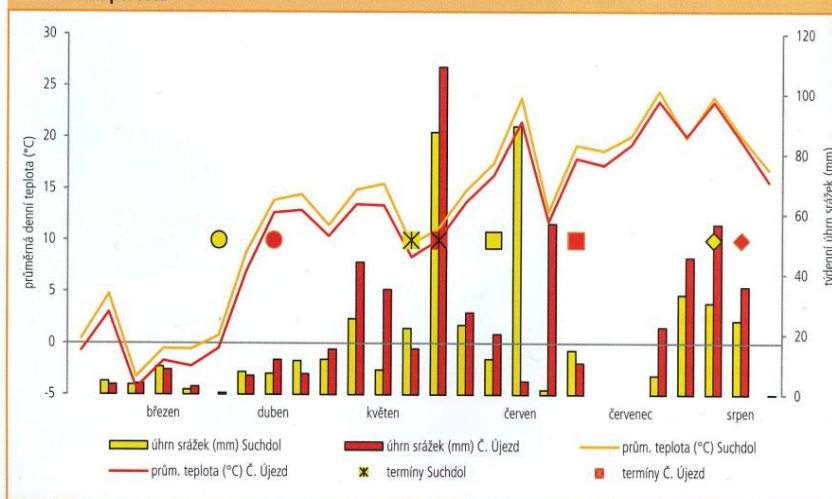
četem klasů do 500/m². V našich pokusech na variantách, které nebyly přímo hnojeny minerálními hnojivy, byl počet odnoží do 900/m². Vyšší počet odnoží byl stanoven v Červeném Újezdě. Půdy v Červeném Újezdě jsou studenější, jelikož jsou těžší a méně záhřevné. Ječmen byl proto delší dobu ve fázi odnožování a měl více času na tvorbu odnoží. Fukai (1995) uvádí, že doba trvání různých vývojových etap se velmi

liši v závislosti na průběhu počasí a úrodnosti půdy.

Počátek jarního období v roce 2014 zcela odpovídal známým teoretickým poznatkům vývoje jarního ječmene v první polovině vegetace. Počet odnoží korespondoval se systémem hnojení a podmínkami stanoviště. Nejvíce odnožoval ječmen na variantách s minerálním hnojením (v intervalu 2,9–3,5 odnoží/rostlinu), méně na variantách Kal a Hnůj (2,5–2,8 odnoží/rostlinu) a nejméně na Kontrolě (2,2–2,5 odnoží/rostlinu). Oproti Červenému Újezdu bylo méně odnoží v Suchdole s ohledem na větší výsušnost těchto půd.

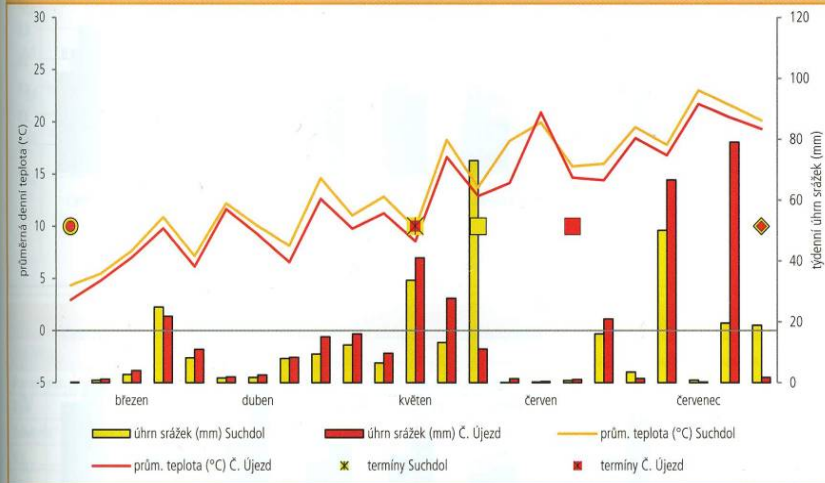


Jarní ječmen má sice poměrně krátkou vegetační dobu, avšak v průběhu jeho růstu jsou rozhodující údobí pro tvorbu jednotlivých výnosotvorných prvků a formování kvalitativních parametrů
 Foto Jindřich Černý

Graf 1 – Průměrné denní teploty a týdenní úhrny srážek v roce 2013 – symboly označují termíny setí, sklizně a hodnocení porostů




Graf 2 – Průměrné denní teploty a týdenní úhrny srážek v roce 2014 – symboly označují termíny setí, sklizně a hodnocení porostů



Výnos zrna

Výnos zrna sladovnického ječmene je ovlivňován řadou podmínek, které často působí ve složitých interakcích a mohou být příčinou rozdílné ročníkové reakce na daný faktor. Z výsledků je patrné, že výnosová odezva jarního ječmene je vyšší při přímé aplikaci minerálních hnojiv, menší výnos je na variantách s organickým hnojením a nejnižší na kontrolní nehnojené variantě. Na těchto zjištěních by nebylo nic překvapujícího a korespondují s výsledky z jiných pokusů. Stejně tak i fakt, že na relativně úrodnějších stanovištích (Suchdol) je vliv hnojení menší ve srovnání s méně úrodnými (Červený Újezd).

Při porovnání výsledků (graf 3) je však zřejmé, že v Červeném Újezdě byl v roce 2014 dosaženo vyššího výnosu oproti roku 2013, ale v Suchdole tomu bylo na hnojených variantách naopak. Zde je nezbytné posuzovat více faktorů, které ve výsledku dosažený výnos ovlivnily. Na stanovišti Suchdol na konci května 2014 byly přívalem srážky, které způsobily vý-

Tab. 3 – Termíny hodnocení porostů a doba vegetace

Agrotechnika (symbol v grafech 1 a 2)	2013				2014			
	Suchdol		Červený Újezd		Suchdol		Červený Újezd	
● Setí	8. 4.	*0	23. 4.	*0	3. 3.	*0	3. 3.	*0
★ Hodnocení počtu odnoží	31. 5.	*54	7. 6.	*46	30. 4.	*59	30. 4.	*59
■ Květení (ARR)	18. 6.	*72	9. 7.	*78	4. 6.	*94	19. 6.	*109
◆ Sklizeň	8. 8.	*123	12. 8.	*112	25. 7.	*145	28. 7.	*148

*dní od zasety



KOMPLETNÍ SYSTÉM VÝŽIVY A STIMULACE

PRO SILNÝ START A REGENERACI

vysoká dávka **P** a chelátový **Zn**



proauxinová **stimulace**
a dusík



SILNÁ KUKUŘICE

ZEASTIM®

AKCELERACE POROSTU



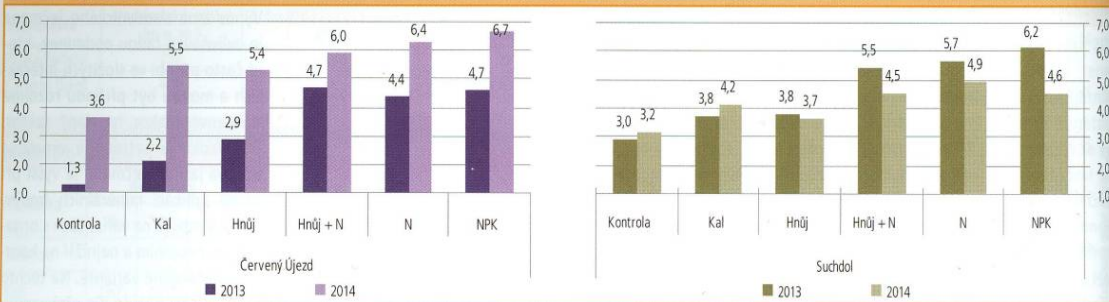
agro@chemapagro.cz

www.zlatasklizen.cz

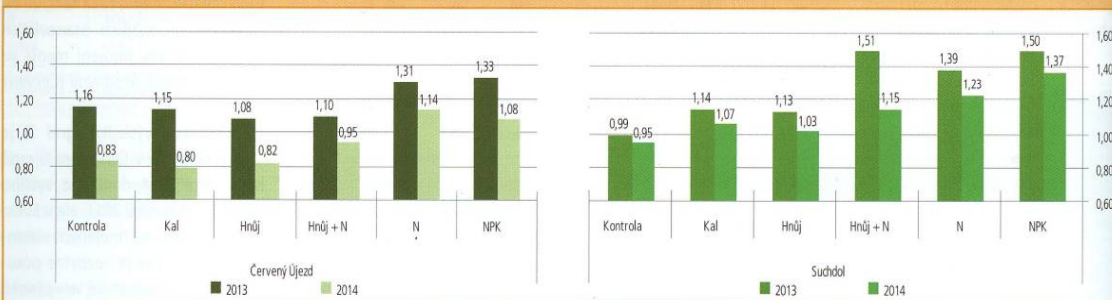


ZLATÁ
SKLIZEN

Graf 3 – Výnos zrna (t/ha)



Graf 4 – Obsah dusíku (%) v nadzemní biomase ve fázi kvetení



raznější pokles minerálního (zejména nitrátového) dusíku v půdě. Porost ječmene byl na tomto stanovišti již ve fázi kvetení a v průběhu června následovalo teplé období, kdy docházelo k urychlení tvorby zrna. Nedostatek minerálního dusíku v půdě, krátké období plnění zrna a menší obsah dusíku v rostlinách ve fázi kvetení tak ovlivnily výsledný výnos na těchto variantách. Z výsledků je zároveň patrné, že v roce 2014 byl na stanovišti Suchdol stanoven menší podíl předního zrna ve srovnání s rokem 2013 (tabulka 4). Na stanovišti Červený Újezd v roce 2014 k vyplavení minerálního dusíku nedošlo, jelikož porost kvetl až v průběhu června a poté následovalo chladnější období, byly tak příznivější podmínky pro tvorbu (plnění) zrna. Tvorba výnosu je závislá na přístupnosti dusíku v období po kvetení a současně na rychlosti průběhu fáze tvorby zrna.

Opačná situace byla zaznamenána na obou stanovištích v roce 2013. V Červeném Újezdě byl stanoven výrazný pokles obsahu minerálního dusíku v půdách již počátkem června po intenzivních srážkách a dále pak koncem června. V tomto termínu porost kvetl a následující období v čer-

venci se vyznačovalo vyššími teplotami. Obdobně jako v Suchdole v roce 2014 tak bylo kratší období tvorby zrna, což se projevilo na formování výnosu.

Počet zrn v klase a obsah dusíku během vegetace

Z výsledků je také patrné, že ve sledovaných letech se odlišovaly počty zrn v klasech (tab. 4 a 5). Průkazně nižší počet zrn v klase byl na stanovišti Suchdol v roce 2014 oproti roku 2013 na stejném stanovišti, ale také při srovnání se stanovištěm Červený Újezd. Mezi jednotlivými variantami se počty zrn v klase výrazně neodlišovaly, s výjimkou stanoviště Suchdol v roce 2014, kdy byl nižší počet zrn na variantách s minerálním hnojením, naopak nejvyšší byl na variantách Hnůj a Kontrola. Přesto však výsledný výnos zrna na těchto variantách byl nižší oproti minerálně hnojeným. To bylo způsobeno nižším obsahem dusíku v rostlinách v průběhu vegetace současně s menší tvorbou nadzemní biomasy. Rostliny v průběhu zrání znovu využívají (reutilizují) dusík krátkodobě uložený v listech a stonkách při vytváření generativních orgánů. Pokud má rostlina nízký obsah

dusíku v pletivech během vegetace a nastanou méně příznivé podmínky pro příjem dusíku z půdy (nedostatek minerálního dusíku v půdě, sucho apod.), nemůže naplnit předpokládaný výnosový potenciál.

Obsah dusíku v rostlinách stanovený během vegetace anorganickým rozbořením rostlin (ARR) v určitých fázích růstu je však často využíván jako kritérium předpovědi výnosu nebo kvalitativních ukazatelů. Naše výsledky

ale ukazují, že je nezbytné hodnocení provádět obezřetně a v širších souvislostech. Na obou stanovištích byl obsah dusíku v nadzemní biomase v době květu vyšší v roce 2013 ve srovnání s rokem 2014 (graf 4), a to i přesto, že období od zasetí do kvetení bylo v roce 2013 kratší.

Obsah dusíkatých látek v zrnu

Tento parametr se na sledovaných stanovištích vytvářel odlišně (graf

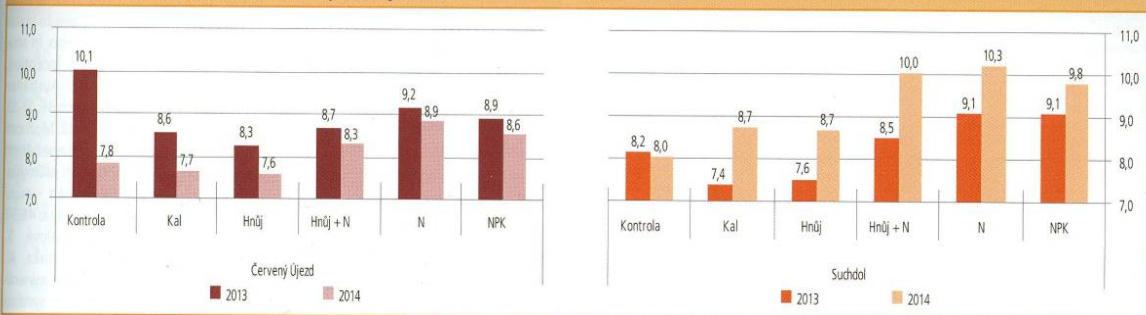


Období po kvetení je důležité z pohledu utváření kvantitativních i kvalitativních ukazatelů zrna

Foto Šárka Buráňová



Graf 5 – Obsah dusíkatých látek (%) v zrně jarního ječmene



Tab. 4 – Vybrané výnosotvorné prvky a kvalitativní ukazatele na stanovišti Suchdole

Parametr	Počet odnoží/m ²		Počet zrn/klas		Zrno nad 2,5 mm (%)	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Kontrola	373	744	21	18	96,5	92,5
Kal	880	845	23	15	96,6	95,5
Hnůj	896	904	23	18	97,2	95,5
Hnůj + N	1 770	1 019	22	16	97,0	95,9
N	1 872	917	23	16	96,7	95,0
NPK	1 808	1 027	22	14	96,9	96,1

5). V Suchdole byl vyšší obsah dusíku v zrně v roce 2014, a to na všech variantách s hnojením, neboť zde byl zřejmý vliv nižšího počtu zrn v klase, výnosu, a tím i nižšího zředovacího efektu a kratší doby ukládání asimilátů do zrna. Naopak v Červeném Újezdě byl v roce 2014 obsah dusíku v zrně nižší oproti roku 2013, ale na variantách s minerálním hnojením nebyly rozdíly statisticky průkazné. Jak již bylo uvedeno, na tomto stanovišti nebyl v roce 2014 minerální

dusík z půdy vyplaven a příjem kořeny byl zajišťován i v období po kvetení. Naopak pokles obsahu minerálního dusíku v půdě v důsledku přívalových dešťů v období plnění zrna v Červeném Újezdě v roce 2013 a v Suchdole v roce 2014 způsobil rychlejší dozrávání porostů, které je spojeno s vyšším obsahem dusíkatých látek v zrně. Na variantách Kal a Hnůj, přestože je zde pravidelně organické hnojivo aplikováno, třetím rokem po aplikaci hnojiv už

nedocházelo k dostatečnému uvolňování dusíku mineralizací a nedostatek příjmu dusíku se projevil na jeho obsahu v zrně. Obdobně to platí i pro kontrolní variantu, také především z důvodu vyššího výnosu v roce 2014.

Z výše uvedeného je zřejmé, že obsah dusíkatých látek v zrně je ovlivněn, spolu s výnosem, podmínkami prostředí, a to ve značné míře v období po kvetení. Mnohé výsledky polních pokusů ukazují, že pokud je po kvetení nedostatek dusíku v půdě, dochází k rychlejšímu stárnutí rostlin vlivem remobilizace N z asimilačních orgánů, což negativně ovlivňuje výnos zrna. Naopak nárůst příjmu dusíku z půdy po kvetení je často spojen se zvýšením výnosu zrna ječmene, a to i při nižší intenzitě dusíkaté výživy. Dochází k oddálení stárnutí, což u sladovnického ječmene vede i k příznivějšímu obsahu dusíkatých látek

v zrně. Někteří autoři uvádějí, že příjem dusíku po kvetení představuje až 50 % dusíku ve sklizeném zrně podle podmínek prostředí a přístupnosti dusíku z půdy.

