

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Vliv hnojení na výnos zrna jarního ječmene a bilanci živin
v dlouhodobých polních pokusech**

Diplomová práce

**Jana Samešová
Rostlinná produkce**

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv hnojení na výnos zrna jarního ječmene a bilanci živin v dlouhodobých polních pokusech" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Jindřichu Černému, Ph.D. za jeho ochotu, odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas v průběhu zpracování diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala pracovníkům ÚKZÚZ Chrastava a ÚKZÚZ Brno za možnost podílet se na pokusu, zpřístupnění výsledků a za ochotu a čas věnovaný mým dotazům, a to zejména paní Janě Kaprálové, DiS. a v neposlední řadě mému bratroví Jakubu Vodičkovi za pomoc při zpracování vzorků.

Vliv hnojení na výnos zrna jarního ječmene a bilanci živin v dlouhodobých polních pokusech

Souhrn

Diplomová práce na téma „Vliv hnojení na výnos zrna jarního ječmene a bilanci živin v dlouhodobých polních pokusech“ se zaměřuje na vyhodnocení vlivu hnojení minerálními hnojivy na výnos, obsah prvků N, P a K v zrna a obsah K ve slámě jarního ječmene (*Hordeum vulgare* L.), dále na efektivitu využití N a její ukazatele a dynamiku obsahu minerálního N v půdě v průběhu vegetace. V diplomové práci byly hodnoceny výsledky dlouhodobých polních pokusů ze zkušební stanice ÚKZÚZ Chrastava. Pokusy byly prováděny v roce 2019 a 2021. Odebrané vzorky byly zpracovány v laboratořích ÚKZÚZ Brno a ČZU v Praze.

Výnos a obsah prvků v půdě a v zrna byl sledován u 12 variant, které byly v průběhu osmiletého osevního postupu dvakrát hnojeny kravským hnojem v dávce 40 t/ha a vápněny. V roce 2021 byly hnojeny pouze dusíkem ve třech hladinách (30, 45 a 60 kg N/ha) a v roce 2019 N, P a K ve třech hladinách. Varianty byly šestkrát opakovány a pokus obsahoval 72 parcel. Plocha jedné pokusné parcely byla rovna 15,26 m². Obsah minerálního N byl měřen třikrát v průběhu vegetace ve dvou hladinách (0-30 cm a 30-60 cm). U jednotlivých variant byla vypočtena efektivita využití dusíku (NUE) a její ukazatele.

Byl prokázán pozitivní vliv hnojení minerálními hnojivy na výnos zrna jarního ječmene. Dále byl prokázán vliv množství dostupného N na NUE. Hodnoty NUE se pohybovaly v rozmezí 26-84 kg/kg. Také byl prokázán vliv dostupného N na obsah N v zrna a K ve slámě, a také vliv obsahu K v půdě na obsah K ve slámě. V roce 2021 byly naměřené výnosy v průměru o 66 % nižší než v roce 2019 z důvodu méně příznivého průběhu ročníku. Nejvyšší výnos byl v roce 2021 naměřen u varianty 5, která byla hnojena ve středních hladinách, přičemž jako ekonomicky nejvýhodnější se osvědčila varianta 10 s výnosem, která byla hnojena v nejnižších hladinách.

Výsledky této diplomové práce poukazují na potřebu vyváženého hnojení pro dosažení co nejefektivnějšího využití N a potřebu kombinace minerálního hnojení s adekvátním vápněním pro dlouhodobé udržení kvality půdy a stabilních výnosů.

Klíčová slova: jarní ječmen; hnojení; dusík; výnos; bilance

Effect of fertilization on spring barley grain yield and nutrient balance in long-term field experiments

Summary

This diploma thesis on the topic of „Effect of fertilization on spring barley grain yield and nutrient balance in long-term field experiments“ is focused on evaluation of the effect of mineral fertilization on grain yield, content of N, P and K in grain and content of K in straw of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). Further it focuses on the nitrogen use efficiency and its indicators and dynamics of mineral nitrogen content in soil during vegetation. In this diploma thesis were evaluated the results of long-term field experiments from ÚKZÚZ (Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture) Chrastava. The experiments were conducted in 2019 and 2021. Laboratory results were processed in the laboratories of ÚKZÚZ Brno and Czech University of Life Sciences Prague.

The yield and mineral content in soil and grain were monitored in 12 variants, which were fertilized by cattle manure in dose of 40 t/ha and lime during the eight-year crop rotation. In 2021 they were fertilized in three levels only by N (30, 45 and 60 kg N/ha) and in 2019 by N, P and K in three levels. Variants occurred in 6 repeatings and the experiment contained 72 parcels. The area of one parcel was 15,26 m². Content of mineral N in soil was measured three times during vegetation in two different levels (0-30 cm and 30-60 cm). Nitrogen use efficiency (NUE) and its indicators were calculated for every variant.

Positive effect of mineral fertilization on yield of spring barley was proven. There was also proven the effect of the content of available N on NUE. Values of NUE ranged between 26-84 kg/kg. The effects of content of available N on content of N in grain and K in straw and the amount of K in soil on content of K in straw were also proven. The measured yields in 2021 were 66 % lower than in 2019 because of less favorable year. The highest yield was in 2021 reported on variant 5, which was fertilized in medium doses, while variant 10, which was fertilized in lowest doses, has proven to be the best solution from economic point of view.

Results of this diploma thesis point to the need of balanced fertilization for achieving of the most effective use of N and the need to combine mineral fertilization and adequate liming for sustainability of soil quality and stable yields.

Keywords: spring barley; fertilization; nitrogen; yield; nutrient balance

Obsah

1	Úvod	8
2	Vědecké hypotézy a cíle práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Význam dlouhodobých polních pokusů	10
3.2	Jarní ječmen	11
3.2.1	Fenologie ve vztahu k abiotickým stresům, kvalitě a výnosu.....	11
3.2.1.1	Obilka a její chemické složení.....	12
3.3	Rostlinné živiny	13
3.3.1	Dusík.....	13
3.3.1.1	Příjem dusíku.....	13
3.3.1.2	Distribuce dusíku v rostlině.....	14
3.3.1.3	Efektivita využití dusíku.....	15
3.3.1.4	Obsah dusíkatých látek v zrna.....	16
3.3.1.5	Dusíkatá hnojiva a strategie hnojení.....	17
3.3.1.5.1	Síra.....	18
3.3.2	Fosfor.....	19
3.3.2.1	Příjem fosforu.....	19
3.3.2.2	Distribuce fosforu v rostlině.....	20
3.3.2.3	Efektivita využití fosforu.....	20
3.3.2.4	Fosforečná hnojiva.....	21
3.3.3	Draslík.....	21
3.3.3.1	Příjem draslíku.....	22
3.3.3.2	Efektivita využití draslíku.....	22
3.3.3.3	Draselná hnojiva a strategie hnojení.....	22
3.3.4	Mikroprvky.....	23
3.4	Organická a statková hnojiva	23
3.4.1	Půdní organická hmota.....	24
4	Metodika	25
4.1	Použitý materiál	25
4.2	Cíle stacionární zkoušky	25
4.3	Popis stanoviště	25
4.4	Osevní postup	26
4.5	Kombinace hnojení	26
4.5.1	Dávky živin.....	26
4.6	Schéma parcel	27

4.7	Agrotechnické termíny	28
4.8	Ročník	28
4.9	Choroby	29
4.10	Popis odrůdy	29
4.11	Analýza materiálu	30
4.11.1	Půdní reakce	30
4.11.2	Mineralizace rostlinného materiálu	30
4.11.3	Stanovení celkového dusíku	31
4.11.4	Stanovení fosforu, draslíku, vápníku a hořčíku.....	31
4.11.5	Stanovení minerálního dusíku	32
4.12	Efektivita využití dusíku	32
4.12.1	Bilance dusíku	33
4.12.2	Agromická efektivita využití dusíku	33
4.12.3	Vnitřní efektivita utilizace dusíku	33
4.12.4	Dílčí faktor produktivity aplikovaného dusíku.....	33
4.13	Statistika	34
5	Výsledky	35
5.1	Výnosy	35
5.2	Dusík	36
5.2.1	Obsah minerálního dusíku v půdě	36
5.2.2	Efektivita využití dusíku.....	37
5.3	Obsah N, P, K v zrně a slámě	38
5.4	Půdní reakce a obsah Ca a Mg v půdě	39
5.5	Obsah P a K v půdě	40
6	Diskuze	41
6.1	Výnosy	41
6.2	Půdní reakce	43
6.3	Dusík	44
6.3.1	Obsah N _{min} v půdě	44
6.3.2	Efektivita využití dusíku.....	45
6.3.3	Ostatní ukazatele	47
6.3.4	Obsah dusíku v zrně	48
6.4	Obsah fosforu	49
6.5	Obsah draslíku	50
7	Závěr	52
8	Literatura	53
9	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Spolu s pšenicí (*Triticum aestivum* L.) je ječmen (*Hordeum vulgare* L.) druhou nejstarší obilninou provázející člověka od počátku zemědělství. Nejstarší zmínky o jeho pěstování jsou dochovány z oblasti dnešního Iráku. Za oblast původu je považována Asie a zejména oblast tzv. úrodného půlměsíce. (Zimolka 2006).

Jarní ječmen po ozimé pšenici zaujímá druhou největší plochu v České republice mezi obilninami. V roce 2007 činila plocha jarního ječmene v České republice 369 177 hektarů s výnosem 3,44 tun na hektar. Do roku 2020 se tato plocha zmenšila na 217 279 hektarů, avšak výnos se zvýšil na 5,15 tun na hektar (Český statistický úřad 2021).

Jarní ječmen je plodinou s poměrně krátkou vegetační dobou 90-130 dnů. Jeho kořenový systém je slabý a málo aktivní a nachází se převážně v horních 30 cm vrstvy půdy. Z těchto důvodů se hůře vyrovnává se stresovými faktory jako jsou stresy vyvolané podmáčením, zasolením, suchem a nízkými či vysokými teplotami. Vývoj jarního ječmene je výrazně ovlivněn podmínkami stanoviště, vláhovými a teplotními podmínkami v průběhu vegetace, systémem agrotechniky, délkou a intenzitou osvětlení a výživou. Pro zajištění výnosu a kvality je nutné jarní ječmen vhodně zařadit do osevního postupu, zajistit ochranu během vegetace a přizpůsobit hnojení (Zimolka 2004; Hossain et al. 2012).

Dusík je po uhlíku, kyslíku a vodíku nejhojnějším prvkem v rostlinách. Protože se v České republice jarní ječmen pěstuje zejména pro sladovnické účely, má nižší nároky na dusík v porovnání s ostatními obilninami, a to z důvodu požadavků na kvalitu zrna při výkupu. Dle normy ČSN 46 1100-5 obsah dusíkatých látek v zrně nesmí přesáhnout 12 %. Aby bylo dosaženo těchto požadavků, zemědělci pěstují ječmen v prostředí s nižším množstvím dostupného dusíku než u ostatních obilnin (Anbessa & Juskiw 2012).

Efektivní hnojení a využití dusíku je nezbytné pro zemědělskou produkci a ochranu životního prostředí, proto se zlepšení efektivity využití dusíku (NUE) stalo žádaným cílem v oblasti výzkumu ječmene. NUE je výsledkem podílu výnosu zrna a množství přístupného dusíku. Pro další hodnocení bilance dusíku lze vypočítat agronomickou efektivitu aplikovaného dusíku, efektivitu „znovuzískání“, efektivitu utilizace dusíku a další. Bilance živin je málo využívána v praxi, což je způsobeno především neznalostí používaných metod a také pracovní náročností při výpočtech (Balík et al. 2012).

V počátečních fázích růstu je ječmen náročný na dostatek fosforu, který zabezpečuje intenzivnější dýchání. Při jeho nedostatku dochází ke snížení míry odnožování a stébla jsou slabě vyvinutá a krátká. V období odnožování vyžaduje ječmen více dusíku, avšak jeho nadbytek způsobuje nárůst neproduktivní nadzemní biomasy. Příjem draslíku je v průběhu vegetace plynulý, zlepšuje zdravotní stav rostlin a kvalitu zrna. Avšak jeho nadbytek omezuje tvorbu odnoží. Jarní ječmen vyžaduje tedy vyšší pečlivost při plánování systému hnojení (Zimolka 2004).

2 Vědecké hypotézy a cíle práce

Výchozími vědeckými hypotézami pro tuto diplomovou práci byly:

- 1) Se zvyšujícím se množstvím pro rostliny přístupného dusíku v půdě se bude snižovat efektivita využití dusíku.
- 2) Se snižujícím se pH půdy se bude snižovat efektivita využití dusíku.
- 3) Efektivita využití dusíku bude závislá na obsahu ostatních makroprvků (P, K) v půdě.
- 4) Se zvyšujícím se množstvím dostupného dusíku se bude snižovat obsah draslíku v zrna a bude se zvyšovat jeho obsah ve slámě.

Cílem práce bylo vyhodnotit vliv dlouhodobého systému hnojení na výnos, obsah vybraných makroprvků v zrna a slámě jarního ječmene a efektivitu využití N a její další ukazatele. Dále bylo cílem porovnat výsledky stejného pokusu za roky 2019 a 2021 a vyhodnotit dynamiku obsahu minerálního N v různých hladinách v průběhu vegetace.

3 Literární rešerše

3.1 Význam dlouhodobých polních pokusů

Dlouhodobé polní pokusy již mnohokrát dokázaly a stále dokazují svou relevantnost pro výzkum v zemědělství. Základním cílem tohoto výzkumu je zvyšování výnosů a zlepšování způsobů zpracování půdy pro udržitelnost zemědělství.

Hodnota kvalitně vedených experimentů s časem stoupá a současně s ní i náklady vynaložené na jejich provoz. Avšak efektivnost nákladů se zvyšuje, pokud pokusy slouží více záměrům a mají jasně stanovenou metodiku, která umožňuje, aby výsledky byly využitelné v co nejširším spektru možností. Mezi tyto záměry patří otestovat udržitelnost zemědělských systémů v dlouhodobém časovém rozpětí, monitorovat vlivy klimatických změn, zajistit aktuálnost experimentů se změnami v systémech hospodaření, archivovat půdní a rostlinný materiál pro další výzkum procesů, jež ovlivňují úrodnost půdy a výnos a kvalitu plodin. Dále je zde snaha zajistit realistické zhodnocení vlivu zemědělských procesů na životní prostředí a poskytnout data z co nejdějšího časového období, která mohou být dále využita pro vytvoření matematických modelů, jež by mohly být použity například k předpovídání vlivu klimatických změn na složení půdy a její úrodnost (Johnston & Poulton 2018).

Vědci si uvědomovali význam dlouhodobých polních pokusů již před více než 100 lety. Záslouhou těchto vědců a generací po nich následujících, jež tyto pokusy nadále udržovaly a analyzovaly, jsou dnes k dispozici soubory výsledků, které mají nevyčíslitelnou hodnotu pro současný výzkum a udržitelnost zemědělství.

Nejstarší pokusy se nacházejí v Rothamstedu v Anglii a za svou existenci vděčí dvojici vědců Johnu Bennetu Lawesovi a Josephu Henrymu Gilbertovi. Ti nejenže založili několik dlouhodobých polních pokusů v období od roku 1843 do 1856, ale zároveň je po dosažení svých prvotních záměrů zachovali. Mezi prvními pokusy založenými v roce 1843 byly velké polní pokusy na ozimé pšenici (*Triticum aestivum* L.) (Johnston & Poulton 2018).

Na rok 2002 připadlo 100. výročí od založení Static Fertilization Experiment v Bad Lauchstädt (Německo). V roce 2009 to bylo 50 let od založení dlouhodobých polních pokusů v Groß Kreutz (Německo) a 60 let od založení těchto pokusů v České republice (Körschens 2006).

Nedostatečné využití výsledků z dlouhodobých polních pokusů je nezodpovědné a má za následek újmu na potenciálním přínosu pokusů pro vědu. Přestože jsou tyto pokusy velmi nákladné, stále patří mezi nejefektivnější metody výzkumu. Záslouhou znalostí z nich získaných mohli farmáři v průběhu posledních desetiletí zdvojnásobit výnosy, zlepšit kvalitu svých produktů a ochranu životního prostředí a zajistit tak dostatečné množství potravy pro stále se zvyšující množství obyvatel (Körschens 2006).

3.2 Jarní ječmen

Spolu s pšenicí je ječmen druhou nejstarší obilninou provázející člověka od počátku zemědělství. Nejstarší zmínky o jeho pěstování jsou dochovány z oblasti dnešního Iráku. Za oblast původu je považována Asie a zejména oblast tzv. úrodného půlměsíce. Odhaduje se, že na našem území se ječmen začal pěstovat okolo roku 500 př.n.l. V té době byl užíván jako chlebovina. Na počátku rozvoje pivařství u nás jako surovina pro sladování převládala pšenice. Avšak s nárůstem výroby piva v 17. století byla pšenice postupně vytlačena ze sladovnictví a přešlo se na vaření piva z ječného sladu (Zimolka 2006).

V roce 2007 činila plocha jarního ječmene v České republice 369 177 hektarů s výnosem 3,44 tun na hektar. Do roku 2020 se tato plocha zmenšila na 217 279 hektarů, avšak výnos se zvýšil na 5,15 tun na hektar (Český statistický úřad 2021).

3.2.1 Fenologie ve vztahu k abiotickým stresům, kvalitě a výnosu

Fenologie rostlin charakterizuje průběh fenologických fází rostlin a vliv sezónních a meziročních změn klimatu a podmínek prostředí na tyto fáze. Průběh různých fází vývoje, jako jsou metání a období vývoje zrna, může výrazně ovlivnit výnos a kvalitu ječmene. Tyto fáze jsou regulovány podmínkami prostředí, tedy teplotou či denními stupni růstu, délkou a intenzitou osvětlení a výživou. Délka vegetačního období je důležitá pro adaptaci ječmene na různé abiotické stresy, jako jsou stresy vyvolané podmáčením, zasolením, suchem a nízkými či vysokými teplotami.

Vývoj ječmene má tři hlavní fáze: od vzcházení po sloupkování, od sloupkování po metání a od metání po zrání. V první fázi, která je vegetativní, dochází k tvorbě listů, kořenů a odnoží. Agronomická významnost této fáze spočívá ve tvorbě biomasy. Ve druhé fázi je ukončena vegetativní fáze a je zahájena fáze generativní. Nastává reproduktivní růst, metání, prodlužování stébla a tvorba klasů, což je určující pro konečný výnos zrna. Ve třetí fázi dochází k nalévání zrn. Tato fáze ovlivňuje velikost a hmotnost zrn a zároveň kvalitu. Všechny tři fáze jsou regulovány zejména genetickými vlastnostmi, podmínkami prostředí a způsobem hospodaření (Hossain et al. 2012).

Vlivem různých systémů agrotechniky na výnos a strukturu výnosu u jarního ječmene se věnuje Klikocka et al. (2014), který srovnává konvenční a bezorebný systém zpracování v kombinaci s hnojením NPK obohaceným o S a Mg. Výnos zrna na hektar plochy pozitivně koreluje s počtem klasů, počtem zrn v klasu, hmotností tisíce zrn a výškou rostlin a konvenční systém má jednoznačně pozitivní vliv na výnos a jeho strukturu. Avšak vedle systému zpracování ovlivňuje výnos průběh ročníku, podmínky stanoviště, úroveň hnojení a další faktory. Klikocka et al. (2014) tvrdí, že bezorebný systém zpracování může být ekonomicky výhodnější, protože vynechání podzimní orby v některých případech plně kompenzuje redukci výnosu u jarního ječmene.