Obsah dusíkatých látek v zrně je u sladovnického ječmene důležitý, především ve vztahu ke kvalitě sladu. Podle ČSN (46 1100-5) by měl být obsah dusíkatých látek v rozmezí 10–12 %, z pohledu technologie sladování je optimální obsah 10,5–11,7 %. Mnozí pěstitelé se obávají zvláště překročení horní hranice, proto jsou doporučení pro hnojení dusíkem střednější. V našich pokusech bylo přímo k jarnímu ječmeni aplikováno 70 kg N/ha (na variantách s minerálním hnojením), což přibližně koresponduje s odběrem dusíku porostem při zohlednění množství potenciálně mineralizovatelného dusíku na jednotlivých stanovištích. Jak je však z výsledků patrné, při

Nenecháme padnout Vaše obilniny!

Zabráníme polehnutí všech obilnin, zesílíme stéblo, zkrátíme porost a zmohutníme kořenový systém

Informace: 602 129 528

Tab. 5 – Vybrané výnosotvorné prvky a kvalitativní ukazatele na stanovišti Červený Újezd

Parametr	Počet odnoží/m ²		Počet zrn/klas		Zrno nad 2,5 mm (%)	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Rok	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Kontrola	821	676	18	24	93,9	97,2
Kal	874	924	20	24	92,6	97,1
Hnůj	1 562	885	19	24	93,3	96,6
Hnůj + N	1 792	940	21	25	96,1	91,4
N	1 909	1 304	22	24	93,9	93,7
NPK	2 357	1 204	21	22	96,9	93,1

této dávce dusíku byl výsledný obsah dusíkatých látek v zrnu poměrně nízký a většinou se pohyboval pod hranicí 10 %. Ječmene s nižším obsahem bílkovin (pod 10 %) jsou sice dostatečně extraktivní, ale s nízkou aktivitou enzymů. Tyto ječmene jsou hodnoceny jako sladařsky nevhodné, enzymaticky slabé, neboť je u nich obtížné dosáhnout požadovaných hodnot například relativního extraktu, množství rozpustného dusíku a podobně. Piva vyrobená z těchto sladů jsou málo pěňavá, vyznačují se nízkou stabilitou pěny a prázdnější chutí (Prokeš, 2000). Systém hnojení jarního sladovnického ječmene musí být tedy založen nejen na stanovení odpovídající

dávky dusíku, ale také musí být zohledněny podmínky stanoviště a důležitá je posouzení vývoje porostu na základě průběhu počasí. Jak je z výsledků patrné, právě u jarního ječmene má tento faktor významný vliv, neboť i krátké období méně příznivých podmínek pro příjem a využití živin či tvorbu výnosotvorných prvků se významně podílí na snížení výnosu a/nebo kvality produkce.

Závěr a doporučení

Dosažené výsledky ukazují, že na odlišných stanovištích v jednotlivých letech má stejný systém hnojení různý vliv na výnosotvorné prvky a následný výnos a kvalitativní parametry zrna jarního sladovnického

ječmene. Přestože některé pozemky zemědělského podniku jsou lokalizovány relativně v malé vzdálenosti od sebe, je nezbytné průběh vegetace hodnotit v přímém vztahu k danému pozemku. Pokud je na konkrétním stanovišti zjištěn pokles obsahu minerálního dusíku v půdě a nastanou horší podmínky pro jeho příjem, je vhodné řešit výživný stav dusíkem ještě v průběhu druhé poloviny vegetace. *

Použitá literatura

Fukai, T. S., 1995: Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in southeast Queensland. I. Light inception crop growth and grain yield. *Australian Journal of Agricultural Research* 46: 17-33
 Hřivna, L., Vavroušová, P., 2009: Možnost ovlivnění výživného stavu ječmene během vegetace při uplatnění tuhých průmyslových hnojiv. *Sladovnický ječmen – regulace tvorby výnosu a kvality*, Praha, 48-50
 Kovařík, J., Černý, J., Šejbalová, Š., Holečková, Z., Mitura, K., Lipínská, K., Balik, J., 2014: Dynamika obsahu minerálního dusíku v půdě při různých systémech hnojení. *Racionální použití hnojiv* 27. 11. 2014, Praha. ČZU v Praze. s. 92-95.
 Prokeš, J., 2000: Technologický význam dusíkatých látek v ječmeni a sladu. *Kvasný průmysl* 46: 277-279.
 Šejbalová, Š., Černý, J., Kulhánek, M., Vašák, F., Balik, J., 2013: Hodnocení dynamiky minerálního dusíku v půdě při dlouhodobé aplikaci minerálních a organických hnojiv. *Racionální použití hnojiv* 28. 11. 2013, Praha. ČZU v Praze, s. 149-152.
 Šejbalová, Š., Černý, J., Vašák, F., Kulhánek, M., Balik, J., 2014: Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment. *Plant, Soil and Environment*, 60: 291-296.
 Váňová, M., Klem, K., 2009: Základní prvky pěstební technologie ovlivňující výnos a kvalitu jarního ječmene určeného pro sladařský průmysl. *Sladovnický ječmen – regulace tvorby výnosu a kvality*, Praha, 15-18.

Príspevek byl zpracován za podpory specifického výzkumu S grant MŠMT ČR a grantových projektů SGS FAPPZ ČZU v Praze č. SV14-18-21140 a SV14-22-21140.

Oponentský posudek vypracoval Ing. Jan Haberle, CSc., z Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i., Praha-Ruzyně.

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.,

Ing. Šárka Buráňová,

Ing. Ondřej Sedlár, Ph.D.,

Ing. Jakub Kovářik,

Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.,

Bc. Jiří Mužík,

Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, KAVR

Nitrofenoláty – osvědčený podpůrný prostředek

inzerce

V průběhu vegetace se dostávají rostliny do stavu, kdy pozitivně reagují na aplikaci nitrofenolátů. Proto je tato skupina již dlouhé roky používána pro podporu tvorby výnosů řady zemědělských plodin.

Působení na rostliny

Princip působení není přesně znám, spíše je uváděna řada důsledků aplikace (tvorba ligninu, zrychlení přírůstku biomasy, s tím související regenerace rostlin apod.). Tyto projevy jsou spojovány s omezením oxidativní fosforylace, zvýšením tvorby etylenu, zpomalením odbourávání auxinů, či působením elicitačním.



Při správném použití přináší pomocný rostlinný přípravek N-Fenol mix poměrně levně a na aplikaci nenáročně stabilní zvýšení výnosu

Foto archiv firmy

Nejlepších výsledků při použití je dosažováno, pokud mají rostliny k dispozici dostatek vody a živin, které potřebují k pokrytí zvýšené intenzity metabolismu. Ale toto je obecné pravidlo i pro přípravky na jiné bázi – pokud má rostlina zvýšit tvorbu biomasy, musí mít vodu a živiny. V opačném případě dojde k vyčerpání rostlin a nástupu nepřiměřeného stresu.

Přínos aplikace

Výsledky pokusů ukazují, jak přípravek N-FENOL MIX působí na výnos pšenice ozimé a řepky ozimé. Výrazný efekt se projevuje především

5.4

Buráňová, Š., Černý, J., Mitura, K., Lipińska, K. J., Kovářík, J., Balík, J. (2016). Effect of organic and mineral fertilizers on yield parameters and quality of wheat grain. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 47 (2). 47-53

V článku byly porovnávány dva pokusné roky – 2013 a 2014 na stanovištích Lukavec a Suchdol. U pšenice ozimé byl vyhodnocen výnos zrna (t/ha) a hmotnost tisíce zrn (g), z kvalitativních parametrů pak objemová hmotnost (g/l), dusíkaté látky v zrně (%) a číslo poklesu (s).



EFFECT OF ORGANIC AND MINERAL FERTILIZERS ON YIELD PARAMETERS AND QUALITY OF WHEAT GRAIN*

Š. Buráňová¹, J. Černý¹, K. Mitura², K.J. Lipińska², J. Kovářík¹, J. Balík¹

¹*Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Agrobiological Sciences, Prague, Czech Republic*

²*University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz, Faculty of Agriculture and Biotechnology, Bydgoszcz, Poland*

The aim of this study was to evaluate winter wheat grain qualitative and yield parameters after the application of different organic and mineral fertilizers at two sites in the Czech Republic (S1 – Lukavec, S2 – Prague-Suchbát). For the purpose of this paper grain yield (GY, t ha⁻¹), thousand kernel weight (TKW, g), bulk density (BD, g l⁻¹), grain crude protein content (CP, %), and falling number (FN, s) were determined with regard to the CSN 461100-2 (2001) standard for food wheat. Significantly highest values of GY and BD at both sites and of CP at S2 were observed after the use of nitrogen in mineral form. At S1, significantly highest values of FN were obtained after the use of mineral fertilizers in combination with straw. The required limit of BD for food wheat was met for all fertilization treatments, while that of CP only at S2 by treatments with mineral nitrogen fertilizers. At S2, a strong correlation between all evaluated traits was registered. Low correlation was found at S1 between TKW and other evaluated traits.

grain quality; nitrogen; wheat; fertilizer; protein content; bulk density



doi: 10.1515/sab-2016-0008

Received for publication on July 14, 2015

Accepted for publication on February 9, 2016

INTRODUCTION

Nitrogen is the most important element to achieve stable high grain yields (Delegu et al., 1998; Shi et al., 2012) and it is essential for improving grain quality of wheat (Hussain et al., 1996; McKenzie et al., 2005; Pan et al., 2006). In 2014 wheat was grown at 34% of the total sown area of the Czech Republic (CSO, 2014). Both high yield and good and stable quality are important features in today's wheat market (López-Bellido et al., 2001; Flaete et al., 2005). Wheat quality is influenced by the interaction of a number of factors, including cultivar, soil, climate, cropping practices, and grain storage conditions. The performance of many qualitative characteristics depends greatly on environmental conditions, which result in different expression of grain quality from site to site (López-Bellido et al., 2001; Harrabti et al., 2003). Predictions of grain quality for the prospective wheat harvest would be

of considerable value to grain buyers in aiding purchasing decisions, and to farmers to help optimize late-season agronomy (Smith, Gooding, 1999). Grain protein content, perhaps the most important quality feature for wheat, is known to be influenced by climatic parameters and N availability, cultivar, nitrogen fertilizer rate, time of nitrogen application, residual soil nitrogen, and available moisture during grain filling. Nitrogen application combined with a better distribution of N during the wheat growth cycle significantly improves grain protein content (Abad et al., 2004; Garrido-Lestache et al., 2004; Ma et al., 2009). Relationships between qualitative parameters appear to be influenced by climatic conditions during grain filling. Thus, depending on temperatures and water input during this phase, correlation coefficients between some qualitative parameters, such as thousand kernel weight (TKW) and protein content (CP), can be either positive, negative or close to zero (Harrabti et al., 2003).

* Supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic (S grant).

Table 1. Characteristics of experimental sites

Site	S1 – Lukavec	S2 – Prague-Suchdol
Location	49°33'23"N, 14°58'39"E	50°7'40"N, 14°22'33"E
Altitude (m a.s.l.)	610	286
Average annual temperature (°C)	7.7	9.1
Average annual precipitation (mm)	666	495
Soil type	Cambisol	Haplic Chernozem
Soil texture	sandy loam	silt loam
pH (KCl)	4.89	7.22
P Mehlich 3 (mg kg ⁻¹)	160	110
K Mehlich 3 (mg kg ⁻¹)	220	246
Mg Mehlich 3 (mg kg ⁻¹)	98	194
Ca Mehlich 3 (mg kg ⁻¹)	1393	7509

Table 2. Rates of nutrients N-P-K (kg ha⁻¹) during crop rotation cycle

Treatment	Fertilization	Potatoes	Winter wheat	Spring barley
1	Control	–	–	–
2	SS ¹	330-207-44	–	–
3	FYM ¹	330-102-307	–	–
4	N ²	120-0-0	140-0-0	70-0-0
5	NPK ²	120-30-100	140-30-100	70-30-100
6	N ² + ST ^{1,3}	138-6-47	140-0-0	70-0-0

SS = sewage sludge, FYM = farmyard manure, N = N in mineral fertilizers, ST = spring barley straw

¹P and K in organic fertilizers – average dose taking into account nutrient content in organic fertilizers

²mineral fertilizers: N – calcium ammonium nitrate (27% N), P – triple super phosphate (21% P), K – potassium chloride (50% K)

³5 t ha⁻¹ spring barley straw

The objective of this paper was to evaluate the influence of different organic and mineral fertilizers on yield and qualitative parameters of winter wheat grain and to investigate the relationship between these traits.

MATERIAL AND METHODS

The two-year experiment was established at two sites of the Czech Republic with different soil and climatic conditions: S1 (Lukavec) and S2 (Prague-Suchdol) (Table 1). A simple rotation included three crops in the order: potatoes, winter wheat, spring barley (each year all crops were grown). Six treatments were evaluated: (1) control, (2) sewage sludge (SS), (3) farmyard manure (FYM), (4) N in mineral fertilizers (N), (5) NPK, and (6) N in mineral fertilizers + spring barley straw (N + ST). For mineral nitrogen fertilization, calcium ammonium nitrate was used. Organic fertilizers were applied only to the potatoes in the crop rotation. The dose of nitrogen was for winter wheat divided into two parts (regeneration and production fertilization). The amount of applied

nutrients is given in Table 2. The area of experimental plot was 60 m². The grown variety of winter wheat was Alana, which is characterized as a late variety with baking quality A.

Data were collected in the years 2013 and 2014. Dry matter grain yield (GY, t ha⁻¹), thousand kernel weight (TKW, g), bulk density (BD, g l⁻¹), grain crude protein content (CP, %), and falling number (FN, s) were determined. All the qualitative parameters were assessed using two random samples from each treatment. Thousand kernel weight was calculated 2 × 500 seeds using an electronic calculator (DIPOS, SPJZD Libun, Czech Republic) and the seeds were weighted with a prescribed accuracy. Bulk density was determined using a laboratory meter model 1938 (Meopta, Přeov, Czech Republic). Grain was milled using the device PSY MP40 (Mezos, Hradec Králové, Czech Republic) with 0.8 mm sieve size. Afterwards falling number was determined on a device Falling number 1400 (Perten, Hägesten, Sweden) (C S N ISO 3 0 9 3, 2007). Grain samples for determination of total nitrogen were homogenized on a laboratory cutting mill SM 100 (Retsch, Haan, Germany) and measured following the Kjeldahl

Table 3. Dry matter grain yield (GY, t ha⁻¹)

	Site S1 – Lukavec		Site S2 – Prague-Suchdol	
	2013	2014	2013	2014
Control	1.33	3.10	4.66	3.90
SS	3.09	5.13	7.05	5.50
FYM	2.55	5.22	6.05	5.25
N	4.76	7.10	7.96	6.29
NPK	4.88	7.46	7.20	6.49
N + ST	5.22	8.82	7.47	6.71

SS = sewage sludge, FYM = farmyard manure, N = N in mineral fertilizers, NPK = calcium ammonium nitrate + triple super phosphate + potassium chloride, ST = spring barley straw

Table 4. Thousand kernel weight (TKW, g)

	Site S1 – Lukavec				Site S2 – Prague-Suchdol			
	2013	CV	2014	CV	2013	CV	2014	CV
Control	43.54 ^a	1.31	48.70 ^{ab}	0.67	51.36 ^{ab}	3.52	51.19 ^a	1.15
SS	45.28 ^b	1.19	49.81 ^b	0.44	53.86 ^{bc}	2.12	54.34 ^b	0.98
FYM	44.56 ^{ab}	1.18	48.78 ^{ab}	0.10	53.72 ^{bc}	1.23	54.69 ^b	0.50
N	43.57 ^a	0.70	48.98 ^{ab}	0.65	56.01 ^c	1.12	55.93 ^b	1.80
NPK	45.15 ^b	0.97	47.98 ^a	1.77	54.97 ^c	1.96	56.04 ^b	1.51
N + ST	44.34 ^{ab}	0.88	51.04 ^c	0.83	54.22 ^{abc}	1.53	55.22 ^b	1.24

CV = coefficient of variation, SS = sewage sludge, FYM = farmyard manure, N = N in mineral fertilizers, NPK = calcium ammonium nitrate + triple super phosphate + potassium chloride, ST = spring barley straw

^{a-c} values in the column with the same letter were not significantly different at $P < 0.05$

Table 5. Bulk density (BD, g l⁻¹)

	Site S1 – Lukavec				Site S2 – Prague-Suchdol			
	2013	CV	2014	CV	2013	CV	2014	CV
Control	784.5 ^a	4.86	777.7 ^a	2.08	755.8^a	7.83	759.5^a	4.84
SS	785.4 ^a	2.61	768.9 ^b	1.70	769.4 ^b	4.20	780.4 ^b	3.57
FYM	787.3 ^a	0.71	773.4 ^c	1.62	764.0 ^{ab}	4.45	781.8 ^b	3.35
N	797.5 ^b	3.60	785.1 ^d	1.02	783.8 ^c	1.16	791.0 ^c	2.19
NPK	793.2 ^b	2.46	784.7 ^d	3.07	778.8 ^c	1.18	792.4 ^c	2.33
N+ST	804.8 ^b	0.57	796.1 ^c	0.62	778.3 ^c	2.02	791.3 ^c	6.64

CV = coefficient of variation, SS = sewage sludge, FYM = farmyard manure, N = N in mineral fertilizers, NPK = calcium ammonium nitrate + triple super phosphate + potassium chloride, ST = spring barley straw

values of BD lower than 760 g l⁻¹ are bolded

^{a-d} values in the column with the same letter were not significantly different at $P < 0.05$

method on a device VAPODEST 50s (Gerhardt GmbH & Co. KG, Königswinter, Germany). The observed nitrogen content was multiplied by a coefficient (for baking wheat 5.7) to obtain the crude protein content in the grain (CSN 461011-18, 2003).

Statistical evaluation of the results was performed using STATISTICA software package (Version 12, 2012) with the Main effects ANOVA followed by the Tukey's test at the level of significance $P < 0.05$. Coefficients of variability (CV) were calculated as the

ratio of the standard deviation to the mean. Coefficients of correlation (r) between the assessed traits were presented in a correlation matrix both for sites and years.

RESULTS

The highest GY values were after the application of mineral fertilizers (5.0 t ha⁻¹ at S1 and 7.5 t ha⁻¹ at S2 in 2013, and 7.8 t ha⁻¹ at S1 and 6.2 t ha⁻¹ at S2

Table 6. Protein content (CP, %)

	Site S1 – Lukavec				Site S2 – Prague-Suchdol			
	2013	CV	2014	CV	2013	CV	2014	CV
Control	8.14^a	1.07	7.49^a	0.76	9.90^a	1.52	9.47^a	1.20
SS	8.62^a	2.00	7.05^b	0.00	12.00 ^{bc}	2.40	11.49^b	0.00
FYM	9.52^b	0.12	7.05^b	0.81	10.28^a	0.30	10.84^b	2.63
N	9.72^b	1.90	8.14^c	0.70	11.87 ^b	1.67	12.44 ^c	0.92
NPK	8.47^a	1.37	7.92^c	2.16	12.39 ^{bc}	0.27	12.40 ^c	0.46
N+ST	9.60^b	2.23	8.99^d	1.90	12.56 ^c	1.06	12.28 ^c	2.32

CV = coefficient of variation, SS = sewage sludge, FYM = farmyard manure, N = N in mineral fertilizers, NPK = calcium ammonium nitrate + triple super phosphate + potassium chloride, ST = spring barley straw

values of CP lower than 11.5% are bolded

^{a-d}values in the column with the same letter were not significantly different at $P < 0.05$

Table 7. Falling number (FN, s)

	Site S1 – Lukavec				Site S2 – Prague-Suchdol			
	2013	CV	2014	CV	2013	CV	2014	CV
Control	261 ^a	2.44	322 ^{ab}	2.80	246 ^a	2.30	242 ^a	4.55
SS	307 ^b	2.08	314 ^a	5.41	273 ^b	2.34	275 ^{ab}	12.02
FYM	315 ^{bc}	1.12	336 ^{ab}	3.87	264 ^{ab}	0.00	266 ^{ac}	0.38
N	318 ^{bc}	1.11	357 ^{abc}	0.84	271 ^b	1.31	298 ^{ab}	4.37
NPK	310 ^b	0.91	365 ^b	1.37	270 ^b	2.62	333 ^{bc}	5.41
N+ST	334 ^c	1.91	393 ^c	3.31	270 ^b	0.26	339 ^b	0.88

CV = coefficient of variation, SS = sewage sludge, FYM = farmyard manure, N = N in mineral fertilizers, NPK = calcium ammonium nitrate + triple super phosphate + potassium chloride, ST = spring barley straw

values of FN lower than 220 s are bolded

^{a-c}values in the column with the same letter were not significantly different at $P < 0.05$

Table 8. Trait correlation

Site, year	Trait	GY	TKW	BD	CP
S1 2013	TKW	0.22	–	–	–
	BD	0.87	–0.15	–	–
	CP	0.52	–0.22	0.65	–
	FN	0.82	0.35	0.73	0.79
S1 2014	TKW	0.40	–	–	–
	BD	0.79	0.38	–	–
	CP	0.80	0.50	0.98	–
	FN	0.91	0.37	0.95	0.92
S2 2013	TKW	0.94	–	–	–
	BD	0.96	0.94	–	–
	CP	0.89	0.72	0.87	–
	FN	0.93	0.86	0.81	0.83
S2 2014	TKW	0.93	–	–	–
	BD	0.98	0.99	–	–
	CP	0.98	0.95	0.97	–
	FN	0.93	0.78	0.86	0.88

S1 = site Lukavec, S2 = site Prague-Suchdol, GY = dry matter grain yield, TKW = thousand kernel weight, BD = bulk density, CP = grain crude protein content, FN = falling number

bolded correlation coefficients (r) were significant at $P < 0.05$

in 2014 (Table 3). The lowest average yields in the control treatment at S1 were 1.3 t ha⁻¹ in 2013 and 3.1 t ha⁻¹ in 2014, and at S2 4.7 t ha⁻¹ in 2013 and 3.7 t ha⁻¹ in 2014. Thousand kernel weight is one of the yield parameters. The lowest values of TKW at S2 were observed in the control treatment, whereas mineral fertilized treatments reached the highest values (Table 4). Higher values were achieved at S2 than at S1. At S1, the highest values were found for SS treatment in 2013 and for N + ST treatment in 2014. The limit of bulk density for food wheat is 760 g l⁻¹ according to the standard C S N 4 6 1 1 0 0 - 2 (2001). The required limit was not reached at S2 in control treatment in both years. The significantly highest values were observed after mineral nitrogen fertilization at both sites. Values of BD were higher at S1 if compared to S2 (Table 5). According to the standard C S N 4 6 1 1 0 0 - 2 (2001), the minimal requirement of CP for food wheat is 11.5%. This limit was not achieved by any treatment at S1 and by control treatment and FYM at S2 in both years and by SS treatment in 2014. The highest values for CP after the application of nitrogen in mineral form

were determined at S2 (Table 6). The lowest values of FN were observed in control treatment at both sites and in SS treatment at S1 in 2014 (Table 7). All treatments exceeded the limit for falling number, which is 220 s. At S1, the highest values for FN were obtained after mineral fertilizers in combination with straw. A strong correlation between all traits was found at S2 (Table 8). At S1, the correlation between TKW and other traits was low. At this site a strong correlation was found between GY and BD, FN, between FN and BD, and between FN and CP in 2013 and between GY and BD, CP, FN, between BD and CP, FN, and between FN and CP in 2014.

DISCUSSION

The highest influence of nitrogen fertilizer application was observed at S1, where the average yield for N + ST treatment was higher by about 292% in 2013 and 185% in 2014 in comparison to control. Similarly, as in the study with barley of Šhejbalová et al.

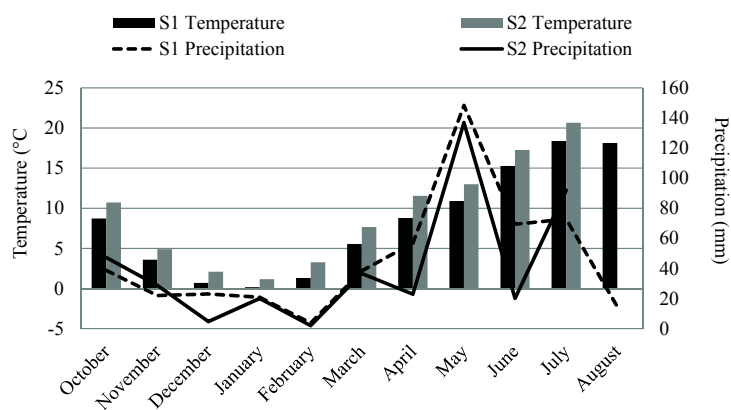


Fig. 1. Average precipitation (mm) and average air temperature (°C) in the growing season of winter wheat 2012/2013 at S1 and S2 location

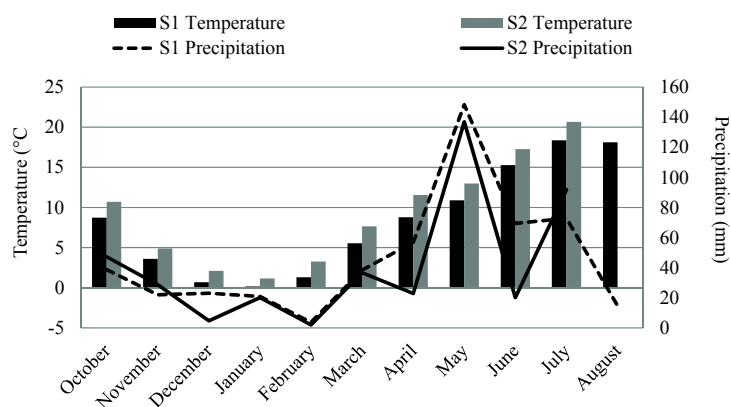


Fig. 2. Average precipitation (mm), average air temperature (°C) in the growing season of winter wheat 2013/2014 at S1 and S2 location

(2014), the present experiment confirmed a tendency of yield increases at the low fertile location after mineral nitrogen application. Similar tendency of yield increases after mineral nitrogen application on the low fertile location in this experiment with barley were obtained (Shejbalová et al., 2014). Thousand kernel weight is greatly determined by climatic conditions, particularly high temperature during the final phase of grain filling can negatively affect this yield parameter (López-Bellido et al., 1998; Harrabti et al., 2003), which may explain why there were high differences between years at S1. At S1, the average temperature in July 2013 was 19.1 °C (Fig. 1), in this year lower values of TKW were observed. The average temperature in July 2014 was 18.4 °C (Fig. 2), which resulted in higher levels of TKW at this site. Significantly higher values of BD were registered at both sites after the application of mineral fertilizers compared to organic fertilizers and control treatment, and exhibited highly significant positive correlation with grain yield. López-Bellido et al. (1998) arrived to the same conclusion. The highest values of CP after the application of nitrogen in mineral form were obtained at S2. Kozlovský et al. (2009) achieved high values of CP after application of 150 kg N ha⁻¹ in mineral form, which is in line with our experiment. Similarly, Ducsay, Ložek (2004) reported that nitrogen fertilizing to the level of 140 kg N ha⁻¹ positively influenced formation of CP with the highest increment. The minimal value of the N content for baking wheat for any of the treatments was achieved at S1, which is assumed to be caused by the low natural fertility of this location. At S2, similar low values of CP were observed in previous years 1997–2012 (Buráňová et al., 2015). Values of FN highly differed between years and sites, which is confirmed by the findings of Kozlovský et al. (2010) stating that FN is highly influenced by site conditions and year. In our experiment, the correlations between traits were mostly high positive. Only in 2013 at S1 the correlations between BD and TKW and between CP and TKW were slightly negative. These results are in contradiction with the results of Kučerová (2005) proving in an experiment with winter wheat grain that high baking quality of grain is negatively correlated with grain yield. Similarly, as the study by Wang (2008), the present study did not reveal a clear correlation between FN and TKW, however there was a positive relation of CP to FN.

CONCLUSION

The results obtained in this study demonstrate that N treatments markedly affect grain yield and qualitative parameters of winter wheat. At both sites the highest grain yields were achieved in treatments with mineral nitrogen. At S2, if compared to S1, higher values of

thousand kernel weight were found. At both sites the highest values of thousand kernel weight were found for treatments with mineral nitrogen, at S1 also for the sewage sludge treatment. The highest bulk density values were observed after mineral nitrogen fertilizing if compared to organic fertilizing and control treatment. Sufficient values of protein content were reached only at S2 for treatments with mineral fertilizers and in 2013 for sewage sludge treatment. At S1, all the treatments reached the required limit for food wheat. At S2, a high correlation between all parameters was found. More balanced results between years were detected at S2 than at S1.

REFERENCES

- Abad A, Lloveras J, Michelena A (2004): Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 87, 257–269. doi: 10.1016/j.fcr.2003.11.007.
- Buráňová Š, Černý J, Kulhánek M, Vašák F, Balík J (2015): Influence of mineral and organic fertilizers on yield and nitrogen efficiency of winter wheat. *International Journal of Plant Production*, 9, 257–271.
- CSN 461100-2 (2001): Cereals food – Part 2: Food wheat. Czech Standards Institute, Prague. (in Czech)
- CSN 461011-18 (2003): Testing of cereals, pulses and oilseeds - Part 18: Testing of cereals - Determination of nitrogen content. Czech Standards Institute, Prague. (in Czech)
- CSN ISO 3093 (2007): Wheat, rye and respective flours, durum wheat and durum wheat semolina – Determination of the falling number according to Hagberg-Perten, Czech Standards Institute, Prague. (in Czech)
- CSO (2014): Development of areas and a first estimate of harvest. Czech Statistical Office, Prague. (in Czech)
- Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N, Falcis DD, Maggiore T, Stanca AM (1998): Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9, 11–20. doi: 10.1016/S1161-0301(98)00019-7.
- Ducsay L, Ložek O (2004): Effect of topdressing with nitrogen on the yield and quality of winter wheat grain. *Plant, Soil and Environment*, 50, 309–314.
- Flaete NES, Hollung K, Ruud L, Sogn T, Faergestad EM, Skarpeid HJ, Magnus EM, Uhlen AK (2005): Combined nitrogen and sulphur fertilisation and its effect on wheat quality and protein composition measured by SE-FPLC and proteomics. *Journal of Cereal Science*, 41, 357–369. doi: 10.1016/j.jcs.2005.01.003.
- Garrido-Lestache E, López-Bellido RJ, López-Bellido L (2004): Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 85, 213–236. doi:10.1016/S0378-4290(03)00167-9.

- Hussain G, Al-Jaloud AA, Karimulla S (1996): Effect of treated effluent irrigation and nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of wheat. *Agricultural Water Management*, 30, 175–184. doi: 10.1016/0378-3774(95)01206-0.
- Kozlovský O, Balík J, Černý J, Kulhánek M, Kos M, Prášilová M (2009): Influence of nitrogen fertilizer injection (CULTAN) on yield, yield components formation and quality of winter wheat grain. *Plant, Soil and Environment*, 55, 536–543.
- Kozlovský O, Balík J, Sedlář O, Černý J, Kulhánek M (2010): The impact of controlled uptake long term ammonium nutrition on winter wheat yield and quality of grain. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 41, 2–7.
- Kučerová J (2005): The effect of sites and years on the technological quality of winter wheat grain. *Plant, Soil and Environment*, 51, 101–109.
- López-Bellido L, Fuentes M, López-Garrido FJ (1998): Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 57, 265–276. doi: 10.1016/S0378-4290(97)00137-8.
- López-Bellido L, López-Bellido RJ, Castillo JE, López-Bellido FJ (2001): Effects of long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on bread-making quality of hard red spring wheat. *Field Crops Research*, 72, 197–210. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00177-0.
- Ma D, Guo T, Wang Z, Wang C, Zhu Y, Wang Y (2009): Influence of nitrogen fertilizer application rate on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) flour quality and Chinese noodle quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89, 1213–1220. doi: 10.1002/jsfa.3578.
- McKenzie RH, Middleton AB, Bremer E (2005): Fertilization, seeding date, and seeding rate for malting barley yield and quality in southern Alberta. *Canadian Journal of Plant Science*, 85, 603–614. doi: 10.4141/P04-152.
- Pan J, Zhu Y, Jiang D, Dai T, Li Y, Cao W (2006): Modelling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 97, 322–336. doi: 10.1016/j.fcr.2005.11.006.
- Rharrabti Y, Villegas D, Royo C, Martos-Núñez V, García del Moral LF (2003): Durum wheat quality in Mediterranean environments: II. Influence of climatic variables and relationships between quality parameters. *Field Crops Research*, 80, 133–140. doi: 10.1016/S0378-4290(02)00177-6.
- Shejbalová Š, Černý J, Vašák F, Kulhánek M, Balík J (2014): Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment. *Plant, Soil and Environment*, 60, 291–296.
- Shi Z, Li D, Jing Q, Cai J, Jiang D, Cao W, Dai T (2012): Effects of nitrogen applications on soil nitrogen balance and nitrogen utilization of winter wheat in a rice-wheat rotation. *Field Crops Research*, 127, 241–247. doi: 10.1016/j.fcr.2011.11.025.
- Smith GP, Gooding MJ (1999): Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 159–170. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00020-9.
- Wang J, Pawelzik E, Weinert J, Zhao Q, Wolf GA (2008): Factors influencing falling number in winter wheat. *European Food Research and Technology*, 226, 1365–1371. doi: 10.1007/s00217-007-0666-0.