Dle Schelling et al. (2003), kteří se zabývali fenologickým a meteorologickým vlivem na výnos jarního ječmene, lze výnos zrna nejlépe odhadnout na základě průměrných denních teplot a relativní vlhkosti vzduchu. Stanovil, že optimální průměrná denní teplota během vegetačního období se pohybuje v rozmezí 14°C až 18°C, přičemž při poklesu průměrné denní teploty o 1°C se výnos zredukuje o 4,1-5,7 %. Výsledky jeho práce naznačují, že relativní vlhkost vzduchu

v období nalévání zrn může být vhodnějším parametrem pro popis vlivu stresu způsobeného suchem v období od metání po žlutou zralost zrna než množství spadlých srážek.

Důležitými faktory prostředí, které ovlivňují vývoj jednotlivých fází ječmene, jsou teplota a fotoperioda. Oba se současně mění v polních podmínkách. Tato variabilita má vliv na dobu kvetení a následně výnos. Teplota je velmi důležitá pro všechny fyziologické procesy v rostlině, a to zejména ve dnech tvorby klásku, metání a kvetení. Rychlost iniciace orgánů u ječmene lineárně roste s teplotou, přičemž teplotní optimum je 25–30 °C. Při stresu způsobeném vysokými teplotami dochází k rychlému vyčerpání dostupné vody skrze zvýšenou evapotranspiraci a je redukována výška rostlin, akumulace biomasy a výnos zrna. Fotoperioda je také klíčovým faktorem, který může výrazně ovlivnit délku fáze vroubkování klásku a fáze prodlužování stébla. Základní hranicí, pod kterou nedochází k iniciaci kvetení, je 8-10 hodin slunečního svitu (Hay & Ellis 1998; Hossain et al. 2012).

Solární energie zachycená listy poskytuje energii pro fotosyntézu, a proto je stěžejní pro tvorbu biomasy po vyčerpání energetických zásob obsažených v semeni. Schopnost listů zachytit fotosynteticky aktivní záření (PAR) je určující pro produktivitu plodin. Index listové plochy (LAI), tedy listová plocha vyskytující se nad určitou jednotkou půdy, je často užívaným parametrem pro charakterizaci schopnosti plodiny zachycovat PAR. Pokud se hodnota LAI pohybuje v rozmezí 3-5, tak je ječmeni umožněno zachytit 95 % PAR. Překročení těchto hodnot vede k vzájemnému zastínění, a tím ke ztrátě fotosyntetické produkce spodních pater porostu. Pro tvorbu biomasy je podstatné, aby bylo dosaženo optimální hodnoty LAI, co nejdříve během vegetace. Hodnota LAD (leaf area duration), tedy množství listové plochy vyskytující se na jednotce plochy půdy za určitý čas, je kvalitativním ukazatelem, který však nepodává informace o množství fotosynteticky aktivní plochy. Nehledě na interpretaci hodnoty LAD, byl zaznamenán pozitivní vztah mezi hodnotou LAD a produktivitou některých plodin (Petr & Hradecka 1993; Peltonen-Sainio et al. 1997).

Dle Peltonen-Sainio et al. (1997) lze dosáhnout ideální hodnoty LAI v raných fázích vegetace jařin pomocí aplikace dusíkatých hnojiv, která urychlují rozšiřování listové plochy, a to zejména v období od odnožování do sloupkování. Při pokusech prováděných na jařinách došel k závěru, že je možné strukturu porostu ovlivnit množstvím aplikovaného N hnojiva a zeleného hnojení. Avšak nezaznamenal korelaci mezi výnosem a takto upraveným porostem.

3.2.1.1 Obilka a její chemické složení

Obilka, či zrno, se skládá ze tří částí: obalů, endospermu a zárodku. Zakrnělý vrchol osy klásku, který z vnější strany přiléhá k podélné rýze obilky, se nazývá bazální stětička. Její obrvení slouží jako rozlišovací znak některých odrůd ječmene. Plucha s pluškou společně chrání obilku před vnějšími vlivy a filtračních vlastností pluch se využívá při vaření piva, kde tvoří podstatnou část mláta. Pod pluchou a pluškou se nachází oplodí (perikarp), které je pevně srostlé s o semením (testa). Ta obalují celý vnitřek zrna, tedy zárodek a endosperm.

Ideální obsah vody ve vyzrálé obilce je 12–14 %. Pokud obsahuje nižší procento vody, má to negativní vliv na technologickou jakost, protože voda je součástí protoplazmy buněk. Vyšší vlhkost způsobuje problémy při skladování. Obsah minerálních látek v sušině se uvádí kolem 2 %, přičemž největší koncentrace je v obalových vrstvách obilky. Nejvíce jsou zastoupené prvky N, P, K, Si a Mg a v menším množství potom Ca, Fe, Al, Na a Mo. Největší

část složení zrna představuje škrob (amylóza a amylopektin), tedy 60–65 %, který je během klíčení enzymaticky štěpen pomocí enzymů z aleuronové vrstvy na jednodušší a snáze transportovatelné formy sacharidů. Dále se zde v množství menším než 2 % nachází nízkomolekulární sacharidy (např. sacharóza, maltóza, rafinóza a další cukry), hemicelulózy (neškrobnaté polysacharidy), mezi které patří také β – glukany (3,3 – 4,9 %) a celulóza (4 - 7 %), tedy vláknina, která je pro lidské tělo těžko stravitelná a je jen částečně fermentována v tlustém střevě (Zimolka 2006; Wang 2017).

3.3 Rostlinné živiny

Rostlinné živiny se z hlediska obsahu prvků v rostlině dělí na makroprvky, mikroprvky a prvky užitečné. Mezi makroprvky se řadí prvky takové, které se vyskytují v rostlinách od několika desetin do desítek procent. Do této skupiny patří C, H, O, N, P, K, Ca, Mg a S. Zatímco prvky C, H a O jsou přijímány v plynné a kapalné formě (H_2O , CO_2 nebo O_2 , C může být přijímán také ve formě kapalného aniontu HCO_3^-) a jsou nejdůležitějšími stavebními kameny organických molekul. Mikroprvky zastávají v rostlině zpravidla menší obsah než 0,05 % a často jsou uváděny v ppm (tedy parts per milion). Mezi ně patří Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl a Ni. Pro prvky užitečné je typické, že se v rostlině mohou vyskytovat v různých koncentracích, avšak jejich přítomnost není nutná pro všechny rostlinné druhy. Patří sem například Na, Al, Si aj. Charakteristickými znaky živiny je její nezbytnost, nezastupitelnost a přímé zapojení do metabolismu rostliny (Vaněk et al. 2016).

3.3.1 Dusík

Dusík se vyskytuje hojně v zemské atmosféře, avšak na rozdíl od uhlíku nemůže být přímo asimilován rostlinami. Omezení, která tento fakt klade na produktivitu rostlin, jsou obcházena v současném zemědělství produkcí a aplikací minerálních hnojiv. Výroba těchto hnojiv však spotřebovává velké množství energie a reaktivní N, který je uvolňován do životního prostředí skrze aplikace N hnojiv, vede ke zvýšení emisí skleníkových plynů a k rozsáhlé eutrofizaci vodních zdrojů. Dopady na životní prostředí jsou v mnoha částech světa zesíleny neuváženým používáním hnojiv (Rogers & Oldroyd 2014).

Světová populace se rapidně rozšířila z 2,5 miliardy obyvatel v roce 1950 na 7,7 miliardy v roce 2019 (United Nations 2019). Požadavky na zvýšení produkce potravin spojené s tímto nárůstem byly částečně uspokojeny během zelené revoluce v 60. letech minulého století, kdy se v mnoha částech světa podstatně navýšily výnosy díky zvýšenému používání chemických hnojiv a vyšlechtění odrůd s vyššími výnosy. Zároveň však omezení ve výrobě a zásobování chemickými hnojivy v některých částech světa vede k nízké zemědělské produktivitě a s tím spojené podvýživě obyvatel (Rogers & Oldroyd 2014).

3.3.1.1 Příjem dusíku

Většina rostlin přijímá dusík z půdy v nitrátové formě (NO_3^-). Amonný kationt NH_4^+ je poután na půdní sorpční komplex a je málo pohyblivý v půdním roztoku. Jeho přeměna na NO_3^- nastává až po prohřátí půdy nad 10 °C. Kořeny přijímají NO_3^- aktivně ve směru elektrochemického gradientu při nižším pH. Tyto dusičnany z velké části pocházejí

z aplikovaných minerálních hnojiv, bakteriální nitrifikace či přirozeně z biologické fixace N. Využití N rostlinami se skládá z několika kroků, které zahrnují příjem, asimilaci, translokaci a remobilizaci (Good 2004).

Poté, co je NO_3^- přijat z půdy, je buď uložen v kořenovém systému rostlin či translokován do nadzemních částí rostliny skrze xylém. Vysoké koncentrace NO_3^- se vyskytují ve vakuolách. Před tím, než může být NO_3^- metabolizován, musí dojít k jeho redukcí na NH_3 . Redukce nitrátů se dělí na dvě po sobě jdoucí části, a to na redukcí NO_3^- na NO_2^- pomocí nitrátreduktázy (NR) a redukcí NO_2^- na NH_3 pomocí nitritreduktázy (NiR). Po první redukcí pomocí NR je NO_2^- translokován z cytoplazmy do chloroplastu, kde dochází k druhé redukcí pomocí NiR na NH_3 . Expze genu NR je ovlivňována několika endogenními a vnějšími faktory v rostlině a je vysoce regulována při transkripci, translaci a post-translaci. Nadměrná expze genu NR či NiR snižuje hladinu dusičnanu ve tkáních a zvyšuje jeho příjem. Avšak takto zvýšený příjem N nezvyšuje výnos nebo nárůst biomasy rostlin, a to nezávisle na množství dostupného N (Meyer & Stitt 2001).

3.3.1.2 Distribuce dusíku v rostlině

Dusík je po uhlíku, kyslíku a vodíku nejhojnějším prvkem v rostlinách. N je komponentem mnoha rostlinných enzymů, stavebních bílkovin, chlorofylu, adenosintrifosfátu (ATP) a nukleových kyselin (DNA, RNA). Protože N je složkou chlorofylu a zároveň enzymu Rubisco, který váže uhlík z CO_2 , je obsah N nepřímým determinantem míry fotosyntézy, akumulace sušiny a ekonomického výnosu. Z tohoto důvodu je dostupnost N pro rostliny během vegetace stěžejní pro zajištění biologických funkcí a dobrého výnosu plodin (Evans 1983).

Předpokládá se, že tok dusíku a jeho alokace v rostlinách jsou závislé na schopnosti daných rostlinných orgánů (sinků) importovat dostupný N ze „zdrojových“ orgánů. Protože N je hlavní stavební složkou aminokyselin, které jsou potřebné při syntéze bílkovin a souvisejících složek, sehrává N roli téměř ve všech metabolických procesech v rostlině. Během vývoje rostliny je tok dusíkatých látek směřován do nových listů, rozvíjejících se vzrostných vrcholů, tvořících se pupat a květů a později plodů a semen, kde dochází k metabolickým procesům (Egle et al. 2015).

Rostliny ječmene trpící nedostatkem dusíku vytvářejí větší kořenový systém s širším větvením. Naopak růst nadzemní části je omezen a míra fotosyntézy se snižuje, protože je urychleno stárnutí listů. Akumulují se uhlovodíky uložené v listech, zejména škrob, a také sekundární metabolity, jako jsou fenylypropanoidy, antokyany a flavonoidy (Comadira et al. 2015).

Jarní ječmen má nižší nároky na dusík než ostatní obilniny, a to z důvodu požadavků na kvalitu zrna při výkupu. U sladovnického ječmene jsou striktní požadavky na nízký až mírný obsah bílkovin v zru. Dle normy ČSN 46 1100-5 obsah N látek v zru nesmí přesáhnout 12 %. Aby bylo dosaženo těchto požadavků, zemědělci pěstují ječmen v prostředí s nižším množstvím dostupného N než u ostatních obilnin. Také krmný ječmen se užívá primárně jako energetické krmivo, ne jako zdroj bílkovin, a proto producenti krmiv nevyžadují vysoký obsah bílkovin v zru (Anbessa & Juskiw 2012).

3.3.1.3 Efektivita využití dusíku

Efektivní hnojení N je nezbytné pro zemědělskou produkci a zároveň ochranu životního prostředí. Z tohoto důvodu se zlepšení efektivity využití dusíku (NUE - *Nitrogen use efficiency*) stalo žádaným cílem v oblasti výzkumu ječmene. NUE v plodinách je ovlivňována příjmem N z půdy, asimilací N v rostlině a přerozdělováním N z vegetativních orgánů rostliny do zrna (Andersson & Holm 2011).

Raun a Johnson (1999) uvádějí, že světová hodnota NUE je přibližně rovna 33 %. Hodnoty naměřené Chien et al. (2016) se pohybují v rozmezí 30-50 %. To potvrzuje i Dobermann (2005) a Good (2004). Z toho vyplývá, že 50-70 % dodaného N je ztraceno ze systému půda-rostlina.

Za NUE se obecně pokládá podíl výnosu zrna a množství přístupného N (půdní N a N dodaný hnojivy). Jednotkou NUE jsou kilogramy zrna na kilogram N na hektar, tedy kg/kgN/ha. Tento způsob měření ohodnocuje míru konverze dodaného N do výnosu zrna (Moll et al. 1982).

Proces konverze dodaného N do výnosu zrna zahrnuje sérii kroků a může být rozložen na několik různých částí (viz Schéma č.1). Dle toho může být navýšení NUE výsledkem zvýšení efektivity obnovy dostupného N v půdě (efektivita příjmu) a efektivity využití N přijatého pro tvorbu zrna (efektivita využití) (Moll et al. 1982). Dále je NUE funkcí vyprodukované sušiny na jednotku přijatého N (efektivita produkce biomasy) a funkcí efektivity této sušiny prezentované v ekonomickém výnosu zrna (sklizňový index). Z praktických důvodů se NUE uvádí v kg zrna/kgN/ha, avšak detailní analýza NUE se zakládá na různých dílčích komponentech, které zahrnují efektivitu příjmu N, efektivitu produkce biomasy a sklizňový index (Anbessa & Juskiw 2012).

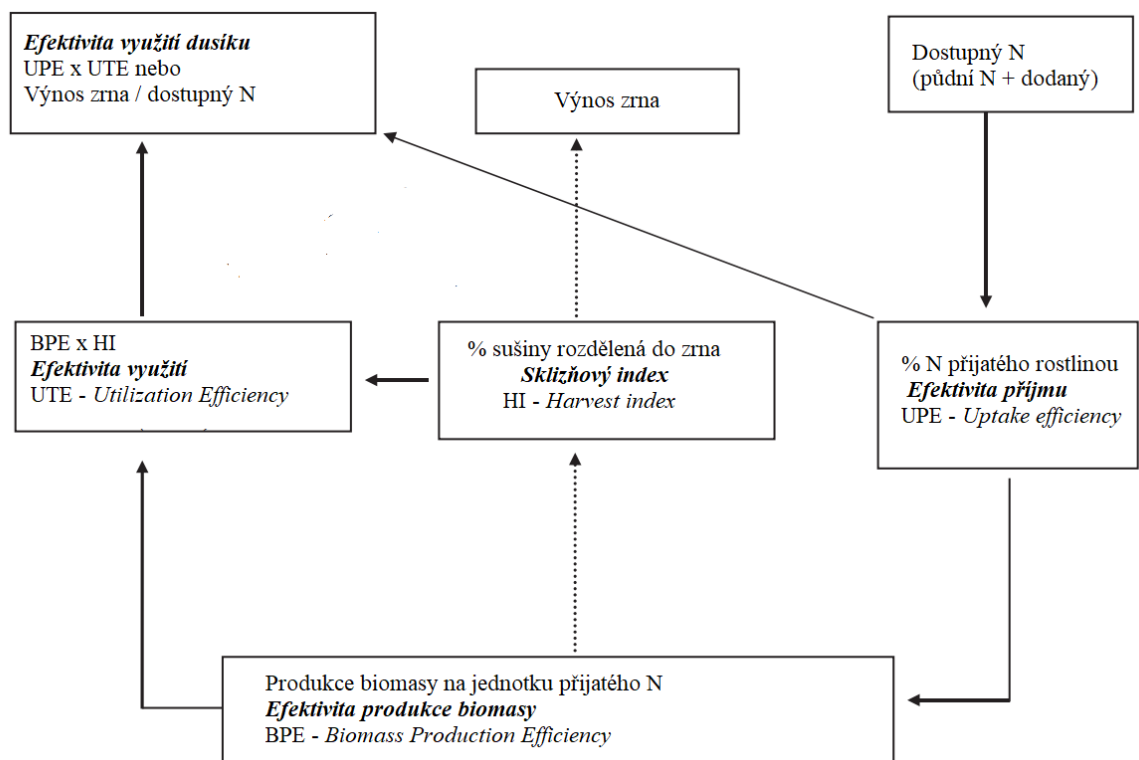


Schéma č.1 - Schéma efektivity využití dusíku dle Anbessa & Juskiw (2012)

Dalším z postupů při hodnocení bilance N je vypočítání agronomické efektivity aplikovaného N (**AE-N**). Ta je počítána jako rozdíl přírůstku výnosu na hnojené variantě v porovnání s výnosem na nehnojené variantě ve vztahu k aplikované dávce N, neboli o kolik se zvýší přírůstek sušiny hlavního produktu po aplikaci jednoho kilogramu N. Dále lze přesněji sledovat vliv aplikovaného N při posouzení aplikovaného N v hnojivech a odběrem N ve slámě a zrna. Tato efektivita „znovuzískání“ dusíku (**RE-N**) je počítána jako rozdíl z odběru N na hnojené variantě v porovnání s odběrem N na nehnojené variantě a ve vztahu k aplikované dávce N. Tímto způsobem je možné vyhodnotit podíl přímého působení N z aplikovaných hnojiv. Zbývající část N prochází přes mineralizačně-imobilizační koloběh N v půdě (Balík et al. 2012).

Pro srovnání reakce plodiny na aplikovaná N hnojiva a využití N porostem lze z podílu výnosu a odběru N ječmenem vypočítat vnitřní efektivitu utilizace N (**IE-N**). Tato charakteristika nezahrnuje vliv stanoviště a má pouze informativní charakter, zda obsah N odpovídá danému výnosu. Hodnota IE-N se pohybuje v rozmezí 30-90 kg/kg, přičemž optimální rozsah je 55-65 kg/kg. Vysoké hodnoty IE-N poukazují na deficit N a hodnoty nízké značí nízkou konverzi N vlivem jiných faktorů, jako je nedostatek živin či vláhový deficit. Dalším z postupů v bilancování N a vlivu hnojení na výnos je výpočet dílčího faktoru aplikovaného N (**PFP-N**). PFP-N je ve výživářských pokusech počítán jako součet AE-N s podílem výnosu na kontrolní variantě a aplikovaného množství N. V tomto postupu je ve srovnání s postupem výpočtu IE-N zahrnut i vliv stanoviště. Při aplikaci minerálních hnojiv se hodnoty PFP-N pohybují v rozmezí 40-80 kg/kg. Na úrodných stanovištích či v systémech s dobrým systémem hospodaření dosahuje PFP-N hodnot nad 60 kg/kg (Dobermann 2007).