Corresponding Author:

Ing. Šárka Buránová, Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources, Department of Agro-Environmental Chemistry and Plant Nutrition, Kamýcká 129, 165 21 Prague 6-Suchdol, Czech Republic, phone: +420 224 382 816, e-mail: buranova@af.czu.cz

6. SUMÁRNÍ DISKUZE

6.1 Pšenice ozimá

6.1.1 Výnos zrna

Výnos zrna byl významně ovlivněn jednotlivými variantami hnojení na všech sledovaných stanovištích. Varianty s minerálním dusíkem dosahovaly vyšších výnosů ve srovnání s organicky hnojenými variantami i nehnojenou kontrolou. Statisticky průkazné rozdíly mezi těmito variantami byly zjištěny na stanovišti Lukavec, tedy na lokalitě s horšími půdně-klimatickými podmínkami (kambizem). Nejvyšších výnosů dosahovalo minerální hnojení dusíkem, fosforem a draslíkem na variantě NPK, průměrný výnos zde činil 6,31 t/ha, což bylo o 144 % více, než na nehnojené kontrole (2,59 t/ha). Na úrodnějším Suchdole, kde byl dusík pšenicí odebrán spíše z půdní zásoby, byl zaznamenán nejvyšší průměrný výnos 6,13 t/ha také na variantě NPK, což bylo o 39 % více ve srovnání s kontrolní variantou (4,42 t/ha). Významně větší vliv dusíkatého hnojení na výnos na méně úrodném stanovišti byl způsoben vyšším využitím dusíku přímo aplikovaného v hnojivech, než je tomu na úrodných stanovištích, kde k tvorbě výnosu přispívá především dusík z půdní zásoby. Vaněk et al. (2001) uvádí, že na úrodných půdách se více uplatňuje hnojení v obnově půdní úrodnosti a v udržení stability výnosů a kvality produkce.

Při porovnání výnosů organicky hnojených variant je u pšenice ozimé zřejmé, že statisticky průkazně vyšších výnosů na Lukavci dosahovala v porovnání s variantou hnůj varianta kal: 4,94 t/ha (o 28 % více než varianta hnůj). Na Suchdole byly rozdíly ve výnosech mezi oběma variantami statisticky neprůkazné, výnos na variantě kal (5,38 t/ha) zde byl o 12 % vyšší než na variantě hnůj.

Statisticky průkazně nejvyšší sklizňový index, tedy parametr vyjadřující podíl výnosu zrna a součtu výnosu hlavního a vedlejšího produktu, byl u pšenice na stanovišti Lukavec zjištěn na variantě s aplikací čistírenského kalu (57,9 %), což je o 10 % více než u nehnojené kontroly. Průměrný sklizňový index na této lokalitě u variant s minerálním hnojením činil 55 %. Oproti tomu na Suchdole byl nejvyšší sklizňový index zaznamenán u nehnojené kontrolní varianty (59,3 %). U variant s minerálním dusíkem tvořil průměrný sklizňový index 56 %, u organicky hnojených 57 %.

Hejzman et al. (2012) v dlouhodobém pokuse s ozimou pšenicí (1955 – 2006) poukazují na vysoké výnosy nehnojené kontrolní varianty na úrodných stanovištích, které byly v posledních sledovaných letech více než 5 t/ha. Připisují to kombinaci minerálně bohatých geologických

substrátů, které spolu s vhodnými klimatickými podmínkami vytváří přirozeně úrodné půdy vhodné pro produkci ozimé pšenice. Tuto skutečnost dokládají i naše výsledky, neboť výnos zrna pšenice nehnojené kontroly za celé sledované období let 1997 – 2012 byl na Suchdole (řepařská výrobní oblast) o 1,83 t/ha vyšší než na Lukavci (bramborářská výrobní oblast). Také pokusy ÚKZÚZ s různou intenzitou hnojení potvrzují, že v horších podmínkách bramborářské oblasti byla výrobnost nižší, ale efektivnost hnojení minerálními hnojivy výrazně vyšší než v oblasti řepařské (Kotvová, 2007).

Na Suchdole je však limitujícím faktorem množství srážek (495 mm), které je podstatně nižší než na výše položeném Lukavci (666 mm), a které vedlo k celkově nižšímu průměrnému výnosu pšenice na minerálně hnojených variantách. Ke stejnému závěru došli v pokusech s hnojením ozimé pšenice i Hlisnikovský et al. (2015). Shledávají také do budoucna, vzhledem k předpokládanému zvyšujícímu se nedostatku vody, stanoviště s vyšší nadmořskou výškou a tudíž i vyšším úhrnem srážek jako perspektivní pro produkci pšenice, neboť zvláště v extrémně suchých letech budou schopna zajistit stabilní výnosy, na rozdíl od níže položených, a tedy srážkově slabších, oblastí.

Při podrobnějším hodnocení sklizňových let 2013 a 2014 byly zaznamenány velké rozdíly ve výnose a výnosotvorných parametrech u pšenice ozimé na stanovišti Lukavec. Nejvyšší výnos zde byl v obou letech zjištěn na variantě dusíku se slámou, kde nárůst výnosu v roce 2014 činil 3,6 t/ha oproti roku 2013. Vyšší průměrná teplota a vyšší úhrn srážek zkrátily období plnění zrna v roce 2013 a zapříčinily snížení HTS. Jako výnosově slabý zhodnotili rok 2013 na lokalitě Lukavec také Hlisnikovský et al. (2015). Na hnojené kontrole dosáhli v tomto roce výnosu zrna pšenice na kontrolní variantě 3,6 t/ha, na variantě s hnojem 3,9 t/ha a na variantě s kombinací hnoje a minerálního NPK hnojení 7,1 t/ha. I Kozlovský et al. (2009) zaznamenali na stanovišti Humpolec, tedy lokalitě s horšími půdně-půdně-klimatickými podmínkami (kambizem) podobným Lukavci, významné rozdíly mezi jednotlivými ročníky. Meziroční pokles výnosu zrna pšenice zde byl z 9,28 t/ha v roce 2007 na 7,57 t/ha v roce 2008, přičemž pokles byl způsoben nižším počtem zrn v klase a nižší HTS v roce 2008. Toto stanoviště popisuje jako celkově méně úrodné s horšími podmínkami, které nezajišťují stabilní výnos a je proto méně vhodné pro produkci potravinářské pšenice.

Pšenice ozimá dosáhla vyšších odběrů dusíku a následně i výnosů po aplikaci kalu ve srovnání s hnojem. Na vyšší odběr N po aplikaci čistírenských kalů oproti variantě s hnojem měla pravděpodobně vliv skutečnost, že organická hmota čistírenských kalů je v porovnání s hnojem

rychleji mineralizovatelná a živiny z kalů jsou tak rostlinám rychleji přístupné, což potvrzují i Černý et al. (2014c). Na vyšší výnosy varianty kal oproti hnoji měl zřejmě vliv i větší obsah přístupného fosforu (Vašák, 2016) a síry (Kulhánek et al., 2016) v půdě po dlouhodobé aplikaci čistírenského kalu. Dle Chang et al. (1996) má na odběr dusíku po aplikaci organických hnojiv vliv také pravidelnost jejich aplikace, jelikož v půdě působí nejen snadno rozložitelné sloučeniny, ale později jsou mineralizovány také stabilnější komponenty. Z dlouhodobého hlediska tak může být u hnoje využito až 56 % z aplikované dávky N, u snadněji mineralizovatelných organických hnojiv, jako je čistírenský kal až 80 % (Schröder et al., 2005). Na lokalitě Suchdol je možné pozorovat podstatně vyšší odběry dusíku u organicky hnojených variant než na Lukavci. Lokalita Suchdol, náležející do řepařské výrobní oblasti, není pro pěstování brambor, které byly předplodinou ozimé pšenice, vhodná, v prvním roce tedy nebylo sklizní odebráno tolik dusíku, jako na Lukavci, který se nachází v bramborařské výrobní oblasti (Vašák, 2016).

6.1.2 Obsah dusíkatých látek v zru

Na variantách s organickým hnojením byly zaznamenány obdobně nízké hodnoty dusíku v zru jako na nehnojené kontrole. V Lukavci nebylo dosaženo minimální hodnoty dusíkatých látek pro zru potravinářské pšenice, kterou ČSN 46 1011–18 (2003) stanoví na 11,5 %, u žádné z variant hnojení, tedy ani přímá aplikace 140 kg/ha minerálního dusíku na stanovišti s nízkou půdní úrodností nezajistila požadovanou kvalitu. Minerálním hnojením jsme na tomto stanovišti sice dosáhli výrazného zvýšení výnosu, ale kvalita sklizeného produktu neodpovídá požadavkům. Pro pěstování potravinářské pšenice na tomto stanovišti by bylo nutné přizpůsobit dávku a termín aplikace hnojiv mineralizačnímu potenciálu stanoviště, který je nižší než na Suchdole.

Ačkoli dle výsledků Horákové et al. (2008) bylo při zkoušení odrůdy Alana dosaženo vysokého obsahu dusíkatých látek v zru, a to 13,8 %, na stanovišti Lukavec za sledované období 1997 – 2012 byla nejvyšší průměrná hodnota 10,7 % u varianty NPK, nejnižší pak u varianty kontrolní 8,9 %.

Na Suchdole byl průměrný obsah dusíkatých látek v zru u variant s minerálním hnojením 12 %. Ani zde však nevyhověly požadavkům varianty s organickým hnojením (10,6 % varianta kal, 9,8 % varianta hnůj) a nehnojená kontrolní varianta (9,3 %). Sklizňový index odběru dusíku na Lukavci byl u pšenice nejvyšší na variantách s minerálním hnojením, průměrně 84,6 %, 80 % po aplikaci organických hnojiv a 73,9 % na kontrole. Na Suchdole byl nejvyšší sklizňový index odběru

dusíku zjištěn na kontrole (87,2 %), avšak rozdíly mezi jednotlivými variantami zde nebyly statisticky průkazné.

6.1.3 Ukazatele využití N z hnojiv

Využití dusíku (NUE) vyjádřené poměrem výnosu zrna a aplikované dávky dusíku bylo u pšenice ozimé nejvyšší na organicky hnojených variantách. Na Suchdole bylo za sledované roky 1997 – 2012 vypočteno nejvyšší NUE z hnoje, a to téměř 150 kg/kg. Avšak je třeba zohlednit, že přímá aplikace organických hnojiv byla prováděna již k předplodině, takže bylo počítáno s druhým rokem uvolňování dusíku z těchto hnojiv, s 11 % u hnoje (Eghball et al., 2002), u anaerobně stabilizovaného kalu pak bylo počítáno s 10 % z aplikované dávky N (Mininni et al., 1987).

U statkových hnojiv využití živin rostlinami závisí výrazně na podmínkách pro jejich mineralizaci. Obdobně vysoké NUE bylo na Lukavci po hnojení kalem. U minerálně hnojených variant bylo u pšenice počítáno s aplikovanou dávkou 140 kg N/ha. V Lukavci se průměrné NUE na variantách s minerálním N pohybovalo okolo 44 kg/kg, na Suchdole bylo průměrné využití 40 kg/kg, nejnižší NUE bylo na variantě N (34 kg/kg).

Účinnost využití dusíku (NUE) stanovená jako poměr výnosu zrna a odběru dusíku zrnem je závislá na plodině, případně odrůdě, ale také agromanagementu u dané plodiny. Nepostihuje však vliv stanoviště a možnosti pro zlepšení výnosu a odběru dusíku porostem, ale má informativní charakter, zda odběr dusíku odpovídá danému výnosu (Černý et al., 2014b). V našem sledování byla NUE u pšenice ozimé celkově vyšší na méně úrodných stanovištích (Lukavec, Humpolec). Na těchto lokalitách byla u pšenice významně vyšší na kontrole a organicky hnojených variantách v porovnání s minerálně hnojenými variantami, na Lukavci zejména pak po hnojení kalem (81 kg/kg).

Agronomická efektivita aplikovaného dusíku (AE_N) se u pšenice značně lišila dle stanoviště, vyšší hodnoty byly získány na Lukavci, zejména u organicky hnojených variant. Na Suchdole bylo nejvyšší efektivitu dosaženo po aplikaci kalu.

Bilance dusíku (ΔN) byly počítány jako rozdíl aplikovaného a odebraného dusíku zrnem a slámou. U pšenice je patrný prohlubující se pokles hodnot v první dekádě pokusu, který v posledních letech sledování ustává a bilance dusíku začíná pozvolna stoupat. Tato tendence je zřetelná zejména na méně úrodném stanovišti Lukavec. Zvyšování bilancí N lze vysvětlit snižující se schopností příjmu N plodinami (nižší obsah N v zrnu, nižší výnosy) způsobené poklesem pH

půdy. Dle sledování Vašáka et al. (2014b) z let 1996 až 2010 na tomto stanovišti docházelo k poklesu hodnot pH, a to zejména na minerálně hnojených variantách a variantě kontrolní. Je zde totiž pouze malý podíl látek s pufrací schopností (uhličitany, jílové minerály, kvalitní humus apod.), a tak změny pH ovlivňuje především sorpční schopnost půdy (Vašák et al., 2014a). V tomto případě příznivě působila aplikace organických hnojiv, zvláště pak hnoje. Pokles pH v Lukavci na variantě hnůj za čtrnáct hodnocených let byl o 0,2 jednotky pH, zatímco na minerálně hnojených variantách se pokles pohyboval od 0,4 do 0,7 jednotky pH. Rozdíly v ΔN mezi úrodnými a méně úrodnými stanovišti se tedy v druhé dekádě pokusu zvětšují. V posledních letech sledování se dostáváme u variant s minerálním hnojením již do kladných bilancí, a to zejména na Lukavci.

Na Lukavci byla průměrná hodnota bilance N u pšenice na kontrolní variantě -53 kg N/ha, nejvyšší průměrná bilance pak na této lokalitě byla zjištěna u kombinace minerálního dusíku se slámou 9,3 kg N/ha. Na variantě kal a hnůj byly záporné bilance dusíku po celou dobu sledování, průměrně pak -44 kg N/ha u kalu a -39 kg N/ha po použití hnoje. Jednalo se však již o druhý rok po přímé aplikaci organických hnojiv a bylo tedy počítáno pouze s 11 % z celkové dávky N u hnoje a s 10 % u kalu, tedy s 36,3 kg/ha N z hnoje a 33 kg N z kalu. Na Suchdole byla u všech sledovaných variant průměrná hodnota bilance dusíku záporná, na kontrole -81 kg N/ha, obdobně záporná i po aplikaci kalu -83 kg N/ha a při hnojení hnojem -60 kg N/ha. U minerálně hnojených variant se na tomto stanovišti průměrné bilance pohybovaly v rozmezí od -9 kg N/ha až -4,5 kg N/ha.

Smatanová (2014) zaznamenala v dlouhodobých pokusech ÚKZÚZ průměrnou hodnotu bilance N na nehnojené variantě v bramborářské výrobní oblasti -76 kg N/ha, tedy o 23 kg N/ha méně než v našem pokuse na Lukavci. V řepářské výrobní oblasti se s -88 kg N/ha kontrola blížila naší nehnojené variantě na Suchdole.

6.1.4 Kvalitativní parametry

Limit objemové hmotnosti 760 g/l pro zrno potravinářské pšenice požadované ČSN 461100-2 (2001) nebyl dosažen na lokalitě Suchdol ve sledovaných letech 2013 a 2014 pouze u kontrolní varianty, na Lukavci byly vyhovující výsledky u všech pokusných variant. Při porovnání kontrolní varianty (784,5 g/l) s organicky hnojenými nebyl na Lukavci zjištěn statisticky průkazný rozdíl v prvním roce sledování, ve druhém roce však kontrola dosáhla vyšší objemové hmotnosti (777,7 g/l) než kal (768,9 g/l) a hnůj (773,4 g/l). Statisticky průkazně nejvyšších hodnot bylo na

Lukavci dosaženo u variant s minerálním dusíkem, v roce 2013 od 793,2 g/l do 804,8 g/l a v druhém hodnoceném roce od 784,7 g/l do 796,1 g/l. Celkově nižší hodnoty objemové hmotnosti byly na Suchdole zjištěny v roce 2013, tedy v opačném roce než na Lukavci. Na Suchdole byla kontrola v obou hodnocených letech nevyhovující (755,8 g/l v roce 2013, 759,5 g/l v roce 2014). I zde nejlépe dopadlo minerální hnojení, varianty měly průměrně o 24,5 g/l více než kontrola ve sledovaném roce 2013 a dokonce o 32,1 g/l více v roce 2014. Rozdíly mezi minerálně hnojenými variantami nebyly průkazné, od 778,3 g/l do 783,8 g/l v roce 2013 a od 791,0 g/l do 792,4 g/l v roce 2014. Hodnoty u organicky hnojených variant byly v obou letech vyšší než kontrolní variantě, rozdíl mezi variantou kal (769,4 g/l v roce 2013, 780,4 g/l v roce 2014) a hnůj (764,0 g/l v roce 2013, 781,8 g/l v roce 2014) nebyl patrný.