Bilance živin je v zemědělství málo využívána v praxi. To je způsobeno především neznalostí možných používaných metod a také pracovní náročností při komplexních výpočtech. Některé podniky nemají možnost či čas měřit konkrétní údaje pro dané stanoviště a počítají pouze s odhady. Na druhou stranu jsou N hnojiva mnohdy užívána nevhodně, nehledě na možné ztráty N po aplikaci hnojiv či skutečné využití N porostem.

Možným řešením, jak navýšit NUE, je systém CULTAN, tedy kontrolovaný příjem dlouhodobé amonné výživy. Tento systém spočívá v injektáži hnojiva s vysokým podílem N v amonné formě do kořenového prostoru rostlin. Pozitivní náboj amonného kationtu a jeho vysoká koncentrace v místě injektáže má za následek vyšší stabilitu hnojiva v půdě, což může navýšit NUE. Avšak při porovnání systému CULTAN s konvenčním způsobem hnojení Sedlář et al. (2013) nebyly zaznamenány žádné významné rozdíly v porovnávaných hodnotách. Dalším způsobem, jak navýšit NUE, může být snížení ztrát N z aplikovaných hnojiv do prostředí skrze aplikaci hnojiv s pomalu uvolnitelným N či použití inhibitorů nitrifikace (Ladha et al. 2005).

3.3.1.4 Obsah dusíkatých látek v zrna

Zásobní bílkovinu v zrna ječmene představuje hordein. Shewry et al. (2001) rozdělují hordein na čtyři různé frakce (A až D) dle velikosti a složení aminokyselin. A-hordeiny jsou zásobní bílkoviny, které obsahují proteázu a inhibitory alfa-amylázy. B-hordeiny jsou bohaté na S a tvoří okolo 80 % všech hordeinů. Dále rozdělují C-hordeiny, které mají nízký obsah S a

tvoří 10-30 % celkového hordeinu, a D-hordeiny s vysokou molekulární hmotností. Pro výpočet obsahu dusíkatých látek (NL) v zrně se u ječmene používá koeficient 6,25. Tento koeficient je odvozen od průměrného obsahu N v bílkovinách, který je 16 %. Pokud tedy zrno obsahuje 11 % dusíkatých látek, tak z výpočtu 11 % NL : 6,25 vychází, že v 1 tuně zrna je 17,6 kg N. Lze předpokládat, že množství aplikovaných N a S hnojiv bude mít vliv na kompozici těchto bílkovin v zrně, a tím následně na zpracování a sladovnickou kvalitu (Černý et al. 2020).

Při porovnání vlivu různých kombinací dusíkatých hnojiv a kombinací N hnojiv se S od 30 do 50 kg/ha došla Dostálová et al. (2015) k závěru, že hnojení výrazně navýšilo výnos v porovnání s nehnojenou kontrolou, avšak rozdíly mezi jednotlivými kombinacemi výrazné nebyly. Obsah N látek v zrně byl výrazně ovlivněn ročníkem. Během pozorování byl v roce s nejvyšším množstvím srážek naměřen nejvyšší výnos, i nejvyšší obsah škrobu, hmotnost zrn a objem zrn. Obsah N látek byl optimální a pohyboval se v rozmezí 10 - 11,5 %. Naopak v roce s nižším množstvím srážek a průměrnými teplotami dosahovaly tyto technické parametry nižších hodnot. Největší množství A- a B-hordeinu se vyskytovalo v zrně sklizeném na nehnojené kontrolní parcele. To lze vysvětlit tím, že od období kvetení se koncentrace N v rostlině snižuje, zejména z důvodu přibývajících sušiny, a dochází ke zřed'ovacímu efektu. U nehnojené kontroly je výnos nízký, v zrně je koncentrován N a zřed'ovací efekt zde nepůsobí. Pokud rostliny trpí tzv. „terminálním suchem“, tedy suchem v období plnění zrn, snižuje se výnos a kvalita. Zvyšuje se obsah zárodečných bílkovin v zrně, což je způsobeno změnou v metabolismu škrobu. Proces ukládání škrobu je citlivý na sucho. Zvýšení obsahu dusíkatých látek v zrně je nejspíše způsobeno nižším obsahem škrobu, než zvýšením obsahu bílkovin (Černý et al. 2020).

3.3.1.5 Dusíkatá hnojiva a strategie hnojení

Minerální syntetická dusíkatá hnojiva jsou hlavním zdrojem světové produkce N. Existují však další důležité zdroje N, například biologická fixace N, statková hnojiva či rozklad rostlinných zbytků. V roce 1965 byla světová spotřeba čistého N v hnojivech 18,7 milionů tun. K roku 2015 se tato spotřeba zvýšila na 106 milionů tun ročně a od tohoto roku spotřeba N mírně klesá (Fernández 2022). Při pěstování obilnin je však méně než polovina aplikovaného N navracena v zrně. Zbývající N je zabudován do půdní organické hmoty či je ztracen ze zemědělské půdy skrze erozi, povrchový smyv a volatilizaci (NH_3 , N_2O , NO , NO_2 či N_2). Tyto ztráty N negativně ovlivňují životní prostředí tím, že způsobují eutrofizaci místních vod, kontaminaci podzemních vod nitráty a zvyšují koncentraci skleníkových plynů. Z důvodu těchto negativních vlivů je na zemědělce vyvíjen zvyšující se tlak na omezení ztrát N do prostředí (Anbessa & Juskiw 2012).

Nejvyšších výnosů se dosahuje při použití dusíkatých hnojiv v minerální formě. To potvrzují Schejbalová et al. (2014) a dále Cossani et al. (2009), kteří dosáhli výnosu 4,5 t/ha zrna ječmene po aplikaci 80 kg N/ha. Při plánování strategie hnojení pro dosažení ideálního obsahu N v zrně je nutné vybalancovat dva protichůdné požadavky maximalizace výnosu a potřebu dosáhnout nízkého obsahu N v zrně. Rozdělení dávek N hnojiv tak, aby se vyhovělo požadavkům ječmene v průběhu vegetace, je zřejmě nejlepší strategií, jak dosáhnout vysokého výnosu a zároveň udržet sladovnickou kvalitu ječmene.

Odběrový normativ dusíku jarním ječmenem je 20-25 kg N na jednu tunu zrna. Při teoretických výpočtech pro jarní ječmen je vhodné počítat s nižšími hodnotami. Pokud je

normativ 21 kg N/t, pak pro výnos 5 t/ha je nutné rostlinám zajistit 105 kg N/ha. Dále je nutné zohlednit N uvolněný mineralizací organických látek v půdě, rostlinných zbytků a organických hnojiv a odečíst jej od potřeby rostlin. Tento N však bude přístupný pro rostliny až v období, kdy je vytvářeno zrno, a ne v průběhu jeho založení. Proto je nutné podpořit vývoj výnosotvorných prvků ječmene v raných fázích vegetace, tedy počet odnoží, založení klasu a klásků, minerální výživou. V základním hnojení je aplikováno 60-80 % stanovené dávky N, a protože je N aplikován před založením porostu a zapraven do půdy, je možné zvolit jakékoliv hnojivo (DASA, DAM, ledek amonný, síran amonný) s ohledem na cenu. Čím později je ječmen vyset, tím vyšší podíl NO_3^- by měl být aplikován při základním hnojení. Dle agrobiologické kontroly porostů lze korigovat dávku N pro přihnojení. Přihnojení musí být prováděno v souladu s konkrétním průběhem počasí, hnojením organickými hnojivy k předplodinám, stanovištními podmínkami, zařazením ječmene v osevním postupu a s ohledem na předchozí způsob hnojení. Při dosažení vysokého výnosu u jarního ječmene při nízké dávce aplikovaného N hrozí naopak riziko nízkého obsahu N látek v zrnu, což může znemožnit zařazení ječmene pro sladovnické účely a způsobit finanční ztráty. Nelze tedy přesně určit ideální období aplikace a množství dávky pro přihnojení (Černý et al. 2018).

3.3.1.5.1 Síra

Efektivita využití dusíku se může měnit se změnou produkčních faktorů, salvagi jako je například předplodina (Johnston et al. 1994), systém zpracování půdy (Sieling et al. 1998) nebo dostupnost vody (Campbell 1999). V zemědělském systému, kde obsah N určuje dynamiku růstu rostlin, se výnos zrna zvýší při dodání N hnojiva. Tento nárůst však může být limitován v případě nedostatku jiné živiny. Toto omezení lze překonat dodáním deficitní živiny a v důsledku toho lze očekávat změnu v NUE (Salvagiotti et al. 2009).

Síra je dalším makroprvkem v rostlinné výživě. V půdě je přístupná rostlinám převážně v oxidované formě, tedy ve formě aniontu SO_4^{2-} . Příjem síry je aktivní a na energii závislý proces, který je řízen elektrochemickým gradientem protonů (Kreuzwieser & Rennenberg 1998). Po přijetí musí být sírany nejdříve redukovány a až poté mohou být zabudovány do organických látek. Nejdříve dochází k aktivaci sulfátového iontu pomocí adenosintrifosfátu (ATP), což je základní podmínkou pro následnou redukci. Tuto reakci katalyzuje enzym ATP-sulfuryláza a tvoří se při ní adenosin-5'-fosfosulfát (APS) a pyrofosfát. Sekundární fosforylací APS a rozštěpením pyrofosfátu pyrofosfatázou vzniká adenosin-3'-fosfo-5'-fosfosulfát (PAPS). Následně dochází k redukci sulfátů vázanou nebo volnou cestou. Sulfity jsou dále redukovány sulfitreduktázou na sulfidy (S^{2-}). Sulfid je poté vložen do cysteinu, první stabilní organické sirmé sloučeniny (Hell & Rennenberg 1998).

Obsah bílkovin v zrnu a s tím spojená koncentrace N a S jsou tedy určující pro nutriční a průmyslovou kvalitu zrna u některých obilovin. U sladovnického ječmene je koncentrace N a S v zrnu spojena s výslednou kvalitou sladu. Vysoká koncentrace N vede ke snížení sladového výtažku, což je jeden z hlavních ukazatelů průmyslové kvality. Dále může limitovat růst kvasnic během fermentace, a tím také ovlivňovat průmyslový proces (Briggs et al. 2004).

Společně s množstvím dostupné síry ovlivňuje její příjem také dostupnost ostatních živin. Asimilační cesty pro sulfáty a nitráty jsou velmi podobné a dobře koordinované. Nedostatek jednoho z prvků potlačuje asimilaci druhého. Aktivita ATP-sulfurylázy (ATPS) a APS

reduktázy se snižuje při deficienci N. Zároveň se při následném dodání N dostupného pro rostliny aktivita obou enzymů rychle obnovuje (Brunold & Suter 1984).

Několik studií analyzovalo interakce mezi N a S. Většina z nich pouze vzala v úvahu vliv této interakce na množství kořenové biomasy nebo na výnos zrna (Randall et al. 1981; Salvagiotti & Miralles 2008) bez toho, aniž by zhodnotila její vliv na NUE. Výjimkou je Salvagiotti et al. (2009), kteří určili, že dodáním S se zvýší nárůst biomasy a výnos zrna, a také zaznamenal pozitivní interakci mezi N a S, což se projevilo ve zvýšení NUE. Avšak mechanismy, kterými S ovlivňuje NUE, jsou stále nejasné. Předložil tedy hypotézu, dle které dodání S podporuje aktivnější prorůstání půdy kořeny, čímž rostlině umožňuje vyšší příjem N. Avšak nárůst kořenové biomasy se mění dle dostupnosti různých prvků. Například deficienze N a P má za následek její zvýšení a nedostatek K a Mg na ni nemá téměř žádný vliv (Sánchez-Calderón et al. 2006). Salvagiottiho hypotézu při bližším zkoumání potvrdil Carciocchi et al. (2017), kdy rostliny s vyšším množstvím dostupné S produkovaly větší množství kořenové biomasy a výnos zrna. Vyšší dostupnost S také navýšila NUE skrze zvýšení efektivity příjmu N a produkce biomasy.

3.3.2 Fosfor

Fosfor je zásadním makroprvkem potřebným pro vývoj rostlin. Tvoří okolo 0,2 % sušiny rostlin. Fosfor je komponentem nezbytných molekul, jako jsou nukleové kyseliny, fosfolipidy a ATP. P se také podílí na kontrole klíčových enzymatických reakcí a na regulaci metabolických procesů (Theodorou & Plaxton 1993).

Většina P v půdě je ve formách, které jsou pro rostliny nepřijatelné. Základem těchto forem jsou sloučeniny H_3PO_4 a částečně $H_4P_2O_7$. Ty tvoří minerální formy, jež se dále dělí na primární fosforečné minerály (apatity) vyskytující se ve formách sloučenin s vápníkem ($Ca_2(PO_4)$) a sekundární vysrážené a adsorbované fosforečnany. V kyslejších prostředích se vytvářejí sloučeniny s hliníkem a železem, které jsou hůře rozpustné. Naopak minerální vápenaté sloučeniny P za příznivých podmínek mohou postupně uvolňovat P do půdního roztoku, a tím jej zpřístupnit rostlinám. Dále se P v půdě vyskytuje ve formách organických, které jsou nedílnou součástí organické půdní hmoty. Takto vázaný P tvoří většinou 30–50 % celkového fosforu v půdě. Jeho podstatnou část tvoří fytyl, dále nukleové kyseliny, fosfolipidy a nukleoproteiny. Většina organického fosforu je imobilizována v tělech půdních mikroorganismů (Vaněk et al. 2012).

Většina půdních typů, včetně úrodných půd, obsahuje nízké koncentrace pro rostliny dostupného P, protože míra absorpce v rhizosféře přesahuje míru jeho doplnění v půdním roztoku. Dalším problémem, vedle nízké dostupnosti P v půdě, je konečná zásoba fosforečných hnojiv, která bude do budoucna problémem pro světovou rostlinnou produkci. Přestože nelze přesně určit množství světových rezerv P, některá zkoumání odhadují, že budou, dle současných nároků na produkci, během příštích 300 let vyčerpány. Jakožto nenahraditelná limitující živina má P přímý vliv na světovou zásobu potravin (Heuer et al. 2017).

3.3.2.1 Příjem fosforu

Příjem P je pro rostliny problematický, protože jeho koncentrace v půdě ve formě dostupné pro rostliny je nízká a nároky rostlin jsou vysoké. Ve většině zemědělských systémů,

kde je nutná aplikace P hnojiv pro zajištění produktivity rostlin, je využitelnost aplikovaného P plodinami velmi nízká, protože v půdě se více než 80 % P stává imobilními a nedostupnými pro rostliny z důvodu adsorpce, srážkových procesů nebo přeměny P na organickou formu (Holford 1997).

Fosfor je pro rostliny nejlépe přístupný v anorganické formě. Forma anorganického P v půdě se mění dle hodnoty pH. Pokud je hodnota pH pod 6,0, většina P se vyskytuje ve formě jednomocného aniontu H_2PO_4^- , přičemž H_3PO_4 a HPO_4^{2-} jsou přítomny pouze v malém množství. K nejvyššímu příjmu P rostlinami dochází v rozmezí hodnot pH mezi 5,5 a 7,2, kdy dominuje forma H_2PO_4^- , což indikuje, že je P přijímán převážně v této jednomocné formě (Furihata et al. 1992; Cerozi & Fitzsimmons 2016).

3.3.2.2 Distribuce fosforu v rostlině

Většina fosforu absorbovaného kořeny je xylémem transportována do mladších listů. Dochází také k významné retranslokaci P floémem ze starších listů do rostoucích nadzemních částí a odsud do kořenů. U rostlin trpících nedostatkem P v půdě dochází k omezenému přísunu P ze xylému do nově rostoucích částí, což je doplněno zvýšenou mobilizací P uloženého ve starších listech a jeho retranslokací do mladých listů a rostoucích kořenů. Tento proces způsobuje vyčerpání zásob P a rozpad organického P uloženého ve starších listech. Většina P transportovaného přes xylém se nachází v minerální formě, přičemž skrze floém se z velké části pohybuje ve formě organické (Jeschke et al. 1997).

3.3.2.3 Efektivita využití fosforu

Efektivita využití fosforu (PUE - *Phosphorus use efficiency*) je definována jako schopnost rostliny produkovat výnos s danou zásobou P. PUE je tedy výsledkem efektivity příjmu P (PUPE - *Phosphorus uptake efficiency*) a efektivity využití P (PUTE - *Phosphorus utilization efficiency*). PUPE vykazuje schopnost plodin absorbovat P z půdy při dané zásobě P. Naopak PUTE zahrnuje optimalizaci indexu sklizně a zároveň redukcí nároků rostliny na P a/nebo zlepšení jeho vnitřního užití (Irfan et al. 2020).

Hnojení P většinou navýší příjem P plodinou o méně než 25 %. P je velmi málo pohyblivý v půdě a skrze adsorpci a srážkové procesy se může stát pro rostliny nedostupný, což má za následek neefektivní příjem hnojiva rostlinami. Efektivita využití P hnojiv (PFUE - *Phosphorus fertilizer use efficiency*) je definována jako navýšení příjmu rostlinami po dodání P hnojiv. Pokud je PFUE nízká, může to indikovat omezený přístup P hnojiv ke kořenům, avšak zároveň to může poukazovat na vysokou dostupnost P v půdě, což znamená, že rostliny nepotřebují další vstupy P ve formě hnojiv. V obou případech dodávat P, pokud je PFUE nízká, zvyšuje riziko eutrofizace vodních zdrojů způsobené smyvem půdy a erozí (Schindler 2012; Yu et al. 2021).

Faktory, které ovlivňují PFUE v plodinách zahrnují průběh ročníku, management plodin a půdní podmínky. Například teplota a množství srážek má vliv na příjem P skrze změny ve fotosyntéze, příjmu vody a struktuře kořenů, což má také efekt na PFUE. Velký vliv má také pudní pH, které ovlivňuje mikrobiální cyklus P zahrnující mineralizaci P, což má vliv na

dostupnost P pro rostliny, a také adsorpce Al a Fe oxidy v kyselých půdách, přičemž v půdách zásaditých se P spojuje s Ca (Marschner et al. 2005).

3.3.2.4 Fosforečná hnojiva

Když v roce 1669 alchymista Hennig Brandt objevil fosfor při pokusech vytvořit zlato z močoviny, netušil, jaký bude mít tento objev do budoucna vliv na celý svět. Aplikace tohoto prvku v zemědělských systémech, stejně jako dusíku, měla za následek nebývalé nárůsty výnosů, které napomohly obrovskému nárůstu populace a zlepšily nutriční stav obyvatelstva po celém světě (Sharpley et al. 2018).

Protože jsou světové zásoby P omezené, je zde snaha snížit dávky aplikovaného P a navýšit jeho využití. Jedním z přístupů, který je intenzivně zkoumán pro zlepšení efektivity využití P, je omezení fyzické a časové interakce P s reaktivními složkami v půdě. Toho může být dosaženo zvýšením stability aplikovaného hnojiva v půdě. Tím se nejen sníží množství P v půdním roztoku, ale také při postupném uvolňování P během vegetace se zefektivní jeho příjem rostlinami (Barrow 2015).

Jedním z nejstarších způsobů užitých ve snaze dosáhnout tohoto efektu je obalování granulovaných hnojiv látkami, které zpomalují jejich rozklad. Tyto granule jsou většinou ve vodě rozpustná hnojiva, jako je například fosforečnan amonný, která jsou obalena materiálem, jenž znemožňuje vodě dostat se do produktu a tím zpomaluje rozšíření P do půdního roztoku. Další možností jsou obaly, které snižují pH půdy v okolí granule v alkalickém prostředí či zvyšují pH okolí v kyselém prostředí, čímž optimalizují pH pro pozvolné uvolňování P. Avšak výsledky této metody jsou velmi nestabilní. Další metodou, jak zpomalit uvolňování P do půdy z hnojiv, je aplikace této živiny do materiálu, který umožňuje postupné uvolňování aniontu do půdy kombinací chemických mechanismů. Podrobněji se touto problematikou zabývají Weeks Jr a Hettiarachchi (2019).

3.3.3 Draslík

Draslík je dalším důležitým makroprvkem a nejhojnějším kationtem v rostlinách. K je nezbytný pro aktivaci enzymů, syntézu bílkovin, fotosyntézu, zprostředkovává osmoregulaci při buněčné expanzi, otevírání průduchů a tropismus. Dále je K nezbytný při transportu živin floémem, udržení hydrostatického tlaku a pro udržování rovnováhy mezi kationty a anionty v cytosolu a vakuole (Mäser et al. 2002).

Zásoba přijatelného draslíku pro rostliny v půdách klesá, a K se tak postupně stává dalším limitujícím prvkem výnosu a kvality jarního ječmene. V současné době je stále více omezováno hnojení organickými hnojivy a minerálními draselnými hnojivy, přičemž dochází k odčerpání K z půdy, které bilančně přesahuje vstupy K a snižuje úrodnost půdy. Při nedostatečném hnojení K je půda schopna rostliny zásobovat živinami, aniž by po určitou dobu došlo k výrazným poklesům výnosů a zhoršení kvality produkce. Při takovém způsobu hospodaření rostlina z počátku přijímá K ze „staré půdní síly“, což je pouze dočasné. Pro zachování úrodnosti půd je hlavní podmínkou navrácení živin, které byly odebrány z půdy sklizní, a zajistit dostatečný přísun organických látek do půdy (Kunzová 2010).

3.3.3.1 Příjem draslíku

Příjem draselného kationtu kořenovým systémem rostlin vyžaduje značné množství energie a specializované transportní systémy. Když je K přijat kořeny, může být uložen ve vakuolách, kde naplňuje osmotickou funkci, či je transportován xylémem do nadzemní části. Zároveň může být K ukládán v buňkách nadzemních částí a redistribuován skrze floém. Příjem K vykazuje dvě fáze v reakci na vnější koncentraci K, tedy vysoko- a nízkoafinitní transportní systém. Při vysoké koncentraci K v půdním roztoku K prochází membránovými kanály, které iontům umožňují pohyb po směru elektrochemického gradientu. Při nízké koncentraci K jsou zapotřebí aktivní transportní systémy, které vtáhnou K do buňky proti elektrochemickému gradientu (Rubio et al. 2010; Pardo & Rubio 2011).

3.3.3.2 Efektivita využití draslíku

Dle Wu et al. (2011) potřeba draselných hnojiv ve světě přesahuje výrobní kapacitu. Dále je velké množství aplikovaného K ztraceno v důsledku nízké míry využití K. Proto je zlepšení efektivity využití K jednou z možností, jak zredukovat náklady zemědělské produkce. Efektivita využití K je, podobně jako u fosforu, výsledkem vzájemného vztahu efektivity příjmu a efektivity využití K v rostlině. Genotypy s vyšší efektivitou využití K jsou schopny absorbovat větší množství K z půdy a vyprodukovat více sušiny na jednotku přijatého K.

3.3.3.3 Draselná hnojiva a strategie hnojení

Agrochemická zkoušení zemědělských půd (AZPP) sledují obsah přístupného K v půdě, což patří mezi základní agrochemické parametry. Odběrový normativ K jarním ječmenem je 16-21 kg K na jednu tunu zrna. Z teoretického výpočtu potřeby K porostem při odběrovém normativu 19 kg K/t a při očekávaném výnosu 5 t/ha vyplývá, že celková potřeba K pro jarní ječmen bude 95 t/ha. Nedostatek K nebo nevhodný poměr živin může mít za následek snížení výnosového potenciálu ječmene. Vzhledem ke slabé osvojovací schopnosti jarního ječmene je nutné, aby byly živiny pro rostliny rychle dostupné. Uvolňování živin z půdní zásoby bývá často pomalejší a potřebné živiny nemusí být ječmenem využity. Proto je nutné dodat rychle uvolnitelný K ve formě minerálního hnojiva. Draselná hnojiva se vyskytují ve dvou formách, a to jako sírany a chloridy, přičemž převažují hnojiva chloridového typu. Mezi nejpoužívanější K hnojiva patří draselná sůl, síran draselný, Kamex, Patentkali a Kainit (Kuzová 2010).

Draslíkem lze stejně jako fosforem hnojit v základním hnojení již na podzim. Toto hnojení by se mělo řídit dle výsledků AZPP, bilance živin a dle návratu živin ve vedlejších produktech pěstovaných předplodin. Při plánování strategie hnojení je třeba zohlednit půdní druh a sorpční vlastnosti půd. Během vlhké zimy může na lehkých půdách s malou sorpční schopností docházet k posunu těchto živin do hlubších vrstev mimo kořenovou zónu ječmene. Proto je na některých stanovištích vhodnější aplikovat základní dávku na jaře při předset'ové přípravě, a to nejlépe v kombinované formě NPK (Černý et al. 2018).

3.3.4 Mikroprvky

Mikroprvky hrají klíčovou roli v růstu a vývoji rostlin a jsou nezbytné nejen pro rostliny, ale i pro všechny živočichy (včetně člověka). Mezi mikroprvky významné pro rostliny patří Zn, Cu, Fe, Mn, B, Mo, Mn, Cl a Ni. Avšak živočichové musejí přijímat také Se, I, Co, F a Cr, které jsou pro rostliny postradatelné. Tyto prvky jsou absorbovány rostlinami z půdy a vody a skrz potravní řetězec vstupují do těl živočichů (Shukla et al. 2018).

3.4 Organická a statková hnojiva

Dle zákona č. 156/1998 Sb. neboli zákona o hnojivech se hnojivem rozumí látka, která poskytuje účinné množství živin pro výživu kulturních rostlin, pro zlepšení či udržení úrodnosti a pozitivní ovlivnění výnosu nebo kvality produkce. Organickým hnojivem je hnojivo obsahující deklarované živiny v organické hmotě. Statkovým hnojivem je hnojivo, které vzniká jako vedlejší produkt při chovu hospodářských zvířat či pěstování kulturních rostlin, pokud není dále upravováno. Za úpravu se nepovažují přirozené procesy přeměn při skladování, mechanická separace kejdy a přidávání látek snižujících ztráty živin nebo zlepšujících účinnost živin.

V několika posledních dekádách se po celém světě rozšířilo užívání minerálních hnojiv. Tato hnojiva nabízejí živiny, které jsou rychle přístupné rostlinám skrze půdní roztok. Při aplikaci organických hnojiv jsou živiny naopak postupně uvolňovány skrze mikrobiální aktivitu. Při procesu maximalizace výnosů se často opomíjelo a opomíjí, že půda je živou biosférou, ve které je pěstovaná plodina jednou z tisíce interagujících druhů. Při intenzivním pěstování monokultur spojeném s aplikací pouze chemických hnojiv bez dodání organické hmoty dochází k pomalému úpadku produktivity půdy. Avšak při dlouhodobé aplikaci organických hnojiv, jako je hnůj, kejda, sláma či rostlinné zbytky, dochází k postupnému zlepšení produktivity půdy a plodin (Siavoshi 2011).

Alternativním zdrojem živin pro rostliny v udržitelném zemědělství je digestát. Digestát je vedlejším produktem při výrobě bioplynu. Vedoucími zeměmi v produkci bioplynu v Evropské unii jsou Německo, Velká Británie, Itálie, Česká republika a Francie (Scarlat et al. 2018). Pozitiva užívání digestátu jako hnojiva spočívají v nízké viskozitě, která umožňuje rychlejší penetraci půdy a redukuje amonné emise a snižuje obsah aktivních semen plevelů a patogenů. Pevné složky v digestátu obecně obsahují vysoké množství organické hmoty a P, přičemž tekuté složky obsahují vyšší koncentrace dostupného N a K. Při sledování vlivu různých organických a minerálních hnojiv na výnos ječmene došli Barlóg et al. (2020) k závěru, že efektivita živin z digestátu je stejná jako u kejdy a NPK. Při aplikaci digestátu také sledoval největší navýšení výnosu a kvality zrna v porovnání s kombinacemi hnojení s kejdou, NPK a slámou. Z agronomického i ekonomického úhlu pohledu lze tedy konstatovat, že digestát může být užíván jako samostatné alternativní hnojivo, jehož užití je při určitých půdních podmínkách efektivnější než hnojení NPK, a do budoucna by mohl nahradit některá minerální hnojiva a přispět ke zvýšení obsahu organické hmoty v půdách.

3.4.1 Půdní organická hmota

Obsah půdní organické hmoty (SOM) je důležitým parametrem ovlivňujícím kvalitu půdy. Pro udržitelnost zemědělství a jeho produktivitu do budoucna je navýšení obsahu SOM stěžejní. Základním prvkem SOM je uhlík. Obsah SOM je také stěžejní pro životní prostředí zejména kvůli roli, kterou hraje půdní organický uhlík (SOC) ve vázání CO₂ z atmosféry (Morgan et al. 2010).

Půdní organická hmota má vliv na půdní biologické, fyzikální a chemické vlastnosti, přičemž z agronomického úhlu pohledu je SOM považována za významnou, protože může různými způsoby navýšit výnos. V otázce vlivu SOM na výnos plodin se názory poměrně rozcházejí. Dle Johnston et al. (2009) je SOM spojena s lepší výživou rostlin, zlepšením půdní struktury, retenční a pufrací schopností půdy a je úzce spojena s ekonomickou a environmentální udržitelností zemědělství. Oelofse et al. (2015) se věnoval vlivu obsahu půdního organického uhlíku na výnos jarního ječmene a ozimé pšenice. Předpokládal, že obsah SOC bude mít pozitivní vliv na výnos, což potvrzuje Alvarez et al. (2002), a na efektivitu využití N. Avšak dle výsledků jeho pozorování je vztah mezi NUE a obsahem SOC negativní a není zcela objasněn. Zároveň se neprojevil žádný statisticky významný vztah mezi SOC a výnosem pšenice. Pouze při sledování výnosu jarního ječmene byla nalezena významná interakce mezi SOC a půdním typem.

4 Metodika

4.1 Použitý materiál

Podklady pro tuto diplomovou práci vznikaly od jara do podzimu roku 2021 ve spolupráci s Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským v Chrastavě a v Brně. Pro účely této práce byly využity výsledky jedné ze tří polních stacionárních zkoušek vedených na stanici ÚKZÚZ Chrastava pod názvem Sledování vlivu stupňované intenzity hnojení na výnosy plodin, na agrochemické vlastnosti půd a na bilanci živin. Dalšími dvěma zde vedenými polními stacionárními zkouškami jsou Ověření různých systémů organického hnojení a Ověření účinnosti stupňovaných dávek dusíku při konstantních hladinách fosforu a draslíku.

Zkouška se řídí metodickými pokyny č. 24/SZV vydání 3. Byla založena v roce 1977 jako jedna z prvních na této stanici. V tomtéž roce byla stanice založena. Od tohoto roku jsou používány stejné formy hnojiv N, P a K a umístění a velikost parcel také zůstávají stejné. V průběhu let se měnily pouze odrůdy jednotlivých plodin.

4.2 Cíle stacionární zkoušky

Cíle stacionární zkoušky jsou:

- sledování závislosti mezi výrobností osevního sledu a intenzitou hnojení, stanovení optimálních dávek živin,
- sledování změn agrochemických vlastností půd při stupňované intenzitě hnojení a upřesnění kritérií pro hodnocení obsahu přístupných živin,
- sledování dodaných a odčerpaných živin – bilance živin,
- ověřování vhodných analytických metod pro stanovení obsahu přístupných živin v půdě.

4.3 Popis stanoviště

Stanoviště se nachází v severozápadní části města Chrastava a mírně se svažuje směrem na jihovýchod, tedy k směrem k opakování B.

Tabulka č.1 - Popis stanoviště

Kraj	Liberecký
Výrobní oblast	Bramborářská
Půdní typ a subtyp dle FAO	Hnědozem luvizemní
Půdní druh dle Nováka	Písčitohlinitá
Nadmořská výška	345 m
Průměrná roční teplota	8,0 °C
Průměrný roční úhrn srážek	738 mm

4.4 Osevní postup

ÚKZÚZ Chrastava spadá do bramborářského výrobního typu oblasti a osevní postup pro období 2014–2021 je následující:

Tabulka č.2 - Osevní postup pro období 2014-2021

rok	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
plodina	jetel	jetel	pšenice ozimá	brambory rané	pšenice ozimá	ječmen jarní	brambory	ječmen jarní

Osevní postup je osmihonný s 50 % zastoupením obilovin a neobsahuje meziplodiny. Ve verzi určené pro oblast výrobního typu řepářského je jetel nahrazen vojtěškou a brambory v roce 2020 řepou cukrovkou.

4.5 Kombinace hnojení

Dusík, fosfor a draslík jsou aplikovány ve třech hladinách. V bramborářské výrobní oblasti je kombinace 3. až 12. hnojena zásobně. Kombinace 12 je hnojena s vysokou intenzitou hnojení stejně jako kombinace 11, avšak bez vápnění, pro ověření vlivu vysokých dávek hnojiv na půdní reakci. Při hnojení jednotlivých parcel jsou používána hnojiva: síran amonný (SA), superfosfát (SP) a draselná sůl (DS). Hnojení hnojem se provádí v osevním postupu dvakrát (viz Příloha I.) a pouze pod brambory v dávce 40 t/ha. Vápnění se provádí také dvakrát v osevním postupu, a to po jeteli a před jarním ječmenem.

1. Nehnojená kontrola
2. CHM - hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
3. N₂ P₂ K₀ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
4. N₂ P₂ K₁ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
5. N₂ P₂ K₂ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
6. N₂ P₂ K₃ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
7. N₂ P₀ K₂ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
8. N₂ P₁ K₂ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
9. N₂ P₃ K₂ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
10. N₁ P₁ K₁ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
11. N₃ P₃ K₃ - zásobně P a K, hnojeno chlévským hnojem, vápněno dle potřeby
12. N₃ P₃ K₃ - hnojeno minerálními hnojivy do zásoby, hnojeno chlévským hnojem, nevápněno

4.5.1 Dávky živin

Tabulka č.3 - Hladiny živin

hladina živin	kg N · ha ⁻¹
nízká - 1	30
střední - 2	45
vysoká - 3	60

Při stanovení základních dávek je užíváno vyhodnocení bilance živin za celé zkušební období. Hladiny živin jsou shodné pro všechna pokusná místa v řepařské i bramborářské oblasti. Tyto dávky se pro zpřesnění pokusu v jednotlivých letech upravují dle předplodiny a vzdálenosti od hnojení chlévským hnojem (viz Příloha I). V roce 2021 byl ječmen hnojen pouze síranem amonným, přičemž byly všechny parcely (kromě nehnojených kontrol) hnojeny chlévským hnojem dávkou 40 t/ha na podzim 2019. Schéma hnojení za celý osevní postup je uvedeno v Příloze I.

4.6 Schéma parcel

Pokus se skládá z 12 variant s různými stupni hnojení jednotlivých živin v 6 opakováních, což činí 72 parcel. Celková plocha jedné parcely i s ochranným pásmem odpovídá 64 m² o délce 12,8 m a šířce 5 m. Sklizňová plocha jedné varianty pokusu je rovna 15,26 m², přičemž délka jednoho dílce je rovna 11,1 m a šířka 1,375 m. Šířka odpovídá rozpětí malého secího stroje. Zbylá plocha slouží jako ochranné pásmo pro zajištění co nejvyšší možné přesnosti pokusu. Ochranné pásy jsou vysévány velkým secím strojem. Délka předního a zadního okraje je stejná a činí 0,85 m.

Výsevek jarního ječmene na 1 ha plochy je 173 kg, což je v přepočtu 305 g na plochu jedné varianty. Meziřádková vzdálenost odpovídá 12,5 cm a v jedné variantě je tedy 11 řádků.

6F	5F	4F	3F	2E	1E	12E	11E
2F	1F	12F	11F	10E	9E	8E	7E
10F	9F	8F	7F	6E	5E	4E	3E
11D	12D	1D	2D	9C	10C	11C	12C
3D	4D	5D	6D	1C	2C	3C	4C
7D	8D	9D	10D	5C	6C	7C	8C
4B	3B	2B	1B	12A	11A	10A	9A
12B	11B	10B	9B	8A	7A	6A	5A
8B	7B	6B	5B	4A	3A	2A	1A

Schéma č.2 - Schéma parcel

Vlivem přívalových dešťů, které zasáhly porosty v Chrastavě během dubna a května, vedení ÚKZÚZ rozhodlo o vyřazení výsledků z poškozených parcel pokusu. Algoritmem dle Yatese byly dopočítány výnosy těchto vyřazených parcel.

4.7 Agrotechnické termíny

Po sklizni speciální sečkou byly jednotlivé vzorky zváženy a spolu se vzorky půdy odeslány do ÚKZÚZ Brno k dalšímu rozboru. Celkový obsah minerálního N byl měřen v laboratořích České zemědělské univerzity v Praze. Agrotechnické termíny pro rok 2019 jsou uvedeny v bakalářské práci z roku 2020 (Samešová 2020).

Tabulka č. 4 - Agrotechnické termíny

Datum	Operace
podzim 2020	podmítka
	hnojení SP, DS
	hluboká orba
22.3.2021	orba
	urovnání kompaktorem
31.3.2021	hnojení DA, SP, DS
2.4.2021	setí
24.5.2021	ochranný postřik přípravky Mustang ($0,5 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$) a Lontrel ($0,3 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$)
4.6.2021	ochranný postřik přípravkem Dicopur M 750 ($1 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$) a Lontrel ($0,3 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$)
10.8.2021	sklizeň vzorků

4.8 Ročník

Zima na přelomu let 2020/2021 byla poměrně bohatá na srážky oproti měsíčním normálům. Sněhová pokrývka se vyskytla ve třetí dekádě prosince a vydržela do konce února. Měsíce duben a květen byly chladné v porovnání s měsíčními normály s nadprůměrným množstvím srážek. V některých dnech byly srážky velmi intenzivní a docházelo ke smyvu půdy na zkušebních parcelách. Červen byl teplý s podprůměrným množstvím srážek. Avšak v červenci časté a nadprůměrné srážky oddálily sklizeň ječmene do srpna. Popis ročníku a meteorologické záznamy ze stanoviště za rok 2019 jsou uvedeny v bakalářské práci z roku 2020 (Samešová 2020).