Dalším hodnoceným kvalitativním parametrem bylo číslo poklesu (s). Zrno s číslem poklesu nižším než 200 s, nebo vyšším než 400 s je nevhodné pro pekárenské využití. Zrno s číslem poklesu nižším než 200 s má vysokou aktivitu amylolytických enzymů a je často porostlé. Zrno s číslem poklesu vyšším než 400 s má nízkou aktivitu amylolytických enzymů a před zpracováním je nutné ji zvýšit (Palík et al., 2009). Číslo poklesu bylo v jednotlivých letech a na sledovaných lokalitách velmi různorodé, neboť bylo značně ovlivněno podmínkami stanoviště a především počasím v době sklizně. Na Lukavci se v roce 2013 pohybovalo od 261 s na kontrole po 334 s na variantě N se slámou, v roce 2014 bylo nejnižší číslo poklesu zaznamenáno u varianty kal 314 s, statisticky průkazně nejvyšší opět u kombinace N se slámou 393 s. Na Suchdole bylo v obou letech nejnižší číslo poklesu u kontrolní varianty: 246 s v roce 2013 a 242 s v roce 2014. V roce 2013 na tomto stanovišti nebyl statisticky průkazný rozdíl v čísle poklesu mezi hnojenými variantami, změřeno bylo v rozpětí od 270 s u NPK a N se slámou do 273 na variantě kal. V roce 2014 zde byly již průkazné rozdíly mezi hnojenými variantami, nejnižší hodnota 266 s byla zjištěna u varianty hnůj, nejvyšší u kombinace minerálního dusíku se slámou 339 s. Minimální požadavek 220 s pro potravinářskou pšenici překonán na všech variantách včetně kontroly, a ačkoli odrůda Alana patří do skupiny potravinářských pšenic se silnou náchylností k porůstání, u kterých v případě dešťových srážek v době sklizně je riziko porůstání zrna v klasu a tím snížení hodnoty čísla poklesu pod 200 s téměř 100 % (Hubík et Mareček, 2002). Zvláště pak na Lukavci v roce 2014 byly díky nízkému úhrnu srážek ve sklizňovém období získány vysoké hodnoty od 314 s na variantě s hnojem po 393 s u varianty s minerálním dusíkem a slámou.

Korelace mezi výnosem a objemovou hmotností byla vyšší na Suchdole ($r = 0,96$ v roce 2013, $r = 0,98$ v roce 2014) než na Lukavci ($r = 0,87$ v roce 2013 a $r = 0,79$ v roce 2014). Také

korelace mezi výnosem a číslem poklesu byla vyšší na Suchdole ($r = 0,93$ v roce 2013 a $r = 0,93$ v roce 2014) než na Lukavci ($r = 0,82$ v roce 2013, $r = 0,91$ v roce 2014), avšak na obou stanovištích byla vysoce pozitivní. Korelace mezi HTS a výnosem byla v Lukavci slabá ($r = 0,22$ v roce 2013, $r = 0,40$ v roce 2014), na Suchdole ale vysoce pozitivní v obou hodnocených letech ($r = 0,94$ v roce 2013, $r = 0,93$ v roce 2014). Na Lukavci bylo zjištěno více statisticky průkazných rozdílů mezi jednotlivými variantami než na Suchdole. Suchdol je tedy možné vyhodnotit jako výnosově a kvalitativně stabilnější lokalitu s menšími výkyvy mezi ročníky.

6.2 Jarní ječmen

6.2.1 Výnos zrna

Statisticky průkazný rozdíl mezi průměry výnosu zrna z let 1997 – 2012 byl zjištěn mezi variantami s minerálním hnojením a ostatními variantami v Humpolci a mezi kontrolní variantou a všemi hnojenými variantami na Červeném Újezdě. Rozdíly ve výnosech zrna varianty hnůj (3,49 t/ha) a kal (3,45 t/ha) v porovnání s kontrolou (2,81 t/ha) byly na Humpolci neprůkazné, na Červeném Újezdě byl prokázán statistický rozdíl mezi kontrolou (2,78 t/ha) a variantou hnůj (3,63 t/ha) i kal (3,75 t/ha). Mezi variantami kal a hnůj nebyl zjištěn průkazný rozdíl ani na jednom stanovišti. Na rozdíl od našeho pokusu zaznamenal Trávník (2011) ve stacionárním polním pokuse ÚKZÚZ s organickým hnojením vyšší výnos zrna ječmene na variantě s hnojem (3,61 t/ha) ve srovnání s aplikací čistírenského kalu (3,18 t/ha).

Detailnější sledování jednotlivých výnosotvorných parametrů u ječmene však ukázalo rozdíly ve výnosech v jednotlivých ročnících a tedy nutnost hodnocení a přizpůsobení hnojení aktuálním podmínkám. U jarního ječmene bylo v Červeném Újezdě v roce 2014 dosaženo vyššího výnosu oproti roku 2013. Zatímco na Suchdole tomu bylo na hnojených variantách právě naopak. V roce 2014 na stanovišti Suchdol nedostatek minerálního dusíku v půdě zapříčiněný přívalem srážkami, krátké období plnění zrna a menší obsah dusíku v rostlinách ve fázi kvetení ovlivnily výsledný výnos. Obdobně v pokusech s ječmenem zaznamenal Przulj et al. (2001), že nepříznivé podmínky prostředí během fáze plnění zrna vedly k omezení fotosyntézy a snížení odběru dusíku, což zapříčinilo snížení výnosu, zatímco při vhodných podmínkách prostředí dostatečná míra fotosyntézy a odběr dusíku podpořily vyšší výnos.

6.2.2 Obsah dusíkatých látek v zrně

ČSN 46 1100–5 (2006) požaduje pro sladovnický ječmen obsah dusíkatých látek v zrně v rozmezí 10 – 12 %, z pohledu technologie sladování by se měl obsah dusíkatých látek pohybovat v rozpětí 9,5 – 11,7 % s optimem v oblasti 10,2 – 11,0 % (Prugar et al., 2008). Nízká kvalita obilovin může být způsobena nadměrnými dávkami dusíku a následně vysokým množstvím translokovaného N do zrna, nebo naopak nedostatečným transportem dusíkatých látek do zrna v důsledku vodního stresu (Ruiter, 1997).

V Humpolci za sledované období let 1997 až 2012 nepřekročila průměrná hodnota obsahu dusíkatých látek v zrně 11,1 % (varianta N), zároveň však i nejnižší hodnota 10 % u kontrolní varianty byla stále vyhovující pro sladovnickou kvalitu. S ohledem na obsah dusíkatých látek v zrně sladovnického ječmene na této lokalitě byla odpovídající jak každoroční 70 kilogramová aplikace dusíku v minerální formě (což přibližně odpovídá odběru dusíku porostem při zohlednění množství potenciálně mineralizovatelného dusíku na stanovištích), tak pěstování v osevním sledu třetí rok po přímém hnojení kalem a hnojem k bramborám.

Na lokalitě Červený Újezd byly průměrné obsahy dusíku v zrně u kontroly a organicky hnojených variant obdobné jako v Humpolci, tedy okolo spodní hranice 10 %. Na variantách s minerálním hnojením došlo díky mineralizaci půdního dusíku k navýšení obsahu až na 12,5 %. Odběry N na variantách s minerálním N byly o 40 kg/ha vyšší než na nehnojené kontrole (43,7 kg/ha) a u variant s organickým hnojením se pohybovaly mezi 55,3 – 58,6 kg/ha na obou stanovištích. Vysoký obsah dusíkatých látek způsobuje nedostatečnou absorpci vody během sladování, celý proces sladování trvá delší dobu, a je zde nebezpečí vzniku plísní (Váňová et al., 2006). Dostálová et al. (2015) zaznamenala ve sklizňovém roce 2013 na variantách s minerálním hnojením obsah dusíku v zrně ječmene vysoko nad optimální úroveň (12,55 %), který byl pravděpodobně způsoben vysokým úhrnem srážek v době plnění zrna, které urychlilo dozrávání.

6.2.3 Ukazatele využití N z hnojiv

Nejnižší hodnota NUtE byla zaznamenána na všech stanovištích u variant minerálně hnojených. Průměrné hodnoty NUtE se dle Dobermann (2007) pohybují v rozmezí 30 - 90 kg/kg, přičemž optimální rozsah při vyvážené výživě činí 55 - 65 kg/kg. Tomuto rozmezí v našem pokuse neodpovídaly pouze minerálně hnojené varianty na Suchdole s 47,5 kg/kg.

Účinnost remobilizace dusíku (RE_N) umožňuje posoudit kolik procent dusíku je z aplikovaného hnojiva přímo využito porostem. Průměrné hodnoty na jednotlivých stanovištích

se u variant s minerálním dusíkem pohybovaly v rozmezí od 46,2 % (N) do 60,3 % (N se slámou), přičemž Růžek (1997) udává, že využití dusíku při hnojení obilnin v našich půdně-klimatických podmínkách je v průměru jen 35 - 55 %. U ječmene byly hodnoty účinnosti remobilizace u variant s minerálním hnojením v rámci stanovišť velmi vyrovnané a nebyly mezi nimi nalezeny statisticky průkazné rozdíly.

AE_N se na obou sledovaných lokalitách (Humpolec a Červený Újezd) významně nelišila (27 % a 23 %) a rozdíly mezi jednotlivými variantami nebyly průkazné.

V pokuse byl u ječmene sledován vývoj sumárních bilancí v čase u kontroly a variant s minerálním hnojením. V roce 1997 započala sumární bilance na stanovišti Humpolec na -81 kg N/ha u kontroly a -60 kg N/ha u variant N a N se slámou až -66 kg N/ha u varianty NPK. V posledním hodnoceném roce 2012 zde činila sumární bilance dusíku -922 kg N/ha u kontrolní varianty a -413 až -455 kg N/ha u variant s minerálním hnojením. U nehnojené kontroly je možné pozorovat setrvalé prohlubování negativní bilance dusíku. Na Červeném Újezdě započala bilance dusíku na -83 kg N/ha u kontroly a -47, -59 až -79 kg N/ha pro N, NPK a N+ST. Na konci sledování dosáhla sumární bilance hodnot -870 kg N/ha u kontrolní varianty, -557, -549 a -621 kg N/ha pro N, NPK a N+ST. Na stanovišti Červený Újezd bylo možné pozorovat podstatně nižší bilance dusíku než na lokalitě Humpolec, a to i u minerálně hnojených variant. Na Červeném Újezdě jsou díky mineralizačnímu potenciálu stanoviště stále vyšší odběry dusíku, než je tomu na Humpolci, a proto jsou hodnoty sumárních bilancí nižší právě na tomto stanovišti. Vaněk et al. (2016) uvádějí průměrný odběrový normativ 110 kg N u jarního ječmene s výnosem okolo 5 t zrna. Průměrný výnos byl u minerálně hnojených variant na stanovišti Červený Újezd 4,30 t/ha, odpovídající dávka dusíku by tedy byla přibližně 95 kg N. Dávka dusíku aplikovaná v pokusu tedy není vzhledem k výši výnosů dostatečná a v budoucnu zde hrozí ztráta mineralizačního potenciálu stanoviště. Na sumy bilancí dusíku měl vliv i jiný osevní sled, kdy je na Červeném Újezdě v prvním roce zařazena kukuřice místo brambor. Ke stejnému poznatku zde dospěl i Vašák (2016) při hodnocení bilance draslíku. Při porovnání odběru dusíku sklizní u minerálně hnojených variant v porovnání se vstupy je patrné, že převyšují aplikovanou dávku dusíku na obou stanovištích a hrozí tak deficit této živiny v půdě. Potvrzuje se tedy nezbytnost dlouhodobých polních pokusů, jak ji popisují například Körschens (2006) nebo Lipavský et al. (2010), neboť až po více než desetiletí sledování se ukazuje rozdílný vývoj bilancí dusíku na těchto dvou stanovištích.

7. ZÁVĚR

Na méně úrodných stanovištích s horšími půdně-klimatickými podmínkami (Lukavec, Humpolec) byl potvrzen vyšší vliv hnojení na výnos než na lokalitách s příznivějšími podmínkami, což bylo doloženo i parametry efektivity využití dusíku. Na variantě NPK bylo v Lukavci dosaženo velmi vysokého 144% (6,31 t/ha) nárůstu výnosu zrna ozimé pšenice oproti nehnojené kontrolní variantě (2,59 t/ha). S tím souvisel i nejvyšší zaznamenaný odběr dusíku zrnem, který byl o 189 % vyšší u NPK varianty než na kontrole. Na Suchdole byl díky přirozené úrodnosti půdy vyšší výnos i na kontrolní variantě 4,42 t/ha, na NPK již 6,13 t/ha (nárůst 39 %). Odběr dusíku zrnem u NPK varianty zde byl o 82 % vyšší ve srovnání s kontrolou.

V Humpolci vzrostl výnos jarního ječmene na NPK variantě o 68 % (4,73 t/ha) ve srovnání s kontrolou (2,81 t/ha). Výnos jarního ječmene na Červeném Újezdě byl nejvyšší u kombinace minerálního dusíku a slámy, a to o 55 % (4,34 t/ha) vyšší než výnos kontrolní varianty (2,78 %). Výnosy organicky hnojených variant byly na obou stanovištích srovnatelné: v Humpolci 3,45 t/ha u kalu, 3,49 t/ha u hnoje; na Červeném Újezdě 3,75 t/ha u varianty kal a 3,63 t/ha u hnoje.

Obsah dusíkatých látek v zrně pšenice na stanovišti Lukavec po hnojení NPK zvýšil o 21 % oproti kontrole (8,93 %). Limit 11,5 % požadovaný pro potravinářskou pšenici zde nebyl dosažen žádnou z variant hnojení, neboť aplikovaná dávka neodpovídala mineralizačnímu potenciálu stanoviště. Naopak na lokalitě Suchdol bylo dosaženo vysoce kvalitního zrna potravinářské pšenice s průměrnými 12,0 % dusíkatých látek.

V dlouhodobém průměru na variantách s organickým hnojením na Suchdole pšenice nevyhověla obsahem dusíkatých látek, avšak při detailnějším rozboru vybraných let byly zjištěny velmi dobré výsledky u varianty kal: 12,0 % v roce 2013 a 11,5 % v roce 2014, zatímco varianta hnůj byla i v těchto letech pod požadovaným limitem (10,3 % a 10,8 %), ačkoli v těchto hnojivech byla aplikována stejná dávka dusíku. Bylo to způsobeno rozdílnou rychlostí mineralizace dusíku z kalu a hnoje.

V Humpolci za celé sledované období nepřekročila průměrná hodnota dusíkatých látek v zrně jarního ječmene 11,1 % (varianta N). Z hlediska sladovnické kvality zde vyhověla dokonce i kontrolní varianta, kal a hnůj s 10 % dusíkatých látek. Stejných výsledků na těchto variantách bylo dosaženo i na Červeném Újezdě. Avšak díky mineralizačnímu potenciálu stanoviště zde minerálně hnojené varianty měly obsah dusíkatých látek až 12,5 %.

NUE z hnojiv bylo u pšenice nejvyšší u variant s organickým hnojením. U organicky hnojených variant však v druhém roce pokusu bylo počítáno pouze s 11 % z celkové dávky N u

hnoje a s 10 % u kalu, tedy s 36,3 kg/ha N z hnoje a 33 kg N z kalu. Nejvyšší NUE, téměř 150 kg/kg, bylo zjištěno u varianty kal na Lukavci a u varianty hnůj na Suchdole. Zatímco na Suchdole se rozdíl mezi NUE z kalu a hnoje lišil v průměru o 14 kg/kg, na Lukavci byl mezi kalem a hnojem rozdíl již 43 kg/kg.

I nejvyšší NUtE 80,98 kg/kg bylo u pšenice na stanovišti Lukavec dosaženo na variantě s kalem, tato hodnota výrazně převyšovala všechny ostatní varianty na obou stanovištích. Varianta hnůj byla na Lukavci s 63,80 kg/kg srovnatelná s nehnojenou kontrolou (64,90 kg/kg). AE_N byla podstatně vyšší na stanovišti Lukavec ve srovnání se Suchdolem. Nejvyšší hodnota byla zjištěna po aplikaci kalu (76,44 % Lukavec, 31,75 % Suchdol).