Tabulka č.5 - Meteorologické záznamy zkušební stanice Chrastava

Měsíc	Teplota (°C)				Součet srážek (mm)	Odchylka od měsíčního normálu	
	Denní průměr	Přízemní maximum	Přízemní minimum	Počet dní s přízemním mrazíkem		teplotní	srážková
Září	14,4	30,8	1,4	0	63,2	1,4	92,9 %
Říjen	10,5	23,6	1,7	1	113,6	2,5	241,7 %
Listopad	5,6	16,6	-3,5	16	22,3	2,4	42,9 %
Prosinec	3,3	12,5	-2,9	15	21,7	3,0	38,8 %
Leden	-0,1	12,3	-12,6	23	83,9	1,1	195,1 %
Únor	0,9	18,6	-15,3	24	45,3	1,4	119,2 %
Březen	3,2	24,5	-5,2	29	39,0	-0,2	72,2 %
Duben	5,8	20,2	-4,7	17	63,3	-1,6	134,7 %
Květen	11,2	29,2	-0,3	2	95,0	-1,5	146,2 %
Červen	19,3	34,6	4,5	0	68,1	3,8	81,1 %
Červenec	19,0	32,0	8,4	0	164,3	1,9	172,9 %
Srpen	16,5	30,6	6,0	0	115,5	-0,3	129,8 %

4.9 Choroby

Během vegetace nebylo zaznamenáno napadení zástupci z čeledi padlí. Rzi a rhynchosporiová skvrnitost se vyskytovaly v menší míře. Střední výskyt byl zaznamenán u hnědých skvrnitostí, a to bez rozdílu v kombinacích hnojení.

4.10 Popis odrůdy

Laudis 550 je odrůda s výběrovou sladovnickou kvalitou a je doporučena Výzkumným ústavem pivovarským a sladařským pro výrobu piva s chráněným zeměpisným označením (CHZO) České pivo. Byla zaregistrována v březnu 2013 po úspěšném absolvování registračních zkoušek ÚKZÚZ v letech 2009–2012. Pochází z hrubčického šlechtitelského programu, tak jako odrůdy Malz, Bojos, Radegast, Heris a další. Držitelem šlechtitelských práv je Limagrain Central Europe Cereals (Blažek 2014).

Laudis 550 je polopozdní odrůda s vysokou odnoživostí, která tvoří vysoký počet produktivních stébel. Rostliny jsou středně vysoké s dobrou odolností vůči poléhání a lámání stébla. Zrno má středně velké s HTZ 45 g. V tříletém průměru registračních zkoušek ÚKZÚZ 2009–2012 dosáhl Laudis 550 vysokého výnosu ve všech výrobních oblastech. Má výborný zdravotní stav. Absolutní odolnost vůči padlí travnímu je kontrolována genem Mlo. Laudis 550 má velmi dobrou odolnost proti rhynchosporiové skvrnitosti a rzi ječné a střední odolnost vůči hnědé skvrnitosti. Tato odrůda je vhodná do všech výrobních oblastí. Nejvhodnější předplodinou je hnojená okopanina, vhodnou je mák a řepka ozimá. Méně vhodnou je obilnina. Pro termín setí platí zásada sít co nejdříve, jakmile to počasí dovolí. Ideální

hloubka setí je 2–4 cm. Má vysokou odnoživost a pro bramborářskou výrobní oblast je doporučeno vysévat 4 – 4,5 MKS na hektar. Po obilnině nebo zpožděném setí je vhodné zvýšit výsek o 0,5 MKS na hektar. Fosforečná, draselná a hořečnatá hnojiva lze užít zásobně na podzim nebo před setím na jaře. Hnojení dusíkem se řídí výrobní oblastí, předplodinou a obsahem N_{\min} v půdě v rozmezí od 40 do 80 kg N na hektar. Dusíkatá hnojiva se aplikují zásadně před setím, v případě aplikace po zasetí je důležité ukončit hnojení ve fázi 25 (plné odnožování). Korekci výživného stavu je možné provést ve fázi konce odnožování a začátku sloupkování. První fungicidní ošetření je vhodné aplikovat ve fázi 32–39, tj. v první polovině sloupkování, se zaměřením na hnědou skvrnitost, druhé ošetření v době metání ve fázi 51–59. Je důležité sledovat infekční tlak chorob a stav porostu a ošetření správně načasovat (Blažek 2014).

4.11 Analýza materiálu

Následující pracovní postupy analýzy vzorků, kromě stanovení obsahu minerálního N, byly vedeny dle metodiky vydané Národní referenční laboratoří ÚKZÚZ Brno platné od 1.7.2016. Pro přepočítání naměřených obsahů makroprvků z ppm na kg/ha, byly naměřené hodnoty vynásobeny koeficientem 4,2, což odpovídá hmotnosti 1 hektaru ornice do hloubky 30 cm při objemové hmotnosti 1,4 t/m³.

4.11.1 Půdní reakce

Úprava odebraných půdních vzorků byla provedena dle jednotného pracovního postupu analýzy půd I. (JPP AP I) 30010.1 - Úprava půdních vzorků pro fyzikálně-chemické rozborů.

Ze vzorku byly odstraněny větší kameny a zbytky rostlin. Poté byl vzorek vysušen a následně proset přes síto o velikosti 2 mm v půdním deglomerátoru tak, aby nedocházelo k drcení skeletu.

Stanovení výměnného pH bylo vedeno dle JPP AP I 30040.1 - Stanovení výměnného pH půd extrakcí 0,01M CaCl₂.

Do nádoby bylo naváženo 10 g upraveného půdního vzorku a k tomu bylo přidáno 50 ml extrakčního roztoku (roztok CaCl₂ o koncentraci 0,01 mol/l) a extrahováno v mechanické třepačce (60 ± 10) minut. Po extrakci byla suspenze ponechána 1 hodinu v klidu a v této době byla změřena na pH metru.

4.11.2 Mineralizace rostlinného materiálu

Pro stanovení obsahu N, P, K, Ca a Mg v zrnu bylo nutné materiál nejdříve mineralizovat dle jednotného pracovního postupu analýzy rostlinného materiálu (JPP ARM) 40020.1 - Mineralizace směsí kyseliny sírové, peroxidu vodíku a selenu.

Do spalovací tuby bylo naváženo (1,000 ± 0,001) g upraveného a vysušeného materiálu a přidáno 10 ml mineralizační směsi. Při přípravě mineralizační směsi bylo rozpuštěno 10 g práškového selenu ve 1000 ml 96% kyseliny sírové v průběhu 60 minut zahřátím na teplotu 300 °C. Vzorek smíchaný s mineralizační směsí se nechal stát přes noc. Poté byl po malých dávkách přidán 35% peroxid vodíku až do vyčernění mineralizátu. Takto připravený vzorek byl umístěn do mineralizačního bloku a mineralizace pokračovala dle následujícího režimu:

20 minut na 250 °C, 10 minut na 370 °C, 90 minut na 400 °C. Po ukončení mineralizace zbylo ve spalovací tubě 9–11 g mineralizátu. Po úplném vychladnutí bylo ke vzorku v tubě přidáno 20 ml destilované vody a obsah byl kvantitativně převeden do 100ml odměrné baňky, která byla doplněna destilovanou vodou téměř po značku a promíchána. Po nejméně 18 hodinách stání při laboratorní teplotě byla baňka doplněna destilovanou vodou po značku, promíchána a obsah baňky byl přefiltrován do 100ml plastové lahvičky.

4.11.3 Stanovení celkového dusíku

Pro stanovení celkového dusíku v zrně dle JPP ARM 40053.1 - Stanovení celkového dusíku v mineralizátech rostlinného původu dle Kjeldahla byla použita automatická destilační jednotka umožňující destilaci vodní párou. V každé sérii vzorků byla provedena slepá stanovení s použitím všech chemikálií.

Do destilační tuby byl kvantitativně převeden mineralizovaný vzorek. Tuba byla umístěna do destilační jednotky a do tuby bylo nadávkováno 50 ml roztoku hydroxidu sodného o koncentraci 400 g/l. Po alkalizaci vzorku byla provedena destilace vodní parou. Do 1 % roztoku kyseliny borité s roztokem bromkresolové zeleně a methylčerveně, který byl automaticky nadávkován do titrační nádoby, byl zachycen uvolněný amoniak. Současně s probíhající destilací probíhala titrace pomocí standardního odměrného roztoku kyseliny sírové o koncentraci 0,10 mol/l.

Obsah dusíku X byl vypočítán dle vztahu

$$X = (V_1 - V_2) \times c \times 2,801/m$$

kde

X byl procentuální obsah celkového dusíku ve vysušeném vzorku

V₁ spotřeba kyseliny sírové v ml při titraci zkušebního podílu

V₂ spotřeba kyseliny sírové v ml při titraci slepého stanovení

c koncentrace kyseliny sírové v mol/l

m navážka zkušebního podílu v gramech

4.11.4 Stanovení fosforu, draslíku, vápníku a hořčíku

Stanovení obsahu P, K, Ca a Mg v zrně bylo provedeno dle JPP ARM 40090.1 - Stanovení P, Ca, Mg, K a Na metodou ICP-OES.

Vzorky byly měřeny na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem vybaveným pneumatickým zmlžovačem a zvlhčovačem argonu. Princip této metody je následující. Aerosol vzorku se proudem argonu přivádí do argon-argonového plazmatu, ve kterém vlivem vysoké teploty dojde k termické excitaci a ionizaci prvků. Při jejich přechodu do stavů s nižší energií dochází k vyzáření charakteristických kvant, která odpovídají záření o určité vlnové délce. Koncentrace prvku ve vzorku se stanoví měřením intenzity záření na vhodné linii stanovovaného prvku a získaná data se vyhodnotí metodou kalibrační křivky.

Pro všechny prvky stanovované tímto způsobem byly připraveny směsné kalibrační standardní roztoky o daných koncentracích pro P, K, Ca a Mg. Vzorky byly měřeny po předchozím desetinásobném zředění mineralizátu a za podmínek stabilizovaných teplotních poměrů spektrometru.

Koncentrace analytu v roztoku zkušební vzorku a v roztoku slepého pokusu vypočítal vyhodnocovací program přístroje z kalibrační rovnice. Výsledný obsah prvku ve vzorku byl vypočten dle vztahu

$$X = (C_V - C_B) \times V \times F \times 0,1/m$$

kde

X byl obsah prvku vyjádřený v %,

C_V koncentrace příslušného prvku v extraktu v mg/l odečtená z kalibračního grafu

C_B koncentrace příslušného prvku v mg/l v roztoku slepého pokusu

m hmotnost navážky vzorku v g

V celkový objem filtrátu nebo extraktu v l

F faktor ředění

4.11.5 Stanovení minerálního dusíku

Pro hodnocení bilance dusíku během vegetace bylo odebráno a změřeno 72 vzorků půdy. Vzorky byly odebrány ve třech termínech, tedy před setím a hnojením, během sloupkování a ihned po sklizni. Vzorky byly odebrány ve dvou hloubkách 0-30 cm a 30-60 cm. Z každé varianty bylo tedy celkem odebráno 6 vzorků půdy, které byly posléze zmrazeny.

Při laboratorním zpracování byly vzorky postupně rozmrazeny a homogenizovány na 5mm sítu. K 10 g homogenizované zeminy bylo přilito 100 ml 0,001M roztoku CaCl₂ a tyto vzorky byly ponechány 120 minut na třepacím zařízení. Dále byly vzorky 5 minut odstředovány při 5000 otáčkách a poté nality do kyvetek. Celkový minerální N z takto upravených vzorků byl měřen na Kontinuálním průtokovém analyzátoru SAN^{SERIES}.

Pro výpočet obsahu minerálního dusíku v ornici byl naměřený obsah přepočten dle obsahu sušiny a pro hloubku 0-30 cm vynásoben koeficientem 4,2, což odpovídá hmotnosti ornice, a pro hloubku 30-60 cm byl vynásoben koeficientem 4,5, což odpovídá hmotnosti 1 hektaru podorničí při objemové hmotnosti 1,5 t/m³.

Při výpočtu regresní analýzy bylo množství dostupného N vypočteno jako součet obsahu N_{min} v 0-30 cm před setím, množství využitelného N z hnoje ve druhém roce (20 kg N/ha) a 100 % aplikované dávky N (kg/ha). Při dávce chlévského hnoje 40 t/ha, který obsahuje 5 % N, využije dle Mallory et al. (2010) ječmen ve druhém roce asi 10 % z tohoto N. Celkové množství využitelného N z hnoje je tedy rovno 20 kg/ha.

4.12 Efektivita využití dusíku

Pro výpočet efektivity využití dusíku (NUE) byl užit následující výpočet dle Moll et al. (1982):

$$\text{NUE (kg/kg N)} = \text{výnos zrna (kg)} / (\text{půdní N (kg)} + \text{dodaný N (kg)})$$

Pro výpočet obsahu půdního N pro NUE byly sečteny obsahy celkového minerálního N, které byly naměřeny v období sloupkování v obou měřených hladinách, protože v této době již kořeny mohly prorůst celým měřeným profilem. Dodaný N byl výsledkem součtu množství N,

který byl dodán jednotlivým variantám ve formě síranu amonného, a množství využitelného N z chlévského hnoje v druhém roce po aplikaci.

Protože v roce 2019 nebyl měřen obsah minerálního N v půdě, byl pro porovnání NUE mezi roky 2019 a 2021 použit výpočet:

$$\text{NUE (kg/kg N)} = \text{výnos zrna (kg)} / \text{dodaný N (kg)}$$

4.12.1 Bilance dusíku

Pro výpočet bilance dusíku u jednotlivých variant byl užit vzorec dle Balík et al. (2012):

$$\text{Bilance dusíku v půdě (kg/ha)} = (\text{počáteční obsah minerálního dusíku v půdě (kg/ha)} + \text{dávka dusíku v hnojivech (kg/ha)}) - (\text{reziduální zbytek minerálního dusíku po sklizni (kg/ha)} + \text{odběr dusíku rostlinami (kg/ha)})$$

Jako hodnoty počátečního a reziduálního obsahu minerálního dusíku v půdě byly užití hodnoty naměřené do hloubky 30 cm.

4.12.2 Agronomická efektivita využití dusíku

Dalším vypočteným ukazatelem efektivit využití dusíku byla agronomická efektivita využití dusíku (AE-N) dle Balík et al. (2012).

$$\text{AE-N (kg/ha)} = (\text{výnos na hnojené variantě (kg/ha)} - \text{výnos na nehnojené variantě (kg/ha)}) / \text{dávka N na hnojené variantě (kg/ha)}$$

4.12.3 Vnitřní efektivita utilizace dusíku

Dalším vypočteným ukazatelem byla vnitřní efektivita utilizace dusíku (IE-N), která porovnává reakci ječmene na aplikovanou dusíkatou hnojiva a využití dusíku porostem. Dle Balík et al. (2012) byla IE-N vypočítána jako:

$$\text{IE-N (kg/kg)} = \text{výnos sušiny zrna (kg/ha)} / \text{odběr N zrnem (kg/ha)}$$

4.12.4 Dílčí faktor produktivity aplikovaného dusíku

Posledním vypočteným ukazatelem, který hodnotí vliv hnojení na výnos byl dílčí faktor produktivity aplikovaného dusíku (PFP-N). Ten byl vypočten dle Balík et al. (2012) jako:

$$\text{PFP-N (kg/kg)} = (\text{výnos na kontrolní variantě (kg/ha)} / \text{aplikované množství N (kg/ha)}) + \text{AE-N (agronomická efektivita aplikovaného N (kg/kg))}$$

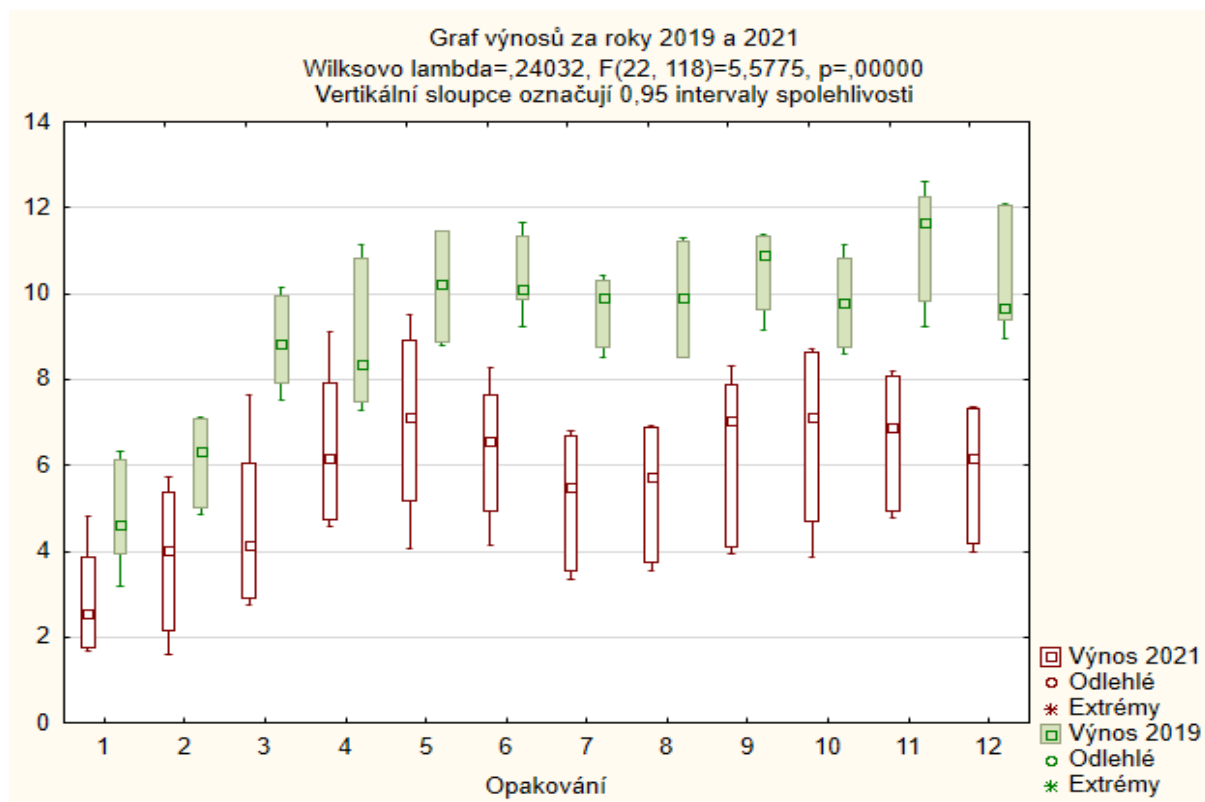
4.13 Statistika

Výsledky byly zpracovány v programu Excel a Statistica 12. Pro zhodnocení závislosti výnosů v letech 2019 a 2021 byla použita jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA při hladině významnosti α 0,05 a dále pro post-hoc analýzu byl použit Fisherův LSD test. Pro zhodnocení závislosti ostatních měřených hodnot byla vypočtena regresní analýza pro jednotlivé vztahy.

5 Výsledky

5.1 Výnosy

Nejvyšší průměrný výnos byl při pokusech prováděných v roce 2021 naměřen u varianty 5, která je v dlouhodobých pokusech hnojena ve středních hladinách minerálními hnojivy, kravským hnojem a pravidelně vápněna. Výnos činil 4,57 t/ha. Což je rozdíl v porovnání s výsledky z roku 2019 (viz Příloha IV), kdy byl nejvyšší výnos u jarního ječmene naměřen na variantě 11, která je hnojena minerálními hnojivy v nejvyšších hladinách, a výnos byl 7,34 t/ha. V rámci jednotlivých opakování měla varianta 5 nejvyšší výnos ve 2 ze 6 opakování, což je značný rozdíl v porovnání s výsledky stejného pokusu z roku 2019, kdy varianta 11 měla nejvyšší výnos ve 3 ze 6 opakování a varianta 5 v jednom opakování (viz Příloha IV).



Graf č. 1 - Krabicový graf výnosů za roky 2019 a 2021

Největší rozdíl ve výnosu mezi jednotlivými variantami, který byl roven 1,84 t/ha, byl zaznamenán mezi variantami 3 (N_2P_2) a 4 ($N_2P_2K_1$). V roce 2019 byl rozdíl mezi těmito variantami naopak nejmenší ze všech. Nehojená a nevápněná kontrola opět vykazovala ve všech opakováních nejnižší výnosy. V grafu č.1 je viditelný vliv vápnění na výnos, kdy došlo k poklesu výnosu o 0,77 t/ha mezi variantou 11 ($N_3P_3K_3$) a variantou 12 ($N_3P_3K_3$ -Ca), kde byly obě varianty hnojeny stejnou dávkou minerálních hnojiv, avšak varianta 12 nebyla vápněna. Při porovnání těchto variant však nebyl zjištěn statisticky významný vztah. To se shoduje s výsledky z roku 2019. Jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA prokázala závislost mezi výnosy v porovnávaných letech, avšak po vyhodnocení Fisherova LSD testu byl statisticky

významný vztah zjištěn pouze mezi nehnojenou kontrolou a variantami 3 až 12 a mezi variantou 2 a variantami 3-12. Statisticky významný vztah byl tedy zjištěn při dodání minerálních hnojiv. Mezi jednotlivými variantami, které byly hnojeny minerálními hnojivy, již závislost prokázána nebyla.

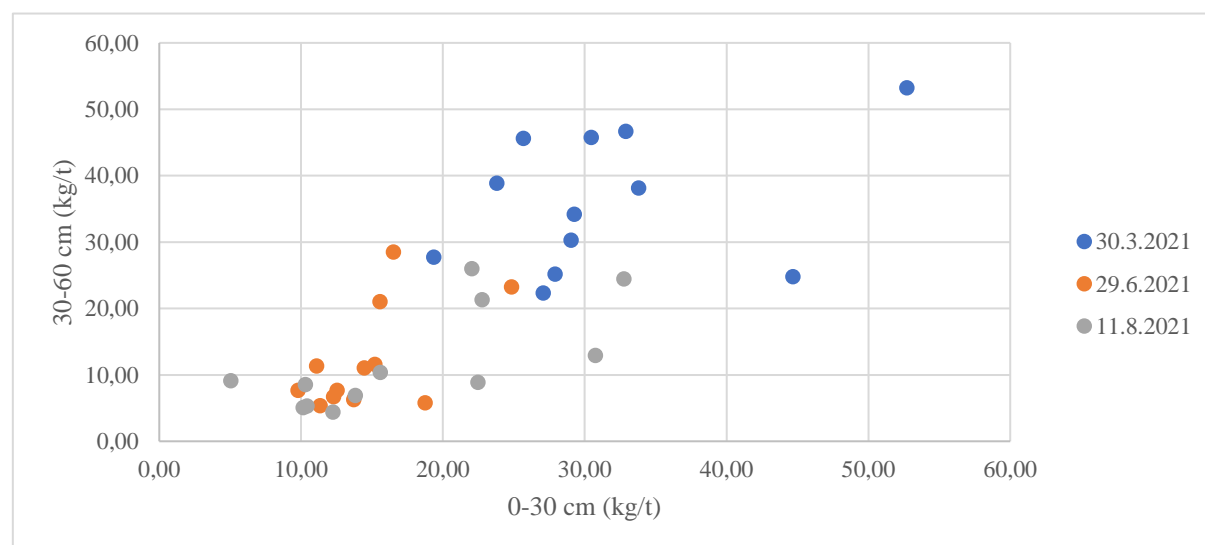
Tabulka č.6 - Výsledky regresní analýzy závislosti výnosu na obsahu N, P a K v půdě

	Dostupný N		Obsah P v půdě		Obsah K v půdě	
	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P
Výnos	0,4832	0,0073	0,2316	0,0645	0,3691	0,0213

Výsledky regresní analýzy prokázaly signifikantní vliv množství dostupného N a obsahu K v půdě na výnos zrna jarního ječmene (viz Tabulka č.6). Dle hodnoty P a koeficientu determinace mělo větší vliv na výnos zrna množství dostupného N v půdě. Tyto měřené hodnoty dle koeficientu determinace byly ve středně úzkém vztahu.

5.2 Dusík

5.2.1 Obsah minerálního dusíku v půdě

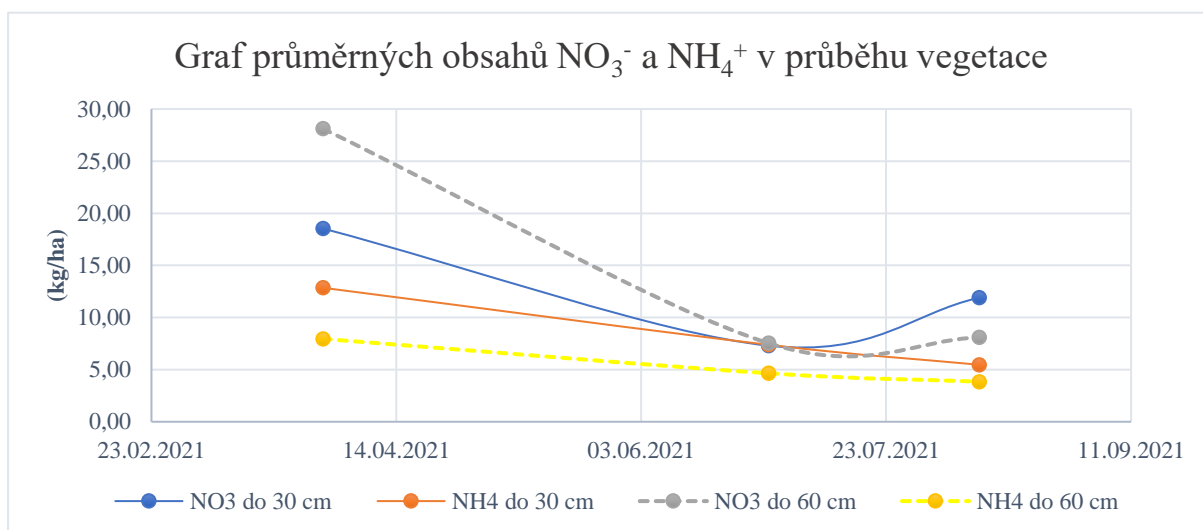


Graf č. 2 - Graf závislosti obsahu N ve 30-60 cm na obsahu N v 0-30 cm půdy v průběhu vegetace

Před setím a v průběhu vegetace byly třikrát měřeny obsahy minerálního N, a to v 0-30 cm a 30-60 cm hloubky půdy. Jak je signifikantní z grafu č.2 obsah N v půdě měl v průběhu vegetace klesající tendenci. Výjimkou byla varianta 11, kde bylo po sklizni naměřeno vyšší množství N_{\min} v hloubce 30-60 cm než před setím, a varianta 9, kde bylo v hloubce 0-30 cm naměřeno také vyšší N_{\min} po sklizni než před setím (viz Příloha II). V hloubce 0-30 cm byl nejnížší průměrný obsah N_{\min} za všechny varianty naměřen v období sloupkování a v hloubce 30-60 cm byl naměřen po sklizni (viz Příloha II).

Při porovnání průměrných obsahů NO_3^- a NH_4^+ v půdě v průběhu vegetace v měřených hladinách (viz Graf č.3) se v půdě vyskytovalo největší množství N_{\min} ve formě NO_3^- v hladině 30-60 cm. Poměr $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ v hladině 0-30 cm byl v průměru 1,6 : 1 a v hladině 30-60 cm

v průměru 2,48 : 1. Obsah NH_4^+ měl v obou hladinách klesající tendenci směrem ke sklizni v průběhu vegetace. Avšak obsah NO_3^- v půdě v obou měřených hladinách v období sloupkování výrazně klesl a po sklizni se opět zvýšil. Při bližším zkoumání průběhu obsahu NO_3^- a NH_4^+ v půdě v průběhu vegetace u jednotlivých variant (viz Přílohy VI-IX) byl obsah NH_4^+ v hladině 30-60 cm stabilně nejnižší, měl klesající tendenci a jeho obsah se pohyboval v rozmezí 1-14 kg/ha. Výjimkou byly varianty 9 a 11, kdy obsah kationtu po sklizni přesáhl obsah naměřený před setím. Obsah NH_4^+ v hladině 0-30 cm se pohyboval v rozmezí 3-22 kg/ha a v průměru měl také klesající tendenci a druhý nejnižší obsah. Výjimkami byly varianty 6, 7 a 11, kde byl obsah NH_4^+ před setím vyšší než obsah NO_3^- ve stejné hladině. Při měření obsahu NO_3^- byl v obou hladinách zaznamenán pokles směrem k období sloupkování a nárůst od období sloupkování do sklizně. Výjimkou byly pro obě hladiny varianty 1, 2, 3, 4 a 7, kdy měl obsah NO_3^- po období sloupkování klesající tendenci. Dále byl u varianty 11 obsah NO_3^- v obou hladinách vyšší po sklizni než před setím.



Graf č.3 - Graf průměrných obsahů NO_3^- a NH_4^+ v průběhu vegetace

5.2.2 Efektivita využití dusíku

Dle výpočtů uvedených v metodice byla vypočítána efektivita využití dusíku a její dílčí části, tedy bilance, agronomická efektivita, efektivita vnitřní utilizace a dílčí faktor efektivity aplikovaných hnojiv (viz tabulka č.8). Nejvyšší NUE, která se rovnala 83,97 kg/kg N, byla naměřena u nehnojené kontroly. Nejnižší NUE byla naměřena u varianty 3 a rovnala se 26,67 kg/ kg N. Bilance N do 30 cm byla u většiny variant záporná, což poukazuje na to, že si rostliny chybějící N odebraly z půdní zásoby. AE-N byla nejvyšší u varianty 10. IE-N dosahovala nejvyšší hodnoty u nehnojené kontroly a PFP-N byl nejvyšší u varianty 2. Hodnoty AE-N a PFP-N nejsou uvedeny pro nehnojenou kontrolu, protože při výpočtu těchto hodnot se ve jmenovateli nachází „množství aplikovaného hnojiva“, které je na nehnojené kontrole rovno nule, tudíž je tento výpočet matematicky nemožný.

Pro porovnání NUE mezi roky 2019 a 2021 byla vypočtena NUE dle metodiky bez započtení N_{\min} , protože v roce 2019 N_{\min} měřen nebyl. NUE v roce 2019 byla výrazně vyšší

z toho důvodu, že výnosy byly vlivem příznivějšího průběhu ročníku vyšší a došlo k vyššímu využití N, který byl dodán hnojivem.

Regresní analýza potvrdila signifikantní vliv množství dostupného N na efektivitu využití N. Hodnota P byla rovna 0,0043 a hodnota R² (koeficient determinace) byla rovna 0,5312. Hypotézu, dle které se se zvyšujícím se množstvím dostupného N pro rostliny bude snižovat NUE, lze tedy přijmout částečně, protože hodnota koeficientu determinace byla poměrně nízká. Vliv obsahu P a K v půdě na hodnotu NUE nebyl prokázán (viz Tabulka č.8). Hodnota P se pohybovala nad hladinou významnosti α 0,05. Hypotéza, dle které obsah P a K v půdě bude mít vliv na NUE, nebyla potvrzena. Dále hypotéza, dle které se se snižujícím se pH půdy bude snižovat NUE, také nebyla potvrzena. Hodnota P se opět pohybovala nad hladinou významnosti α 0,05 (viz Tabulka č.8). Vliv množství dostupného N, obsahu P a K v půdě a pH na ostatní ukazatele efektivitu využití N prokázán nebyl.

Tabulka č.7 - Tabulka hodnot NUE, přepočtené NUE pro roky 2021 a 2019, bilance N, AE-N, IE-N a PFP-N

varianta	NUE s N _{min} (kg/kg N)	NUE bez N _{min} 2021 (kg/kg N)	NUE bez N _{min} 2019 (kg/kg N)	Bilance N do 30 cm (kg/ha)	AE-N (kg/kg)	IE-N (kg/kg)	PFP-N (kg/kg)
1. nehnojená kontrola	83,97	0	0	-25,79	-	59,88	-
2. CHM	54,91	124,89	306,50	-20,78	26,97	57,47	121,17
3. N ₂ P ₂ K ₀	26,67	46,39	110,88	11,22	15,46	56,18	44,45
4. N ₂ P ₂ K ₁	45,99	64,94	111,25	-7,07	32,14	56,18	61,12
5. N ₂ P ₂ K ₂	45,00	70,35	127,13	-21,63	36,81	56,50	65,79
6. N ₂ P ₂ K ₃	49,05	64,13	129,88	-21,02	31,04	55,56	60,02
7. N ₂ P ₀ K ₂	31,20	52,79	120,50	4,70	21,18	57,80	50,17
8. N ₂ P ₁ K ₂	42,30	54,65	123,63	9,54	23,22	56,50	52,20
9. N ₂ P ₃ K ₂	46,77	64,40	131,75	-35,02	31,73	56,18	60,71
10. N ₁ P ₁ K ₁	65,77	87,72	163,67	-29,12	44,89	56,50	82,57
11. N ₃ P ₃ K ₃	44,59	54,32	112,10	-7,45	27,44	57,14	50,99
12. N ₃ P ₃ K ₃ nevápněno	38,32	48,01	103,10	15,28	21,65	55,87	45,20

Tabulka č.8 - Výsledky regresní analýzy závislosti NUE na množství dostupného N a obsahu P a K v půdě a pH půdy

	Dostupný N		Obsah P v půdě		Obsah K v půdě		pH	
	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P
NUE	0,5312	0,0043	-0,0117	0,3723	0,1073	0,1585	0,1018	0,1648

5.3 Obsah N, P, K v zrna a slámě

Největší obsah N v zrna byl naměřen u varianty, která byla hnojena N a P ve středních hladinách a K v hladině nejvyšší, a činil 20,39 kg N/t zrna. Při pokusech v roce 2019 byl naměřen nejvyšší obsah N v zrna u nehnojené kontroly. V roce 2019 i 2021 byl druhý největší

obsah N v zrně naměřen u varianty 12. Nejnižší obsah N v zrně (18,91 kg N/t) byl v roce 2021 naměřen u nehnojené kontroly. Pouze nehnojená kontrola měla obsah dusíkatých látek v zrně nižší než 12 % (viz Příloha V).

Nejvyšší obsah P v zrně byl stejně jako v roce 2019 naměřen u varianty 2, která byla hnojena pouze chlévským hnojem, a byl roven 4,88 kg P/t zrna. Nejnižší obsah P byl naměřen u nehnojené kontroly a byl roven 4,42 kg P/t. V roce 2019 byl nejnižší obsah P v zrně naměřen u varianty 10. Rozdíly mezi výnosy P v zrně byly velmi nízké. Nejvyšší obsah K v zrně byl naměřen u nehnojené kontroly a byl roven 6,8 kg K/t zrna a nejnižší roven 5,98 kg K/t u varianty 5. Draslík je na rozdíl od ostatních prvků ukládán převážně ve slámě a nejvyšší obsah K ve slámě (15,68 kg K/t) byl naměřen u varianty 12 (viz Příloha V).

Regresní analýza potvrdila signifikantní vliv množství dostupného N pro rostliny na obsah N v zrně (viz Tabulka č.10). Dále byl prokázán signifikantní vliv obsahu K v půdě na obsah N v zrně, ale vliv dostupného N byl větší. Avšak hodnota koeficientu determinace byla rovna 0,4825, hypotézu bylo možné prokázat tedy pouze částečně. Vliv dostupného N a obsahů P a K v půdě na obsah P a K v zrně prokázán nebyl. Byl však prokázán signifikantní vliv množství dostupného N a obsahů P a K v půdě na obsah K ve slámě. Největší vliv na obsah K ve slámě měl obsah K v půdě, kdy hodnota byla rovna 0,0004 a hodnota koeficientu determinace 0,7065. Vztah mezi těmito hodnotami byl tedy velmi signifikantní.

Hypotéza, dle které se bude se zvyšující se dávkou N hnojiv snižovat obsah K v zrně, prokázána nebyla. Vliv množství dostupného N na obsah K ve slámě částečně prokázán byl, avšak s malou významností, kdy koeficient determinace byl roven 0,3580. Větší vliv na obsah K ve slámě měl obsah P a K v půdě (viz Tabulka č.10).

Tabulka č. 10 - Výsledky regresní analýzy závislosti obsahu prvků v zrně a slámě na obsah N, P a K v půdě

	Dostupný N		Obsah P v půdě		Obsah K v půdě	
	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P	Koeficient determinace	Hodnota P
Obsah N v zrně	0,4825	0,0073	0,1541	0,1137	0,3173	0,033
Obsah P v zrně	0,0585	0,2237	-0,9836	0,9051	-0,0899	0,7671
Obsah K v zrně	0,1165	0,1485	-0,0977	0,8883	0,0086	0,3199
Obsah K ve slámě	0,3580	0,0234	0,4752	0,0079	0,7065	0,0004

5.4 Půdní reakce a obsah Ca a Mg v půdě

Tabulka č.11 - Výsledky regresní analýzy závislosti obsahu Ca a Mg v půdě na hodnotě pH

	pH půdy	
	Koeficient determinace	Hodnota P
Obsah Ca v půdě	0,8981	0,0000
Obsah Mg v půdě	0,2635	0,0506

Nejnižší pH, stejně jako v roce 2019, vykazovala nehnojená kontrola. Druhé nejnižší pH bylo opět u varianty 12, která nebyla vápněna (viz Příloha III). Regresní analýza potvrdila signifikantní závislost mezi obsahem Ca v půdě a pH. Hodnota P byla rovna 0,0000 a koeficient

determinace 0,8981, což poukazuje na velmi úzký vztah mezi těmito hodnotami. Signifikantní vztah mezi hodnotou pH a obsahem Mg v půdě pozorován nebyl (viz Tabulka č.11).

5.5 Obsah P a K v půdě

Obsah P a K v půdě byl měřen na podzim roku 2020. Před setím jarního ječmene na jaře 2021 dle metodiky ÚKZÚZ nebyla dodána žádná P a K hnojiva. Nejvyšší obsah P byl stejně jako v roce 2019 naměřen na variantě 12 a nejnižší na variantě 2, která byla hnojena pouze chlévským hnojem (viz Tabulka č.12). V roce 2019 byl nejnižší obsah P u nehnojené kontroly. V roce 2021 i 2019 byl zjištěn nejvyšší obsah K u varianty 12 a nejnižší u nehnojené kontroly.

Výsledky regresní analýzy (viz Tabulky č.6, 8 a 9) prokázaly signifikantní vliv obsahu K v půdě na výnos zrna jarního ječmene, obsah N v zrnu a na obsah K ve slámě. U obsahu P v půdě byl zjištěn signifikantní vliv pouze na obsah K ve slámě.