Nejvyšší NUtE se u ječmene prokázalo na obou stanovištích po použití hnoje (64,2 kg/kg Humpolec, 66,5 kg/kg Červený Újezd), u kalu bylo o něco málo nižší, než na variantě kontrolní (63,0 kg/kg Humpolec, 65,1 kg/kg Červený Újezd).

NUE z minerálních hnojiv bylo u pšenice na Lukavci i Suchdole poměrně vyrovnané a pohybovalo se v rozmezí 41,48 – 45,08 kg/kg, s výjimkou samostatného hnojení dusíkem na Suchdole, kde bylo zaznamenáno nejnižší NUE 34,29 kg/kg. I NUtE u minerálních hnojiv byla na obou lokalitách vyrovnaná mezi variantami, na Lukavci průměrných 55,0 kg/kg, na Suchdole o 2,5 kg/kg méně. U minerálního hnojení nebyly rozdíly v AE_N u pšenice mezi variantami, pozorovatelná je neprůkazně vyšší hodnota u varianty NPK (28,07 % Lukavec, 12,50 % Suchdol), kde byla zjištěna i nejvyšší RE_N z minerálně hnojených variant (61,69 % Lukavec, 40,85 % Suchdol). Patrný je však rozdíl mezi stanovišti, neboť průměrná hodnota agronomické efektivity na Lukavci byla o 16 % vyšší než na Suchdole.

Průměr NUtE u ječmene u minerálně hnojených variant činil 59,9 kg/kg na Humpolci. Nejvyšší NUtE z minerálních variant bylo zjištěno na obou stanovištích u NPK varianty (58,7 kg/kg Humpolec, 51,4 kg/kg Červený Újezd). RE_N u ječmene byla mezi minerálními variantami dosti vyrovnaná, lišila se však mezi porovnávanými stanovišti, neboť na Červeném Újezdě byla o 11 % vyšší, než na Humpolci. AE_N byla na Humpolci u minerálně hnojených variant průměrně o 4 % vyšší, než na Červeném Újezdě.

U všech hnojených variant můžeme s postupem času pozorovat rozdílnou tendenci vývoje bilancí dusíku v čase. Na méně úrodném Lukavci se v posledních hodnocených letech u variant minerálně hnojených dostáváme již do kladných bilancí. Zvyšování bilancí N na tomto stanovišti bylo ovlivněno snižující se schopností příjmu N plodinami způsobené poklesem pH půdy, což vedlo ke snížení obsahu N v zrnu i k nižším výnosům posledních let sledování. Na úrodnějším

Suchdole je nárůst bilancí mnohem pomalejší, a tak rozdíly mezi srovnávanými lokalitami rostou. Do vyrovnaných či dokonce kladných bilancí dusíku se zatím nedostala žádná z variant.

Při porovnání sumárních bilancí dusíku u ječmene na stanovištích Humpolec a Červený Újezd byl zjištěn odlišný vývoj ve druhé dekádě pokusu. Ačkoli byl na obou lokalitách použit stejný systém hnojení, v Humpolci se s postupem času zvětšuje rozdíl mezi nehnojenou kontrolou a minerálně hnojenými variantami. V roce 2012 zde suma bilancí dusíku na kontrole byla již o 509 kg N/ha nižší ve srovnání s variantou hnojenou minerálním dusíkem. Na Červeném Újezdě činil rozdíl mezi nehnojenou variantou na konci sledování, tedy po 12 letech hnojení, a variantou N 313 kg N/ha, u varianty se slámou dokonce jen 249 kg N/ha. Na lokalitě Červený Újezd byl pozorován i v druhé dekádě pokusu setrvalý pokles bilancí dusíku i u minerálně hnojených variant, neboť díky mineralizačnímu potenciálu stanoviště zde zatím nedošlo ke snižování výnosů. Aplikované dávky dusíku však výnosům neodpovídají a dlouhodobě negativní bilance dusíku zvyšuje riziko snížení mineralizačního potenciálu stanoviště.

Objemová hmotnost byla z hlediska potravinářské kvality na Lukavci vyhovující u všech variant včetně kontroly, přičemž vyšší hodnoty byly zaznamenány v roce 2013 v porovnání s rokem 2014. Na obou stanovištích byla průkazně vyšší objemová hmotnost u minerálně hnojených variant. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány na Lukavci na variantě s kombinací minerálního dusíku a slámy (804,8 g/l v roce 2013, 796,1 g/l v roce 2014).

Číslo poklesu bylo nad požadovaným limitem 220 s ve všech případech sledování. V obou hodnocených letech bylo na Lukavci nejvyšších hodnot dosaženo na variantě minerálního dusíku se slámou: 334 s v roce 2013, 393 s v roce 2014, což bylo o 73 s, respektive 71 s více v porovnání s nehnojenou kontrolou. Celkově nižší hodnoty byly zjištěny na stanovišti Suchdol. Výsledky kontrolní varianty (246 s v roce 2013, 242 s v roce 2014) a variant s organickým hnojením byly v porovnávaných letech velmi vyrovnané.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Addiscott, T., Brookes, P. 2002. What governs nitrogen loss from forest soils? *Nature*. 418. 604.

Ahmed, O. H., Braine Yap, C. H., Nik Muhamad, A. M. 2010. Minimizing ammonia loss from urea through mixing with zeolite and acid sulphate soil. *International Journal of the Physical Sciences*. 5 (14). 2198-2202.

Amessa, Y., Juskiw, P. 2012. Review: Strategies to increase nitrogen use efficiency of spring barley. *Canadian Journal of Plant Science*. 92. 617-625.

Andersson, A., Holm, L. 2011. Effects of mild temperature stress on grain quality and root and straw nitrogen concentration in malting barley cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 197. 466-476.

Baker, L. A., Hope, D., Xu, Y., Edmonds, J., Lauver, L. 2001. Nitrogen Balance for the Central Arizona–Phoenix (CAP) Ecosystem. *Ecosystems*. 4. 582-602.

Balasubramanian, V., Alves, B., Aulakh, M., Bekunda, M., Cai, Z., Drinkwater, L., Mugendi, D., Kessel, C. van, Oenema, O. 2004. Crop, Environmental, and Management Factors Affecting Nitrogen Use Efficiency. In: Mosier, A. R., Syers, J. K., Freney, J. R. (eds.). *Agriculture and the Nitrogen Cycle*. SCOPE. USA. p. 19-33. ISBN: 1-55963-708-0.

Balík, J. 1993. *Základy výživy rostlin*. Mze ČR. Praha. 36 s. ISBN: 80-7105-056-3.

Balík, J., Černý, J., Kulhánek, M. 2012. *Bilance dusíku v zemědělství*. Certifikovaná metodika. ČZU. Praha. 38 s. ISBN: 978-80-213-2329-2.

Balík, J., Černý, J., Tlustoš, P., Zitková, M. 2003. Nitrogen balance and mineral nitrogen content in the soil in a long experiment with maize under different systems of N fertilization. *Plant, Soil and Environment*. 49. 554-559.

Balík, J., Olf, H. W. 1998. Effect of N fertilization using inorganic and organic N fertilizers on yield, N uptake and soil fertility parameter in a 5-year maize monoculture experiment. *Agribiological Research-Zeitschrift für Agrarbiologie Agrikulturchemie Ökologie*. 51. 319-328.

Balík, J., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Vaněk, V., Pavlík, M. 2008. *Mobilita prvků a látek v rhizosféře*. ČZU. Praha. 150 s. ISBN: 978-80-213-186-1-8.

Barraclough, P. B., Howarth, J. R., Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C. E., Hawkesford, M. J. 2010. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *European Journal of Agronomy*. 33. 1-11.

Basso, B., Cammarano, D., Troccoli, A., Chen, D., Ritchie, J. T. 2010. Long-term wheat response to nitrogen in a rainfed Mediterranean environment: Field data and simulation analysis. *European Journal of Agronomy*. 33. 132-138.

Bechmann, M., Eggestad, H. O., Vagstad, N. 1998. Nitrogen balances and leaching in four agricultural catchments in southeastern Norway. *Environmental Pollution*. 102. 493-499.

Berzsenyi, Z., Györfy, B., Lap, D. 2000. Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. *European Journal of Agronomy*. 13. 225-244.

Bingham, I. J., Karley, A. J., White, P. J., Thomas, W. T. B., Russell, J. R. 2012. Analysis of improvements in nitrogen use efficiency associated with 75 years of spring barley breeding. *European Journal of Agronomy*. 42. 49-58.

Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J.-W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L., de Vries, W. 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*. 20 (1). 30-59.

Bøckman, O. Ch., Olf, H. W. 1998. Fertilizers, agronomy and N₂O. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 52. 165-170.

Boer, W. D., Kowalchuk, G. A. 2000. Nitrification in acid soils: micro-organisms and mechanisms. *Soil Biology & Biochemistry*. 33. 853-866.

Boogaard, H. L., Kroes, J. G. 1998. Leaching of nitrogen and phosphorus from rural areas to surface waters in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 50. 321-324.

Bouwman, A. F. 1998. Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature*. 392. 866-867.

Brearley, F. Q. 2013. Nitrogen stable isotopes indicate differences in nitrogen cycling between two contrasting Jamaican montane forests. *Plant and Soil*. 367. 465-476.

Breland, T. A., Hansen, S. 1998. Comparison of the difference method and ¹⁵N technique for studying the fate of nitrogen from plant residues in soil. *Biology and Fertility of Soils*. 26. 164-168.

Britto, D. T., Kronzucker, H. J. 2002. NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology*. 159. 567-584.

Bučiene, A., Švedas, A., Antanaitis, Š. 2003. Balances of the major nutrients N, P and K at the farm and field level and some possibilities to improve comparisons between actual and estimated crop yields. *European journal of Agronomy*. 20. 53-62.

Camberato, J. J. 2001. Nitrogen in soil and fertilizers. SC Turfgrass Foundation News. 8 (1). 6-10.

Cameron, K. C., Di, H. J., Moir, J. L. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*. 162. 145-173.

Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*. 31. 132-140.

Cassman, K. G., Peng, S., Olk, D. C., Ladha, J. K., Reichardt, W., Dobermann, A., Singh, U. 1998. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*. 56. 7-39.

Crawford, N. M. 1995. Nitrate: Nutrient and Signal for Plant Growth. *The Plant Cell*. 7. 859-868.

Crohn, D. 2004. Nitrogen mineralization and its importance in organic waste recycling. National Alfalfa Symposium. San Diego. USA. p. 277-285.

Crossman, L., Thomson, N. 2006. Peddling the nitrogen cycle. *Nature*. 4. 494-495.

Černý, J., Balík, J., Balíková, M., Kulhánek, M., Bubeník, J. 2007. Dynamika obsahu minerálního dusíku v půdě při různé intenzitě hnojení silážní kukuřice. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. s. 90-95.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Sedlář, O., Kovářík, J. 2016a. Pozdní hnojení obilnin dusíkem. *Zemědělec*. 18. s. 15 – 17.

Černý, J., Balík, J., Sedlář, O., Kulhánek, M., Vašák, F. 2016b. Hnojení ozimých obilnin na jaře. *Úroda*. 3. s. 73-76.

Černý, J., Kovářík, J., Kulhánek, M., Shejbalová, Š. 2014a. Aplikace organických hnojiv v podzimním období. *Úroda*. 8. 66-70.

Černý J., Shejbalová Š., Kovářík J., Kulhánek M. 2014b. Předseťové a podzimní hnojení pšenice ozimé. *Agromanuál*. 8. s. 64 - 66.

Černý, J., Shejbalová, Š., Kulhánek, M., Vašák, F., Kovářík, J. 2014c. Jak hodnotit využití dusíku rostlinami. *Zemědělec*, 18. 13-19.

Černý J., Shejbalová Š., Kulhánek M., Vašák F. 2013. Využití živin ze statkových hnojiv. *Zemědělec. Profi Press*. 38. s. 10 - 13.

Černý, J., Vaněk, V., Kulhánek, M. 2010. Vliv hnojení na výnos a úrodnost půdy. *Zemědělec*. 28. s. 10-12.

ČSN 46 1100-5 (2006): Obiloviny potravinářské - Část 5: Ječmen sladovnický. Český normalizační institut, 8 s.

ČSN 46 1011-18 (2003): Zkoušení obilovin, luštěnin a olejnin. Část 18: Zkoušení obilovin: Stanovení obsahu dusíkatých látek. Český normalizační institut, 8 s.

ČSN EN ISO 3093 (2010): Pšenice, žito a pšeničná a žitná mouka, pšenice tvrdá (durum) a semolina z pšenice tvrdé – Stanovení čísla poklesu podle Hagberga-Pertena. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 24 s.

Deenik, J. 2006. Nitrogen Mineralization Potential in Important Agricultural Soils of Hawai'i. *Soil and Crop Management*. 15. 1-5.

Delin, S., Lindén, B., Berlund, K. 2005. Yield and protein response to fertilizer nitrogen in different parts of a cereal field: potential of site-specific fertilization. *European Journal of Agronomy*. 22. 325-336.

Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., Falcis, D. D., Maggiore, T., Stanca, A. M. 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*. 9. 11-20.

Delrot, S., Rochat, C., Tegeder, M., Frommer, W. 2001. Amino acid transport. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 214-235. ISBN: 3-540-67799-2.

Di, H. J., Cameron, K. C. 2002. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 46. 237-256.

Dixon, R., Kahn, D. 2004. Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nature*. 2. 621-631.

Dobermann, A. R., Cassman, K. G. 2005. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Science in China Series C: Life Sciences*. 48. 745-758.

Dobermann, A. R., Cassman, K. G. 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*. 247: 153-175.

Dobermann, A. R. 2005. *Nitrogen Use Efficiency-State of the Art*. University of Nebraska. USA.

Dobermann, A. R. 2007. Nutrient use efficiency, measurement and management. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. 7-9 March 2007. Brussels. Belgium. International Fertilizer Industry Association.

Dobermann, A. R., Witt, C., Abdulrachman, S., Gines, H. C., Nagarajan, R., Son, T. T., Tan, P. S., Wang, G. H., Chien, N. V., Thoa, V. T. K., Phung, C. V., Stalin, P., Muthukrishnan, P., Ravi, V., Babu, M., Simbahan, G. C., Adviento, M. A. A., Bartolome, V. 2003. Site-specific management. Estimating Indigenous Nutrient Supplies for Site-Specific Nutrient Management in Irrigated Rice. *Agronomy Journal*. 95. 924–935.

Donald, C. M., 1962. In search of yield. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*. 28. 171-178.

Dostálová, Y., Hřivna, L., Kotková, B., Burešová, I., Janečková, M., Šottníková, V. 2015. Effect of nitrogen and sulphur fertilization on the quality of barley protein. *Plant, Soil and Environment*. 9. 399-404.

Dungait, J. A. J., Cardenas, L. M., Blackwell, M. S. A., Wu, L., Withers, P. J. A., Chadwick, D. R., Bol, R., Murray, P. J., Macdonald, A. J., Whitmore, A. P., Goulding, K. W. T. 2012. Advances in the understanding of nutrient dynamics and management in UK agriculture. *Science of the Total Environment*. 434. 39-50.

Drury, C. F., Yang, J. Y., De Jong, R., Yang, X. M., Huffman, E. C., Kirkwood, V., Reid, K. 2007. Residual soil nitrogen indicator for agricultural land in Canada. *Canadian Journal of Soil Science*. 87. 167-177.

Eghball, B., Wienhold, B. J., Gilley, J. E., Eigenberg, R.A., 2002. Mineralization of manure nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation*. 57. 470-473.

Erisman, J. W. 2011. The new global nitrogen cycle. In: Polacco, J. C., Todd, C. D. *Ecological aspects of nitrogen metabolism in plants*. Wiley-Blackwell. UK. p. 448. ISBN: 978-09138-1649-4.

Erisman, J. W., Bleeker, A., Galloway, J., Sutton, M. S. 2007. Reduced nitrogen in ecology and the environment. *Environmental Pollution*. 150. 140-149.

Erisman, J. W., Bleeker, A., Hensen, A., Vermeulen A. 2008. Agricultural air quality in Europe and the future perspectives. *Atmospheric Environment*. 42. 3209–3217.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. 2005. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Advances in Agronomy*. 88. 97-185.

Fageria, N. K., Baligar, V. C., Clark, R. B. 2006. *Physiology of crop production*. Food Products Press. USA. p. 345. ISBN: 1-56022-289-1.

Fields, S. 2004. Global nitrogen: Cycling out of Control. *Environmental Health Perspectives*. 112 (10). 556-563.

Firoz, A., Siddiqui, M. H., Salem, S. A., Al-Whaibi, M. H., Abhishek, C. 2011. Nitrogen use efficiency and crop production – a mini review. *Environment & We an International Journal of Science & Technology*. 6. 167-174.

Florián, M., Provazník, K., Čermák, P. 2003. Mineral N content in 14 long-term experiments conducted by Central institute for supervisit and testing in agriculture. Results of long-term field experiments of Cista „examination of various systems of fertilization.“ Practical solutions for managing optimum C and N content in Agricultural soils II. NeoSet Václav Nehasil. Praha. 242 s.

Follett, R. F. 2001. Nitrogen transformation and transport processes. In: Follett, R. F., Hatfield, J. L. (eds.). *Nitrogen in the environment: sources, problems, and management*. Elsevier. Netherlands. p. 17-44. ISBN: 0-444-50486-9.

Fontaine, S., Mariotti, A., Abbadie, L. 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology & Biochemistry*. 35. 837-843.

Foulkes, M. J., Murchie, E. H. 2011. Optimizing canopy physiology traits to improve the nutrient utilization efficiency of crops. In: Hawkesford, M. J., Barraclough, P. (eds.). *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*. John Wiley and Sons. UK. p. 65-82. ISBN: 0-8138-1992-X.

Gallais, A., Hirel, B. 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. *Journal of Experimental Botany*. 55 (396). 295-306.

Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R., Vörösmarty, C. J. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*. 70. 153–226.

Garcia, F. O., Salvagiotti, F. 2009. Nutrient use efficiency of cropping systems in the Southern Cone of Latin America. *Nutrient use efficiency. XVIII Latin American Congress of Soil Science*. p. 35-46. 16-20 November 2009. Costa Rica.

Gärdenäs, A. I., Ågren, G. I., Bird, J. A., Clarholm, M., Hallin, S., Ineson, P., Kätterer, T., Knicker, H., Nilsson, S. I., Näsholm, T., Ogle, S., Paustian, K., Persson, T., Stendahl, J. 2011. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions - From molecular to global scale. *Soil Biology and Biochemistry*. 43. 702-717.

Gardner, F. P., Pearce, R. B., Mitchel, R. L. 2003. *Physiology of crop plants*. Iowa State Press. USA. p. 327. ISBN: 0-8138-1098-1.

Garnett, T., Conn, V., Kaiser, B. N. 2009. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants. *Plant, Cell and Environment*. 32. 1272–1283.

Gastal, F., Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*. Inorganic Nitrogen Assimilation Special Issue. 53 (370). 789–799.

Gilland, B. 2015. Nitrogen, phosphorus, carbon and population. *Science Progress*. 98 (4). 379-390.

Glass, A. D. M. 2003. Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrogen absorption. *Plant Sciences*. 22 (5). 453-470.

Godinot, O., Leterme, P., Vertés, F., Carof, M. 2016. Indicators to evaluate agricultural nitrogen efficiency of the 27 member states of the European Union. *Ecological Indicators*. 66. 612–622.

Gómez-Muñoz, B., Bol., R., Hatch, D. J., García-Ruiz, R. 2012. Effect of fertiliser type, rate and method of application on nitrogen leaching in organic olive oil farming. 17th International Nitrogen Workshop. Wexford. Ireland. p. 70. ISBN: 978-1-84170-588-0.

Gordon, A. J., Lea, P. J., Rosenberg, C., Trinchant, J. C. 2001. Nodule formation and function. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 101-146. ISBN: 3-540-67799-2.

Goyal, S. S., Tischner, R., Basra, A. S. (eds.) 2005. Enhancing the efficiency of nitrogen utilization in plants. Food Products Press. USA. ISBN: 1-56022-141-0.

Grignani, C., Zavattaro, L., Sacco, D., Monaco, S. 2007. Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forage systems. *European Journal of Agronomy*. 26. 442-453.

Gruber, N., Galloway, J. N. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*. 451. 293-296.

Grübler, A. 2002. Trends in global emissions: carbon, sulphur, and nitrogen. In: Douglas, I. (ed.). *Encyclopedia of Global Environmental Change 3*. John Wiley and Sons. UK. p. 35-53. ISBN: 978-0-470-85362-7

Hall, S. J., Matson, P. A. 1999. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests. *Nature*. 400. 152-155.

Hay, R. K. M., Porter, J. R. 2006. *The physiology of crop yield*. Blackwell Publishing Ltd. Singapore. p. 314. ISBN: 1-4051-0859-2.

He, X., Xu, M., Qiu, G. Y., Zhou, J. 2009. Use of ^{15}N stable isotope to quantify nitrogen transfer between mycorrhizal plants. *Journal of Plant Ecology*. 2 (3). 107-118.

Hejzman, M., Kunzová, E., Šrek, P., 2012. Sustainability of winter wheat production over 50 years of crop rotation and N, P and K fertilizer application on illimerized luvisol in the Czech Republic. *Field Crops Research*. 139. 30-38.

Hernandez, J., A., George, S., J., Rubio, L., M. 2009. Molybdenum trafficking for nitrogen fixation. *Biochemistry*. 48 (41). 9711-9721.

Hipkin, Ch. R., Simpson, D. J., Wainwright, S. J., Salem, M. A. 2004. Nitrification by plants that also fix nitrogen. *Nature*. 430. 98-101.

Hirel, B., Lea, P. J. 2011. The molecular genetics of nitrogen use efficiency in crops. In: Hawkesford, M. J., Barraclough, P. (eds.). *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*. John Wiley and Sons. UK. p. 139-164. ISBN: 0-8138-1992-X.

Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., Gallais, A. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*. 58 (9). 2369-2387.

Hlisnikovský, L., Kunzová, E., Hejzman, M., Dvořáček, V. 2015. Effect of fertilizer application, soil type, and year on yield and technological parameters of winter wheat (*Triticum aestivum*) in the Czech Republic. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 61 (1). 33-53.

Hodge, A., Robinson, D., Fitter, A. 2000. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? *Trends in Plant Science*. 5 (7). 304-308.

Hoffman, B., M., Dean, D. R., Seefeldt, L. C. 2009. Climbing Nitrogenase: Toward a Mechanism of Enzymatic Nitrogen Fixation. *Accounts of chemical research*. 42 (5). 609-619.

Horáková, V., Dvořáčková, O. 2016. Seznam doporučených odrůd 2016. ÚKZÚZ, Národní odrůdový úřad. Brno. 187 s. ISBN 978-80-7401-125-2.

Horáková, V., Kopřiva, V., Mezlík, T. 2008. Seznam doporučených odrůd 2008. ÚKZÚZ, Národní odrůdový úřad. Brno. 213 s. ISBN: 978-80-7401-004-0.

Hřivna, L. 2012. Výživa a hnojení porostů pšenice ozimé a kvalita produkce. *Šlechtitelské listy*. 2. s. 1 – 4.

Hubík, K., Mareček, J. 2002. Kvalita obilnin, Úroda, dostupné z: <http://uroda.cz/kvalita-obilnin/>

Chabani, M., Amrane, A., Bensmaili, A. 2006. Kinetic modelling of liquid-phase adsorption of nitrates on ionized adsorbent. *Desalination*. 197. 117-123.

Chang, C., Janzen, H. H. 1996. Long-Term Fate of Nitrogen from Annual Feedlot Manure Applications. *Journal of Environmental Quality*. 25. 785-790.

Chien, S. H., Prochnow, L. I., Cantarella, H. 2009. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*. 102. 267-322.

Chirik, P. J., 2009. One electron at a time. *Nature Chemistry*. 1. 520-522.

Chloupek, O., Hrstkova, P., Schweigert, P. 2004. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Research*. 85. 167-190.

Janowiak, J., Smoliński, S. 2003. The effect of differentiated mineral and organic fertilization on the development degree of microorganisms and fertility of a brown podsolc soil. Practical solutions for managing optimum C and N content in Agricultural soils II. NeoSet Václav Nehasil. Praha. 242 s.

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. *Environmental Pollution*. 143. 117-125.

Kant, S., Bi Y. M., Rothstein, S. J. 2011. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 62 (4) 1499-1509.

Keeney, D. R., Hatfield, J. L. 2001. The nitrogen cycle, historical perspective, and current and potential future concerns. In: Follett, R. F., Hatfield, J. L. (eds.). *Nitrogen in the environment: sources, problems, and management*. Elsevier. Netherlands. p. 3-16. ISBN: 0-444-50486-9.

Kennedy, I. R., Choudhury, A. T. M. A., Kecskés, M. L. 2004. Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? *Soil Biology & Biochemistry*. 36. 1229-1244.

Khosla, R., Fleming, K., Delgado, J. A., Shaver, T. M., Westfall, D. G. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*. 57 (6). 513-518.

Kolář, L. 1997. Výživa rostlin dusíkem a kvalita produkce. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. s. 37-42.

Körschens, M. 2006. The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research - a review. *Plant, Soil and Environment*. 52. 1-8.

Kotvová, M. 2007. Sledování vlivu různé intenzity hnojení na výnosy plodin a na vývoj agrochemických vlastností půd. Závěrečná zpráva za období 1998 – 2005. ÚKZÚZ. Plzeň. 95 s.

Kováčik, P. 2007. Výživa a úroveň hnojenia rastlín. ÚVTIP. Nitra. 96 s. ISBN: 978-80-89088-59-1.

Kramberger, B., Gselman A., Janzekovic, M., Kaligarić M., Bracko B. 2009. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. *European Journal of Agronomy*. 31. 103-109.

Krug, E. C., Winstanley, D. 2002. The need for comprehensive and consistent treatment of the nitrogen cycle in nitrogen cycling and mass balance studies: I. Terrestrial nitrogen cycle. *The Science of the Total Environment*. 293. 1-29.

Kubát, J., Klír, J., Pova, D. 2003. The dry matter yields, nitrogen uptake, and the efficacy of nitrogen fertilisation in long-term field experiments in Prague. *Plant, Soil and Environment*. 49. 337-345.

Kubát, J., Lipavský, J. 2006. Steady state of the soil organic matter in the long-term field experiments. *Plant, Soil and Environment*. 52. 9-14.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Sedlář, O., Vašák, F. 2016. Evaluating of soil sulfur forms changes under different fertilizing systems during long-term field experiments. *Plant, Soil and Environments*. 9. 408-415.

Kulhánek, M., Černý, J., Vaněk, V., Balík, J., Budňáková, M. 2015. Přísun živin v minerálních hnojivech a jejich bilance. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. s. 61-67.

Kunzová, E. 2010. Hnojení během vegetace podle požadavků cross compliance. *Úroda*. 3. 80.

Law, B. 2013. Nitrogen deposition and forest carbon. *Nature*. 496. 307-308.

Lea, P. J., Azevedo, R. A. 2006. Nitrogen use efficiency. 1. Uptake of nitrogen from the soil. *Annals of Applied Biology*. 149. 243-247.

Lea, P. J., Azevedo, R. A. 2007. Nitrogen use efficiency. 2. Amino acid metabolism. *Annals of Applied Biology*. 151. 269-275.

Lecoeur, J., Sinclair, T. R. 2001. Nitrogen accumulation, partitioning, and nitrogen harvest index increase during seed fill of field pea. *Field Crops Research*. 71. 87-99.

Le Gouis, J., Béghin, D., Heumez, E., Pluchard, P. 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*. 12. 163-173.

Lehmann, J., Silva, J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*. 249. 343-357.

Lipavský, J., Čermák, P., Křen, J., Kubát, J., Madaras, M. 2010. Dlouhodobé polní pokusy v ČR a ve světě. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. s. 21-25.

Lipavský, J., Ludva, L., Hromadová, M., Kubát, J. 2005. An overview of the long-term static field experiments in the Czech Republic. In: Voříšek, K. (ed.). *The role of long-term field experiments in agricultural and ecological sciences and practical solutions for managing optimum Ca and N content in agricultural soils III*. CULS. Prague. p. 143-147. ISBN: 80-213-1454-0.

Liu, J., Liu, H., Huang, S., Yang, X., Wang, B., Li, X., Ma, Y. 2010. Nitrogen efficiency in long-term wheat–maize cropping systems under diverse field sites in China. *Field Crops Research*. 118. 145-151.

Liu, Ch., Watanabe, M., Wang, Q. 2008. Changes in nitrogen budgets and nitrogen use efficiency in the agroecosystems of the Changjiang River basin between 1980 and 2000. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 80. 19-37.

Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z., Vitousek, P., Erisman, J. W., Goulding, K., Christie, P., Fangmeier, A., Zhang, F. 2013. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*. 494. 459-462.

Lodwig, E. M., Hosie, A. H. F., Bourdés, A., Findlay, K., Allaway, D., Karunakaran, R., Downie, J. A., Poole, P. S. 2003. Amino-acid cycling drivers nitrogen fixation in the legume-Rhizobium symbiosis. *Nature*. 422. 722-726.

Loecke, T. D., Cambardella, C. A., Liebman, M. 2012. Synchrony of net nitrogen mineralization and maize nitrogen uptake following applications of composted and fresh swine manure in the Midwest U. S. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 93. 65-74.

Maguire, R. O., Kleinman, P. J. A., Dell, C. J., Beegle, D. B., Brandt, R. C., McGrath, J. M., Ketterings, Q. M. 2011. Manure Application Technology in Reduced Tillage and Forage Systems: A Review. *Journal of Environmental Quality*. 40. 292-301.

Maslaux, C., Quilleré, I., Gallais, A., Hirel, B. 2001. The challenge of remobilisation in plant nitrogen economy. A survey of physio-agronomic and molecular approaches. *Annals of Applied Biology*. 138. 69-81.

- Maselaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., Suzuki, A. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany*. 105. 1141-1157.
- Mendel, R. R. 2011. Cell biology of molybdenum in plants. 30. 1787-1797.
- Merbach, W., Deubel, A. 2008. Long-term field experiments - museum relics or scientific challenge? *Plant, Soil and Environment*. 54. 219-226.
- Meyer, C., Stitt, M. 2001. Nitrate reduction and signalling. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 37-59. ISBN: 3-540-67799-2.
- Mikanová, O., Friedlová, M., Šimon, T. 2009. The influence of fertilisation and crop rotation on soil microbial characteristics in the long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment*. 55. 11-16.
- Miller, A. J., Fan, X., Orsel, M., Smith, S. J., Wells, D. M. 2007. Nitrate transport and signalling. *Journal of Experimental Botany*. 58 (9). 2297-2306.
- Miller, A. J., Chapman, N. 2011. Transporters involved in nitrogen uptake and movement. In: Hawkesford, M. J., Barraclough, P. (eds.). *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*. John Wiley and Sons. UK. p. 193-210. ISBN: 0-8138-1992-X.
- Mininni, G., Santori, M., 1987. Problems and perspectives of sludge utilization in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 18. 291-311.
- Moll, R. H., Kamprath, E. J., Jackson, W. A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*. 74 (3). p. 562-564.
- Morot-Gaudry, J. F. (eds.) 2001. Nitrogen assimilation by plants. Physiological, biochemical and molecular aspects. CRC Press. p. 470. ISBN: 978-1578081394.
- Morot-Gaudry, J. F., Job, D., Lea, P. J. 2001. Amino acid metabolism. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 168-211. ISBN: 3-540-67799-2.
- Morot-Gaudry, J. F., Lea, P. J. 2001. Introduction. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. VIII-XI. ISBN: 3-540-67799-2.
- Morris, S. J., Blackwood, C. B. 2007. The ecology of soil organisms. In: Paul, E. A. (ed.). *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. Academic Press. Canada. p. 195-229. ISBN: 0-12-546807-5.
- Mosier, A. R., Doran, J. W., Freney, J. R. 2002. Managing soil denitrification. *Journal of Soil and Water Conservation*. 57 (6). 505-512.

Munch, J. C., Velthof, G. L. 2007. Denitrification and Agriculture. In: Bothe, H., Ferguson, S. J., Newton, W. E. *Biology of the Nitrogen Cycle*. Elsevier. The Netherlands. p. 331-341. ISBN: 978-0-444-52857-5.

Nannen, D. U., Herrmann, A., Loges, R., Dittert, K., Taube, F. 2011. Recovery of mineral fertiliser N and slurry N in continuous silage maize using the ¹⁵N and difference methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 89. 269-280.

Nátr, L. 1998. *Rostliny, lidé a trvale udržitelný život člověka na zemi*. Karolinum. Praha. 135 s. ISBN: 80-7184-681-3.

Ndegwa, P. M., Hristov, A. N., Arogo, J., Sheffield, R. E. 2008. A review of ammonia emission mitigation techniques for concentrated animal feeding operations. *Biosystems Engineering*. 100. 453-469.

Neugschwandtner, R. W., Liebhard, P., Kaul, H.-P., Wagenristl, H. 2014. Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment*. 60. 57-62.

Ňaršanská, M., Galuščáková, L., Ondříšek, P., Porhajašová, J., Urminská, J. 2009. Analýza vplyvu pestovateľských zásahov na zmeny obsahu anorganického dusíka v pôde pri pestovaní jačmeňa siateho f. jarnej (*Hordeum vulgare*). *Agrochémia*. 1. s. 11-15.