Tabulka č.12 - Obsahy P a K v půdě

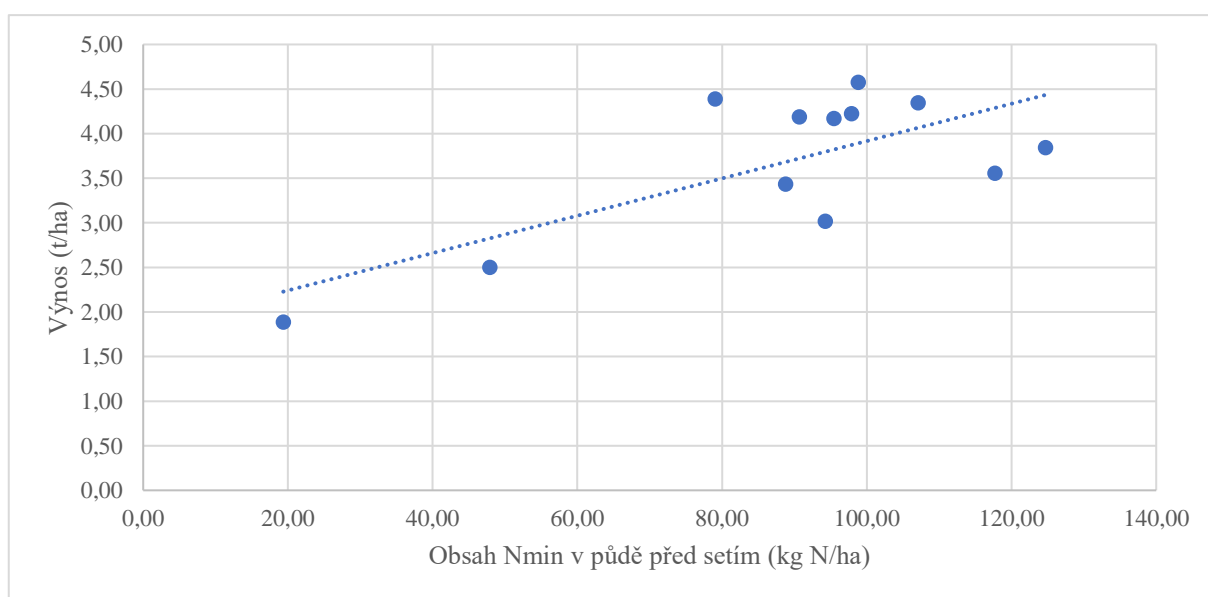
Varianta	Obsah P v půdě (kg/ha)	Obsah K v půdě (kg/ha)
1. nehnojená kontrola	337	611
2. CHM	297	645
3. N₂P₂K₀	423	744
4. N₂P₂K₁	462	858
5. N₂P₂K₂	454	900
6. N₂P₂K₃	407	1148
7. N₂P₀K₂	303	872
8. N₂P₁K₂	389	930
9. N₂P₃K₂	590	885
10. N₁P₁K₁	393	800
11. N₃P₃K₃	578	1111
12. N₃P₃K₃ nevápněno	661	1223

6 Diskuze

6.1 Výnosy

Výsledky pokusů jednoznačně prokázaly pozitivní vliv vápnění a hnojení N, P, K a statkovými hnojivy na výnos jarního ječmene. Při porovnání naměřených výnosů z roku 2019 a 2021 byl mezi jednotlivými roky statisticky významný rozdíl ($p < 0,05$), který poukazuje na vliv průběhu ročníku na výnos. V roce 2019 byly výnosy v průměru o 66 % vyšší než v roce 2021, přestože měl porost v roce 2021 o 16 dní delší vegetační dobu a výrazně větší množství srážek než v roce 2019. Rok 2021 byl chladnější a větší množství přívalových srážek způsobilo zamokření a smyv půdy v měsíci červnu, tedy v období sloupkování a metání, které jsou dle Hossain et al. (2012) pro tvorbu výnosu stěžejní. Tyto podmínky v takto podstatném období pro tvorbu výnosu mohly způsobit jeho podstatné snížení. Při bližším zkoumání vlivu hnojení a průběhu ročníku na výnos jarního ječmene Thai et al. (2020) došli k závěru, že nízké teploty v raných fázích vývoje, tedy v dubnu, mají pozitivní vliv na výnos. Vývoj listů a stébel je pomalejší a kořeny mohou prorůst do větší hloubky, což umožňuje rostlině přijímat více vody a živin. Dodávají, že hnojení N snižuje celkovou variabilitu výnosů během jednotlivých ročníků. Hejman a Kunzová (2010) poukazují, že důležitým determinantem výnosu jarního ječmene je také typ a výnos předplodiny, a tedy i její odběr živin a vody.

Vzhledem k dané metodice pokusu je možné zhodnotit vliv hnojení organickými hnojivy, tedy chlévským hnojem, pouze na základě výsledků naměřených na nehnojené kontrole a variantě 2, která byla hnojena pouze chlévským hnojem. Hnojení chlévským hnojem navýšilo průměrný výnos o 0,61 t/ha. Vlivu organických hnojiv na výnos jarního ječmene se podrobněji věnovali Ghanbari et al. (2012), kteří porovnávali vliv různých kombinací minerálních hnojiv s chlévským hnojem na výnos. Výsledky jejich pokusů potvrdily pozitivní vliv hnojení organickými a minerálními hnojivy na výnos a nutnost jejich kombinace pro udržení úrodnosti půdy.



Graf č.4 - Graf závislosti výnosu na celkovém obsahu minerálního N do 30 cm v půdě před setím

Obsah minerálního dusíku v půdě před setím měl také statisticky významný vliv ($p < 0,05$) na výnos jarního ječmene (viz Graf č.4). Nejnížší výnosy byly naměřeny na parcelách s nejnižšími obsahy minerálního N v půdě, tedy na nehnojené kontrole a na variantě hnojené pouze chlěvským hnojem. K nárůstu výnosu došlo tedy po dodání hnojiv. Vzhledem k tomu, že se v pokusu nevyskytuje varianta dlouhodobě hnojená pouze N, nebylo možné porovnat vliv hnojení samotným N s ostatními variantami. Pozitivní vliv hnojení N na výnos potvrzují také Janković et al. (2011). Dle výsledků jejich výzkumu byla ideální dávka N rovna 50 kg N/ha. Při dalším zvyšování dávky N byl, dle zákona klesajících přírůstků výnosu, nárůst výnosu čím dál nižší, a tedy i ekonomicky méně výhodný.

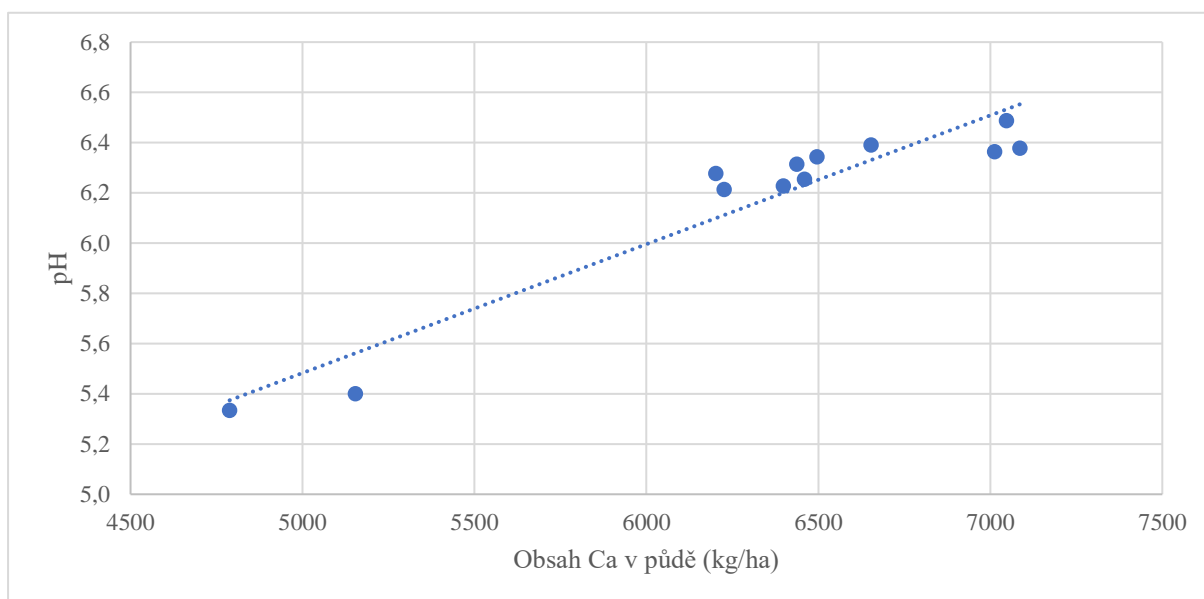
Nejvyšší výnos byl v roce 2021 naměřen u varianty 5, která byla hnojena ve středních hladinách, tedy 45 kg N/ha. V roce 2019 měla nejvyšší výnos varianta 11, která byla hnojena všemi živinami v nejvyšších hladinách. Avšak v roce 2021 měla druhý nejvyšší výnos varianta 10, která byla hnojena jednotlivými živinami v nejnižších hladinách, a měla o 0,04 t/ha vyšší průměrný výnos než varianta 11. Varianta 10 vyšla v roce 2019 při porovnání vstupních nákladů jako ekonomicky nejvýhodnější a bylo tomu tak i v roce 2021. Výsledky dlouhodobých pokusů tedy poukazují na to, že nižší dávky hnojení N u jarního ječmene jsou celkově nejvýhodnější. Ke stejnému závěru došli Baethgen et al. (1995), kteří doplňují, že dodání malého množství N před setím a zbytku dávky N na konci odnožovací fáze může být vhodnou strategií hnojení jarního ječmen.

Pozemek, na kterém je pokus veden, se mírně svažuje směrem k jihovýchodu a naměřené výnosy se mezi jednotlivými opakováními značně liší (viz Schéma č.3). Červeně jsou označeny nejvyšší výnosy v rámci celého pokusu a zeleně jsou označeny parcely s nejnižším výnosem. Nejvyšší výnosy se vyskytovaly převážně na parcelách opakování A a B, tedy v jihovýchodní části, kam se pozemek svažuje. Nejnižší výnosy vykazovaly parcely v opakování E, které se nacházejí v nejvyšší části pozemku. Svažitost pozemku způsobila významnou variabilitu ve výnosech v rámci opakování.

F	7,36	7,98	6,71	4,48	1,59	1,76	3,99	4,76	E
	4,81	3,87	7,35	8,21	4,7	3,94	3,55	3,36	
	7,69	7,39	6,85	6,59	5,8	4,08	4,57	2,73	
D	5,81	5,04	2,39	3,2	4,09	3,87	4,94	4,17	C
	3,78	5,62	5,17	4,14	1,69	2,16	2,91	4,75	
	4,42	4,6	6,72	6,57	6,25	4,92	3,55	3,73	
B	7,9	6,06	5,37	2,74	7,3	7,98	8,62	8,31	A
	7,32	8,09	8,71	7,88	6,92	6,81	8,29	8,9	
	6,88	6,69	7,66	9,49	9,1	7,65	5,74	4,8	

Schéma č.3 - Výnos zrna (t/ha) na jednotlivých parcelách pokusu

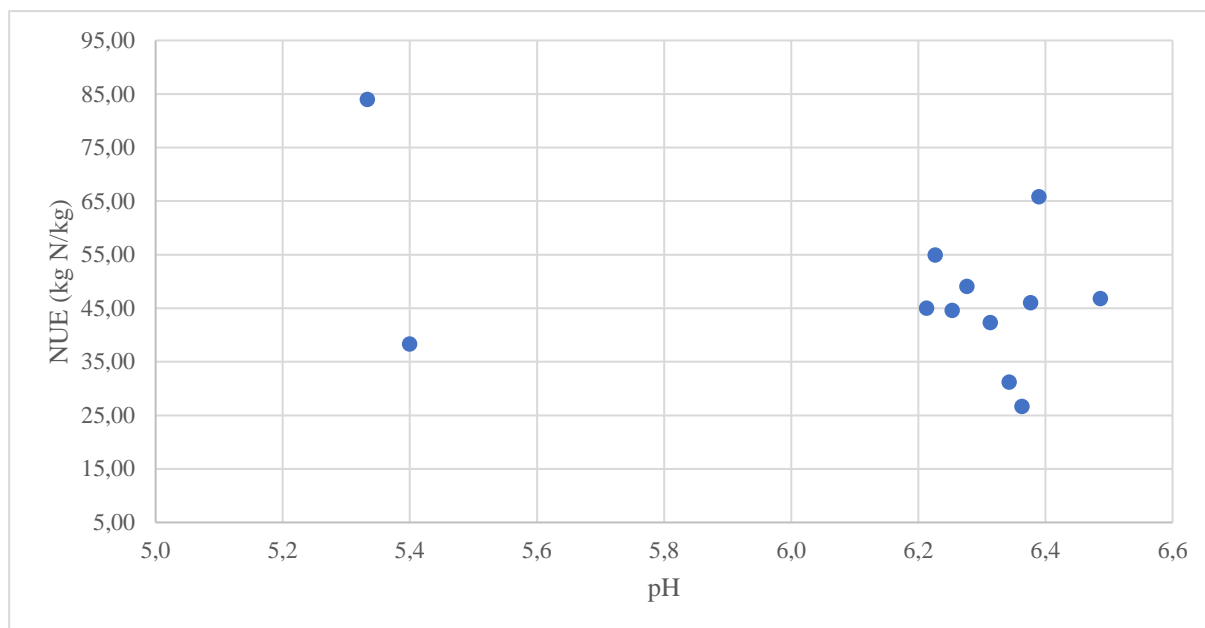
6.2 Půdní reakce



Graf č.5 - Graf závislosti pH půdy na obsahu Ca v půdě

Obsah Ca v půdě měl statisticky průkazný vliv ($p < 0,05$) na hodnotu pH půdy. Shodně s výsledky z roku 2019 dosahovaly v roce 2021 nejnižších hodnot pH nehnojená kontrola a nevápněná varianta 12 (viz Graf č.5). Jak uvádějí Lemos et al. (2007), dodáním vápníku do půdy se upravuje pH půdy. Zvýšení obsahu kationtu Ca^{2+} v půdě má pozitivní vliv na strukturu, redukuje její zhutnění, aktivuje různé enzymatické systémy, které redukují růst rostlin, a přispívá ke zvýšení odolnosti rostlin vůči chorobám. Nevápněné varianty 1 a 12 měly výrazně nižší pH v porovnání s ostatními variantami. Nejnižší pH rovno 5,3 měla nehnojená kontrola. Varianty 11 a 12 byly hnojeny stejným množstvím chlévského hnoje a minerálních hnojiv a výnos varianty 12 byl o 0,5 t/ha nižší než u varianty 11. Nedostatek Ca v půdě u variant 1 a 12 způsobil snížení pH půdy, což způsobilo nižší dostupnost živin pro rostliny a snížilo výnos.

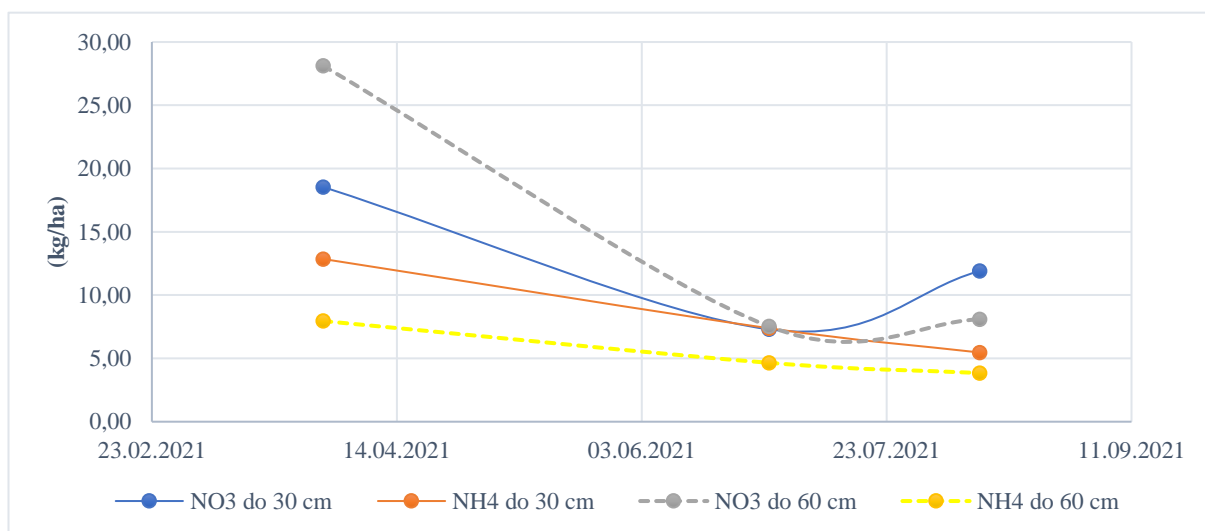
Hypotéza, dle které se snižujícím se pH půdy se bude snižovat efektivita využití dusíku, nebyla potvrzena. Nebyla prokázána statisticky významná závislost mezi hodnotou pH půdy a NUE. Při pozorování vlivu pH na akumulaci N rostlinami a efektivitu využití N došli Pan et al. (2020) k závěru, že akumulace N rostlinami se v písčitéch půdách výrazně snižuje, pokud pH klesne pod hodnotu 5, tedy kritickou hodnotu půdního pH. Pokud je pH půdy nižší, dochází k omezení růstu rostlin, a tím i ke snížení akumulace N. To vede ke snížení NUE a efektivitu využití N hnojiv. Při pokusech, které byly vedeny na stanici ÚKZÚZ Chrastava, hodnota pH neklesla pod uvedenou kritickou hodnotu (viz Graf č.6) a vliv pH půdy na NUE se neprojevil. Pan et al. (2020) dále poukazují na důležitost vápnění a udržování půdního pH nad kritickou hodnotou pro udržitelnost produkce potravin.