Öborn, I., Edwards, A. C., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P. J. A., Nilsson, S. I., Richert Stinzing, A. 2003. Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy*. 20. 211-225.

Olfs, H. W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper J., Link, A., Lammel, J. 2005. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 168. 414-431.

Ollivier, J., Töwe, S., Bannert, A., Hai, B., Kastl, E. M., Meyer, A., Su, M. X., Kleineidam, K., Schloter, M. 2011. Nitrogen turnover in soil and global change. *FEMS Microbiology Ecology*. 78. 3-16.

Olsthoorn, C. S. M., Fong, N. P. K. 1998. The anthropogenic nitrogen cycle in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 52. 269-276.

Ondrášek, L., Čunderlík, J. 2008. Effects of organic and mineral fertilisers on biological properties of soil under seminatural grassland. *Plant, Soil and Environment*. 54. 329-335.

Palík, S., Burešová, I., Edler, S., Sedláčková, I., Tichý, F., Váňová, M. 2009. Metodika pěstování ozimé pekárenské pšenice. Kroměříž. 66 s.

Pavlíková, D., Balík, J., Pavlík, M., Tlustoš, P. 2007. Dusík v rostlině a jeho využití. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. s. 28-33.

Peterson, G. A., Lyon, D. J., Fenster, C. R. 2012. Valuing long-term field experiments: quantifying the scientific Contribution of a long-term tillage experiment. *Soil Science Society of America Journal*. 76. 757-765.

Planchet, E., Kaiser, W. M. 2006. Nitric oxide production in plants. *Plant Signaling and Behavior*. 1 (2). 46-51.

Popova, L., Tuan, T. 2010. Nitric oxide in plants: properties, biosynthesis and physiological functions. *Iranian Journal of Science & Technology*. 34 (A3). 173-183.

Powell, J., Klironomos, J. 2007. The ecology of plant-microbial mutualisms. In: Paul, E. A. (ed.). *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. Academic Press. Canada. p. 257-281. ISBN: 0-12-546807-5.

Powlson, D. S., Jenkinson, D. S. 1990. Quantifying inputs of non-fertiliser nitrogen into an agro-ecosystem. In: Harrison, A. F., Ineson, P., Heal O. W. (eds.). *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Elsevier Science Publishers LTD. England. p. 56-68. ISBN: 1-85166-388-6.

Procházková, D., Haisel, D., Pavlíková D. 2014. Nitric oxide biosynthesis in plants - the short overview. *Plant, Soil and Environment*. 60 (3). 129-134.

Prugar, J. (eds.) 2008: *Kvalita rostlinných produktů na prahu 3. tisíciletí. Výzkumný ústav pivovarský a sladařský*. Praha. 327 s. ISBN: 978-80-86576-28-2.

Przulj, N., Momcilovic, V. 2001. Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barely II. Nitrogen translocation. *European Journal of Agronomy*. 15. 255-265.

Rasmussen, P. E., Douglas, JR. C. L., Collins, H. P., Albrecht, S. L. 1998. Long-term cropping system effects on mineralizable nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 30. 1829-1837.

Raun, W. R., Johnson, G. V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*. 91 (3). 357-363.

Reay, D. S., Dentener, F., Smith, P., Grace, J., Feely, R. A. 2008. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geoscience*. 1. 430-437.

Rifat, H., Safdar, A., Ummay, A., Rabia, K., Iftikhar, A. 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology*. 60. 579-598.

Richter, R., Hlušek, J. 2006. Využití dusíku rostlinami z aplikovaných hnojiv. Sborník příspěvků z konference: Nové trendy v používání dusíkatých hnojiv. VÚRV. Praha. s. 5-14.

Rharrabti, Y., Villegas, D., Royo, C., Martos-Núñez, V., García del Moral, L. F. 2003. Durum wheat quality in Mediterranean environments II. Influence of climatic variables and relationships between quality parameters. *Field Crops Research*. 80. 133-140.

Robertson, G. P., Bruulsema, T. W., Gehl, R. J., Kanter, D., Mauzerall, D. L., Rotz, C. A., Williams, C. O. 2013. Nitrogen-climate interactions in US agriculture. *Biogeochemistry*. 114. 41-70.

Rosén, K. 1990. Measuring nutrient input to terrestrial ecosystems. In: Harrison, A. F., Ineson, P., Heal O. W. (eds.). *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Elsevier Science Publishers LTD. England. p. 1-10. ISBN: 1-85166-388-6.

Ross, S. M., Izaurrealde, R. C., Janzen, H. H., Robertson, J. A., McGill, W. B. 2008. The nitrogen balance of three long-term agroecosystems on a boreal soil in western Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 127. 241-250.

Ruiter, J. M. 1997. Prediction of effects of nitrogen management on barley quality for malting. *Proceedings Agronomy Society of N. Z.*, 27, s. 67 – 72.

Růžek, P. 1997. Použití dusíkatých hnojiv u obilnin. Sborník z konference: Racionální použití průmyslových hnojiv. ČZU. Praha. s. 51-54.

Růžek, P., Kusá, H., Vavera, R., 2009. Jarní hnojení dusíkatými hnojivy. *Zemědělec*. 11. s. 24 -25.

Růžek, P., Kusá, H., Vavera, R., 2010. Zakládání porostů obilnin s aplikací hnojiva k osivu. *Agromanuál*. 5 (8). s. 46 -47.

Růžek, P., Pišánová, J. 2007. Možnosti usměrnění přeměn N v půdě s využitím inhibitorů ureasy a nitrifikace. Sborník z konference: Racionální použití průmyslových hnojiv. ČZU. Praha. s. 34-38.

Scott, P. 2008. *Physiology and behaviour of plants*. John Wiley and Sons, Ltd. England. p. 299. ISBN: 978-0-470-85024-4.

Shaffer, M. J., Ma, L. 2001. Carbon and nitrogen dynamics in upland soils. In: Shaffer, M. J., Ma, L., Hansen, S. (eds.). *Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management*. CRC Press LLC. USA. p. 11-26. ISBN: 1-56670-529-0.

Shaviv, A. 2005. Environmental friendly nitrogen fertilization. *Science in China Ser. C Life Sciences*. 48. 937-947.

Shi, Z., Li, D., Jing, Q., Cai, J., Jiang, D., Cao, W., Dai, T. 2012. Effects of nitrogen applications on soil nitrogen balance and nitrogen utilization of winter wheat in a rice-wheat rotation. *Field Crops Research*. 127. 241-247.

Schipper, L. A., Gold, A. J., Davidson, E. A. 2010. Managing denitrification in human-dominated landscapes. *Ecological Engineering*. 36. 1503-1506.

Schmidt, S., Näsholm, T., Rentsch, D. 2014. Organic nitrogen. *New Phytologist*. 203. 29-31.

Schrock, R. R. 2008. Catalytic Reduction of Dinitrogen to Ammonia by Molybdenum: Theory versus Experiment. *Angewandte Chemie International Edition*. 47. 5512-5522.

Schrock, R. R. 2011. Molybdenum does it again. *Nature Chemistry*. 3. 95-96.

Schröder, J. J. Jansen, A. G., Hilhorst, G. J. 2005. Long-term nitrogen supply from cattle slurry. *Soil use and Management*. 21. 196-204.

Schuur, E. A. G. 2011. Nitrogen from the deep. *Nature*. 477. 39-40.

Sieling, K., Kage, H. 2006. N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape – winter wheat – winter barley rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 115. 261-269.

Slak, M. F., Commagnac, L., Lucas, S. 1998. Feasibility of national nitrogen balances. *Environmental Pollution*. 102. 235-240.

Smatanová, M. 2014. Sledování vlivu stupňované intenzity hnojení na výnosy plodin, na agrochemické vlastnosti půd a bilanci živin. Závěrečná zpráva z polní stacionární zkoušky za 5. osevní postup v letech 2006 - 2013. ÚKZÚZ. 54 s.

Smil, V. 1999a. Detonator of the population explosion. *Nature*. 400. 415.

Smil, V. 1999b. Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles*. 13 (2). 647-662.

Smil, V. 2004a. *Enriching the Earth. Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production*. The MIT Press, England. p. 338. ISBN:0-262-69313-5.

Smil, V. 2004b. The roots of nitrogen fixation. *Nature*. 431. 909-911.

Snyder, C. S. 2009. Nitrogen use efficiency: global challenges, trends and the future. *Nutrient use efficiency. XVIII Latin American Congress of Soil Science*. p. 10-17. 16-20 November 2009. Costa Rica.

Spieß, E. 2011. Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 91. 351-365.

Steege, M. W. T., Stulen, I., Mary, B. 2001. Nitrogen in the environment. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 379-397. ISBN: 3-540-67799-2.

Stevenson, F. J., Cole, M. A. 1999. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. John Wiley and Sons. p. 427. ISBN: 0-471-32071-4.

St. Luce, M., Whalen, J. K., Ziadi, N., Zebarth, B. J. 2011. Nitrogen Dynamics and Indices to Predict Soil Nitrogen Supply in Humid Temperate Soils. *Advances in Agronomy*. 112. 55-102.

Subbarao, G. V., Ito, O., Sahrawat, K. L., Berry, W. L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M., Rao, I. M. 2006. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems - challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 25. 303-335.

Sutton, M. A., Bleeker, A. 2013. The shape of nitrogen to come. *Nature*. 494. 435-437.

Sylvester-Bradley, R., Kindred, D. R. 2009. Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 60 (7). 1-13.

Šilha, J., Vaněk, V. 2003. Prostorová a časová variabilita obsahu přijatelného dusíku v půdě. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na setrvalý rozvoj a precizní zemědělství. ČZU. Praha. 53-57.

Tabuchi, M., Abiko, T., Yamaya, T. 2007. Assimilation of ammonium ions and reutilization of nitrogen in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*. 58 (9) 2319-2327.

Tarselli, M. A. 2012. Life and death with nitrogen. *Nature Chemistry*. 4. 686.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418. 671-677.

Tischner, R. 2000. Nitrate uptake and reduction in higher and lower plants. *Plant, Cell and Environment*. 23 (10). 1005-1024.

Tivy, J. 1987. Nutrient cycling in agro-ecosystems. *Applied Geography*. 7. 93-113.

Touraine, B., Daniel-Vedele, F., Forde, B. G. 2001. Nitrate uptake and its regulation. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 1-36. ISBN: 3-540-67799-2.

Trávník, K. 2011. Ověření různých systémů organického hnojení. Závěrečná zpráva ze stacionární polní zkoušky za osevní sled 2005 až 2010. ÚKZÚZ. Brno. 50 s.

Trčková, M., Raimanová, I., Růžek, P. 2006. Využití různých forem dusíku u obilnin při mimokořenové aplikaci. Sborník příspěvků z konference: Nové trendy v používání dusíkatých hnojiv. VÚRV. Praha. s. 32-35.

- Vaněk, V., Balík, J., Černý, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, J. 2012. Výživa zahradních plodin. Academia. Praha. 568 s. ISBN: 978-80-200-2147-2.
- Vaněk, V., Balík, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press. Praha. 224 s. ISBN: 978-80-86726-97-3.
- Vaněk, V., Balík, J., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press. Praha. 176 s. ISBN: 976-80-86726-25-0.
- Vaněk, V., Pavlíková, D., Balík, J., Tlustoš, P. 1997. Dusík v půdě a jeho přeměny. Sborník z konference: Racionální použití průmyslových hnojiv. ČZU. Praha. s. 8-14.
- Vaněk, V., Štípek, K., Šilha, J. 2001. Statková hnojiva a jejich použití. Úroda. dostupné z <http://uroda.cz/statkova-hnojiva-a-jejich-pouziti/>
- Váňová, M., Palík, S., Hajšlová, J., Burešová, I. 2006. Grain quality and yield of spring barley in field trials under variable growing conditions. Plant, Soil and Environment. 52 (5). 211 – 219.
- Vašák, F. 2016. Bilance fosforu a draslíku při různých systémech hnojení. Disertační práce. ČZU. Praha. 144 s.
- Vašák, F., Černý, J., Kulhánek, M., Shejbalová, Š., Zámečnicková, H., Balík, J. 2014a. Vliv dlouhodobého hnojení na kationtovou výměnnou kapacitu půd. Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. s. 112-115.
- Vašák, F., Černý, J., Shejbalová, Š., Kulhánek, M., Balík, J. 2014b. Porovnání půdní reakce v dlouhodobých polních pokusech. Úroda. 10. s. 44 – 47.
- Vos, J., Putten, P. E. L. 2000. Nutrient cycling in a cropping system with potato, spring wheat, sugar beet, oats and nitrogen catch crops. I. Input and offtake of nitrogen, phosphorus and potassium. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 56. 87-97.
- Vostal, J., Balík, J., Tesař, S. 1989. Bilance dusíku v zemědělství, II. část Pasivní složky. Vysoká škola zemědělská. Praha. 101 s.
- Vostal, J., Matousch, O. 1988. Bilance dusíku v zemědělství, I. část Aktivní složky. Vysoká škola zemědělská. Praha. 101 s.
- Wang, H. J., Huang, B., Shi, X. Z., Darilek, J. L., Yu, D. S., Sun, W. X., Zhao, Y. C., Chang, Q., Öborn, I. 2008. Major nutrient balances in small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas in China. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 81. 203-218.

Watson, C. A., Atkinson, D. 1999. Using nitrogen budgets to indicate nitrogen use efficiency and losses from whole farm systems: a comparison of three methodological approaches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 53. 259-267.

Wirén, N. von, Gojon, A., Chaillou, S., Raper, D. 2001. Mechanisms and regulation of ammonium uptake in higher plants. In: Lea, P. J., Morot-Gaudry, J. F. (eds.). *Plant Nitrogen*. Springer. Germany. p. 61-77. ISBN: 3-540-67799-2.

Yang, S. M., Malhi, S. S., Song, J. R., Xiong, Y. C., Yue, W. Y., Lu, L. L., Wang, J. G., Guo, T. W. 2006. Crop yield, nitrogen uptake and nitrate-nitrogen accumulation in soil as affected by 23 annual applications of fertilizer and manure in the rainfed region of Northwestern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*. 76. 81-94.

Zehr, J. P., Montoya, J. P. 2007. Measuring N₂ fixation in the field. In: Bothe, H., Ferguson, S. J., Newton, W. E. *Biology of the Nitrogen Cycle*. Elsevier. The Netherlands. p. 193-205. ISBN: 978-0-444-52857-5.

Zimolka, J., Edler, S., Hřivna, L., Jánský J., Kraus, P., Marečekk, J., Novotný, F., Richter, R., Říha, K., Tichý, F. 2005. *Pšenice, pěstování, hodnocení a užití zrna*. Profi Press. Praha. 180 s. ISBN: 80-86726-09-6.

9. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Humpolec

Příloha 2: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Lukavec

Příloha 3: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Červený Újezd

Příloha 4: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Suchdol

9.1 Přílohy

Příloha 1: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Humpolec

Varianta	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)	S (mg/kg)
Kontrola	1797,43	177,86	146,27	123,50	27,81
Kal	1772,43	206,46	139,27	102,50	25,06
Hnůj	1362,43	212,81	103,77	135,50	31,61
N	2137,43	203,28	161,77	124,50	23,71
NPK	1387,43	196,92	108,77	138,50	34,51
N+sláma	2007,43	220,76	149,27	145,50	53,56

Příloha 2: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Lukavec

Varianta	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)	S (mg/kg)
Kontrola	1112,43	312,39	85,77	198,00	27,56
Kal	992,43	277,43	73,17	192,50	26,86
Hnůj	1082,43	281,14	73,62	187,00	24,91
N	1077,43	288,02	81,32	202,00	29,21
NPK	1107,43	325,63	78,92	203,50	25,66
N+sláma	1302,43	315,57	93,27	197,00	26,11

Příloha 3: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Červený Újezd

Varianta	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)	S (mg/kg)
Kontrola	2487,43	213,87	143,77	119,00	22,71
Kal	2697,43	193,22	112,27	117,50	21,36
Hnůj	2372,43	166,20	99,27	116,50	23,06
N	2712,43	166,73	108,77	142,00	24,26
NPK	2587,43	186,86	106,77	165,50	22,16
N+sláma	2937,43	170,97	109,27	174,00	23,06

Příloha 4: Obsah živin v půdě před založením pokusu na stanovišti Suchdol

Varianta	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)	S (mg/kg)
Kontrola	5685,20	257,02	201,10	95,55	17,87
Kal	7925,20	230,70	186,60	71,70	17,47
Hnůj	8565,20	224,41	178,10	69,25	17,57
N	7200,20	250,72	176,10	68,95	16,62
NPK	8335,20	217,54	171,10	67,50	16,52
N+sláma	9730,20	218,69	172,10	63,40	18,57