Graf č. 6 - Graf závislosti NUE na hodnotě pH

6.3 Dusík

6.3.1 Obsah N_{\min} v půdě

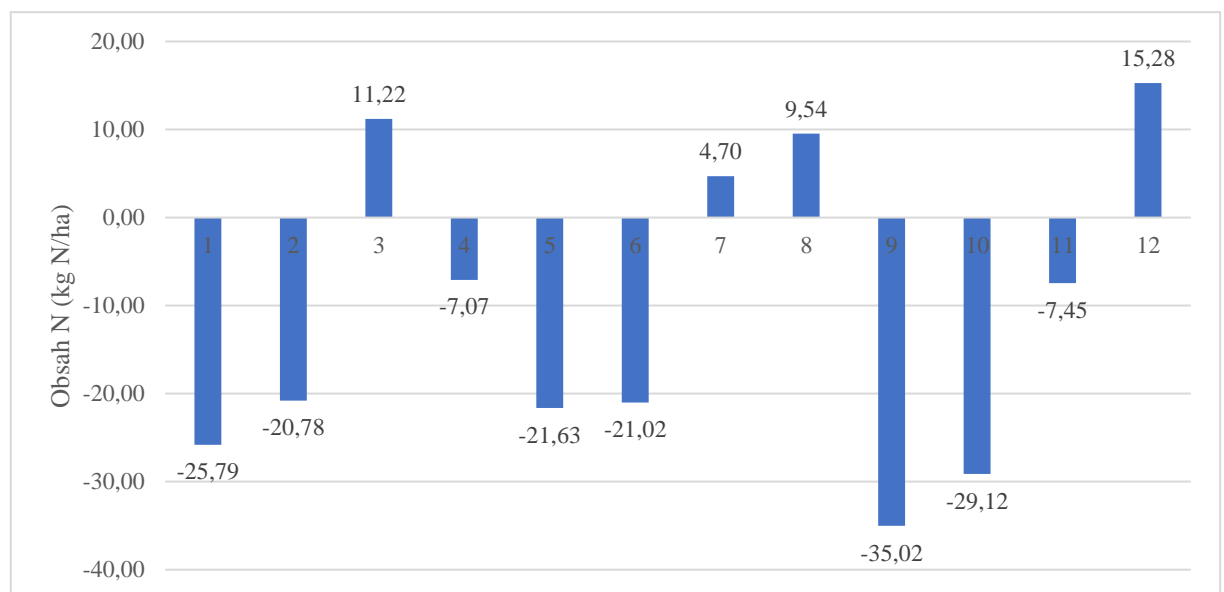


Graf č. 7 - Graf průměrných obsahů NO_3^- a NH_4^+ v průběhu vegetace

Průběh změn NO_3^- a NH_4^+ v půdě během vegetace je uveden v grafu č.7. V průběhu roku dochází ke značným změnám obsahu dostupného N v půdě. V důsledku oteplování půdy na jaře se zvyšuje činnost mikroorganismů a obsah minerálního dusíku (N_{\min}) dosahuje nejvyšších hodnot. V průběhu vegetace se obsah N_{\min} snižuje na relativně stabilní hodnotu odběrem N rostlinami i postupným snižováním intenzity mineralizace. Při příznivých vlhkostních a teplotních podmínkách se v podzimním období začíná obsah N_{\min} v půdě zvyšovat mineralizací posklizňových zbytků a následně před zimou opět klesá, protože v důsledku poklesu teplot se snižuje aktivita mikroorganismů. Dle Balík et al. (2012) se nejvíce přístupného N nachází

v ornici. Dle výsledků měření se však největší množství N_{\min} v půdě nacházelo před setím v hladině 30-60 cm. Během sloupkování byl obsah N_{\min} vyšší v hladině 0-30 cm. To lze vysvětlit tím, že rostliny během vegetace akumulovaly N kořenovým systémem, a tak se koncentračním spádem N přesunul z hlubších vrstev do mělčích. U varianty 11, která byla hnojena v nejvyšších hladinách, byl naměřen vyšší obsah NO_3^- po sklizni v obou měřených hladinách. To mohlo být způsobeno nadměrným hnojením N a k tomu neadekvátním odběrem N rostlinami.

Obsahy N_{\min} před setím a po sklizni byly využity při výpočtu bilancí pro jednotlivé varianty. Dle Balík et al. (2012) je nejvhodnější přístup pro hodnocení bilance živin řízený cíli a souvislostmi územního měřítka. Bilance dusíku vychází tedy z rozdílu mezi vstupy a výstupy. Rozdílné produkční systémy mohou vést k různým formám nerovnováhy a způsobovat tak problémy rozdílného charakteru. Zemědělské postupy s vysokými externími vstupy mohou vést ke kladné bilanci dusíku v půdách, což přispívá ke znečištění půd a ovzduší. Na druhou stranu systémy s nízkými vstupy způsobují ochuzení půdní zásoby živin, které může v budoucnu omezit zemědělskou produkci půdy. Dle vzorce, který je uveden v metodice, byly vypočteny bilance N pro jednotlivé varianty (viz Graf č.8). Bilance N byly převážně záporné. Chybějící N si tedy rostliny odebraly z půdní zásoby. Překvapivé je, že u varianty 11, která byla hnojena dlouhodobě všemi prvky v nejvyšších hladinách byla bilance záporná. Kladná bilance byla vyhodnocena u variant 3, 7, 8 a 12. S výjimkou varianty 8 se jedná o parcely, které nejsou hnojeny jedním z makroprvků (P, K a Ca).

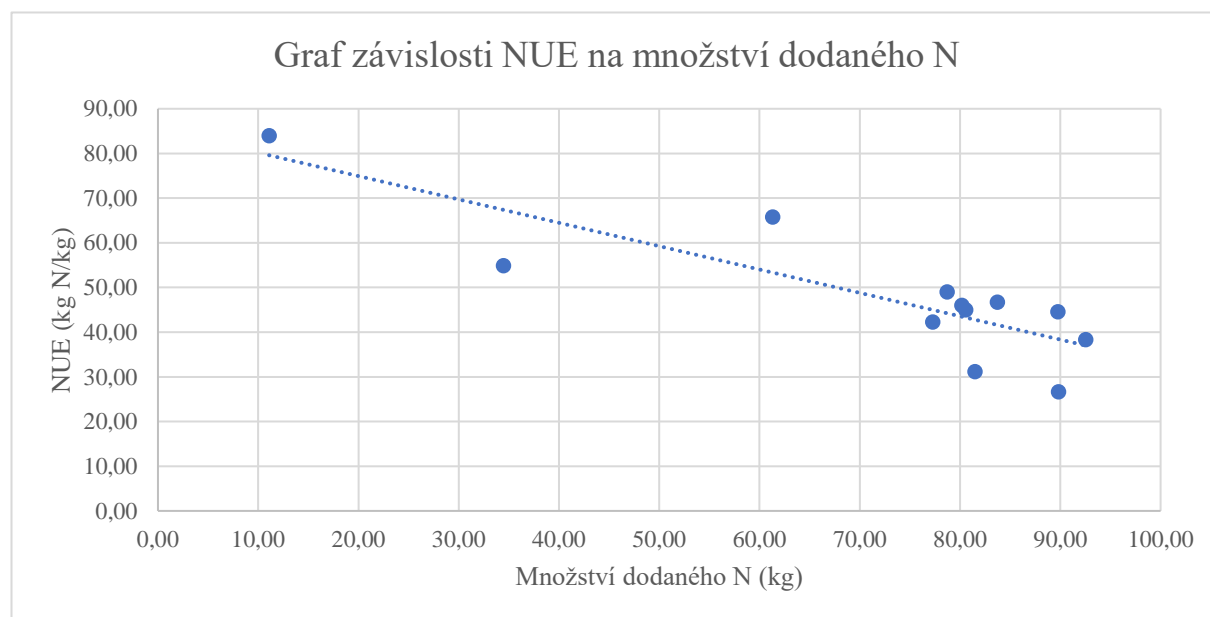


Graf č.8 - Graf bilancí N vypočtených dle N_{\min} do 30 cm

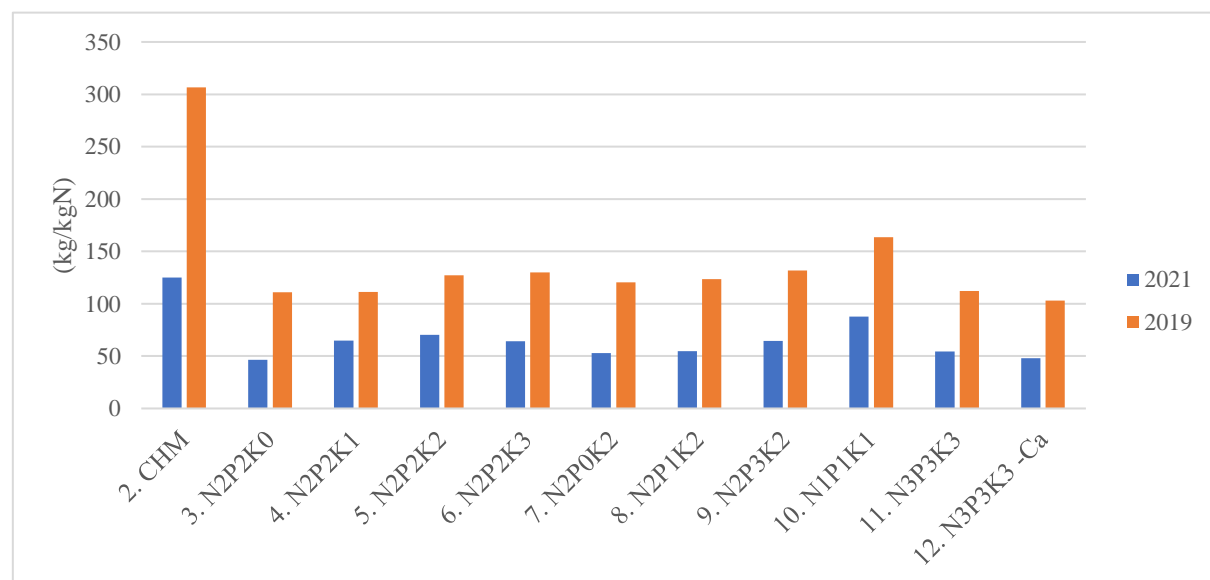
6.3.2 Efektivita využití dusíku

Celkové množství dodaného N mělo statisticky průkazný vliv ($p < 0,05$) na efektivitu využití dusíku a korelace mezi sledovanými hodnotami je záporná, což částečně potvrzuje hypotézu, dle které se zvyšujícím se množstvím pro rostliny dostupného dusíku v půdě se bude snižovat efektivita využití dusíku (viz Graf č.9). Ke stejnému závěru došli Muurinen et al. (2007), kteří pozorovali, že se zvyšující se dávkou N hnojiva se snižují oba primární

komponenty NUE (efektivita příjmu dusíku a efektivita využití dusíku). Anbessa a Juskiw (2012) doplňují, že pěstitelům jarního ječmene v Kanadě se během posledních let povedlo zlepšit NUE díky tomu, že si osvojili využití agrochemického zkušební půdy a úpravu dávky N hnojiv dle výsledků zkoušek. Dále nahradili podzimní aplikaci N hnojiv za jarní a osvojili si principy precizního hnojení, čímž snížili dávku N hnojiv a zároveň hnojivo lépe zpřístupnili kořenům rostlin. Poukazují také na to, že různé kultivary jarního ječmene mají odlišnou NUE, a navrhuje, že volba stabilnějších hnojiv a zlepšení systému hnojení organickými hnojivy může nadále zvýšit NUE a výnos zrna jarního ječmene.



Graf č.9 - Graf závislosti NUE na množství dodaného N



Graf č. 10 - Graf hodnot NUE pro roky 2019 a 2021

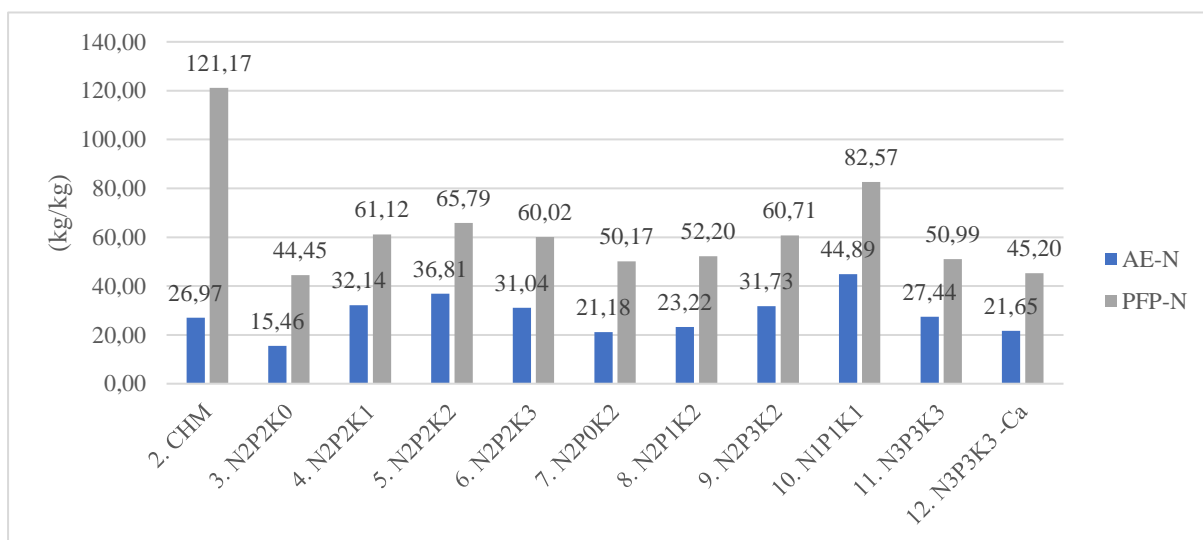
Z grafu č.10 je signifikantní, že hodnota NUE byla výrazně vyšší v roce 2019 než v roce 2021. To bylo způsobeno příznivějším ročníkem v roce 2019, který způsobil vyšší nárůst výnosů a tím i větší příjem N a efektivitu jeho využití. Hodnoty NUE nejsou uvedeny pro nehnojenou kontrolu, protože v tomto případě by ve jmenovateli byla nula. V obou

pozorovaných letech byla hodnota NUE nejvyšší u varianty 2, která byla hnojena pouze chlévským hnojem. Nejvyšší hodnota NUE mezi variantami, které byly hnojeny minerálními hnojivy, byla vypočtena v obou letech u varianty 10, která byla hnojena v nejnižších hladinách. To poukazuje na to, že nižší dávky N hnojiv jsou nejefektivnější nejen z ekonomického hlediska, ale i z hlediska omezení úniku N do životního prostředí. Při porovnání variant 11 a 12, které byly hnojeny v nejvyšších hladinách, avšak varianta 12 nebyla vápněna, byla pozorována nižší NUE u nevápněné varianty. To mohlo být způsobeno sníženým příjmem N z důvodu kyselějšího prostředí při absenci vápnění.

6.3.3 Ostatní ukazatele

Dle výpočtů uvedených v metodice byly vypočítány další ukazatele efektivity využití dusíku. V grafu č.11 jsou znázorněny hodnoty agronomické efektivity využití N (AE-N) a hodnoty dílčího faktoru produktivity aplikovaného N (PFP-N). Jelikož je počítána efektivita dodaného dusíku z aplikovaných hnojiv, nemůže být u hnojené kontroly vypočtena, protože zde nebyl žádný N aplikován.

Dle podílu výnosu sušiny na hnojené variantě, od které byl odečten výnos sušiny na nehnojené kontrole, a množství aplikovaného N byla vypočítána AE-N, tedy o kolik se zvýší přírůstek sušiny hlavního produktu po aplikaci jednoho kilogramu N. Dle Delogu et al. (1998) hodnota AE-N udává schopnost rostliny navýšit výnos v závislosti na množství aplikovaného N a silně závisí na podmínkách stanoviště. Jak je z grafu patrné, největší AE-N byla vypočtena u varianty 10, která byla hnojena N, P a K v nejnižších hladinách. Nejnižší AE-N byly vypočteny u variant 3,7 a 12, které nejsou hnojeny P, K a Ca. Výsledky tedy ukazují na lepší využití N při vyrovnané výživě. To potvrzují i Balík et al. (2012) a Schejbalová et al. (2014).

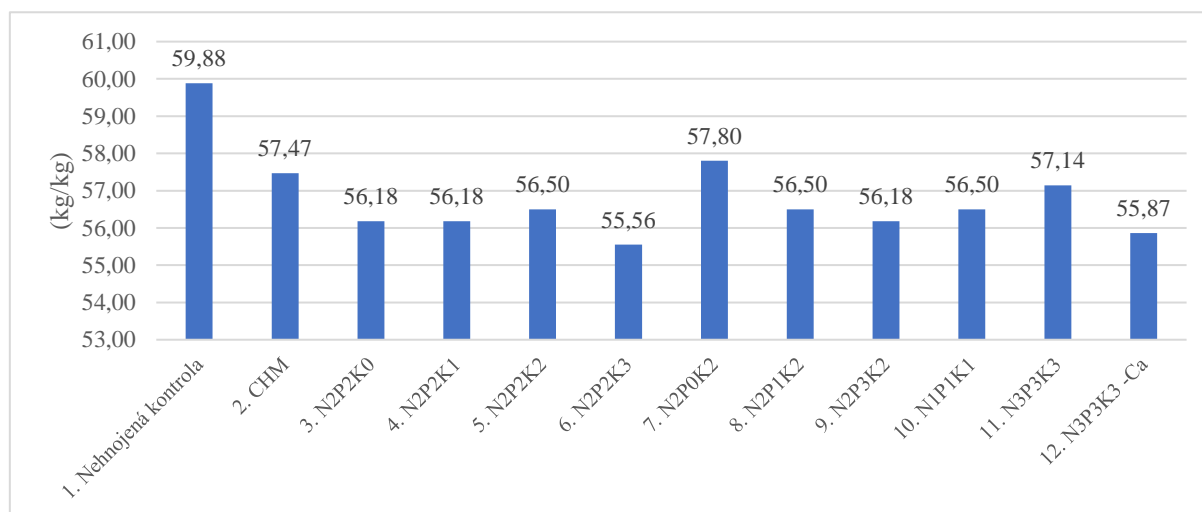


Graf č.11 - Graf hodnot AE-N a PFP-N pro jednotlivé varianty

Dle podílu výnosu na kontrolní variantě a aplikovaného množství N a k tomu přičtené AE-N byl vypočítán PFP-N. Dle Dobermann (2007) je tento ukazatel pro pěstitele nejdůležitější, protože do výpočtu začleňuje efektivitu využití půdní zásoby N a množství aplikovaného N. Při používání minerálních dusíkatých hnojiv je rozsah PFP-N od 40 do 80 kg/kg a hodnoty nad 60 kg/kg mohou být vypočítány na úrodných stanovištích s vyšším podílem N z mineralizace organické hmoty v půdě nebo v systémech s dobrým

systemem hospodaření. Čím vyšší je hodnota PFP-N, tím vyšší je využití N z aplikovaných hnojiv či půdy. Varianta 2 měla nejvyšší vypočtenou hodnotu 121,17 kg/kg, protože je zde započítán pouze podíl N využitelný z chlévského hnoje druhý rok po aplikaci. Nejvyšší hodnota PFP-N mezi variantami, které byly hnojeny minerálními hnojivy, se rovnala 82,57 kg/kg a byla vypočtena u varianty 10, která byla hnojena N, P a K v nejnižších hladinách. Nejnižší hodnoty byly vypočteny u varianty 3, 7 a 12, což opět poukazuje na lepší N při vyrovnané výživě. Čtvrtá nejnižší hodnota N byla vypočtena u varianty 11, která byla hnojena v nejvyšších hladinách, což se shoduje s výsledky, které publikoval Dobermann (2007), kdy systém s nižšími dávkami N vyprodukoval o 20 kg zrna na kilogram N více než intenzivní systém hnojení.

V grafu č. 12 jsou uvedeny hodnoty vnitřní efektivity utilizace N (IE-N). Z podílu výnosu sušiny a odběru N byla vypočítána IE-N. Tato charakteristika je závislá na dané plodině, odrůdě a agromanagementu. Nepostihuje však vliv stanoviště a má pouze informativní charakter, zda obsah N odpovídá danému výnosu. Hodnota IE-N se dle Dobermann (2007) pohybuje mezi 30-90 kg/kg a optimální rozsah při vyváženém je 55-65 kg/kg. Vysoké hodnoty IE-N poukazují na deficit N a nízké hodnoty značí nízkou konverzi N vlivem jiných faktorů, jako je nedostatek živin či vláhový deficit. Hodnoty IE-N se u všech variant pohybovaly v optimálním rozmezí.

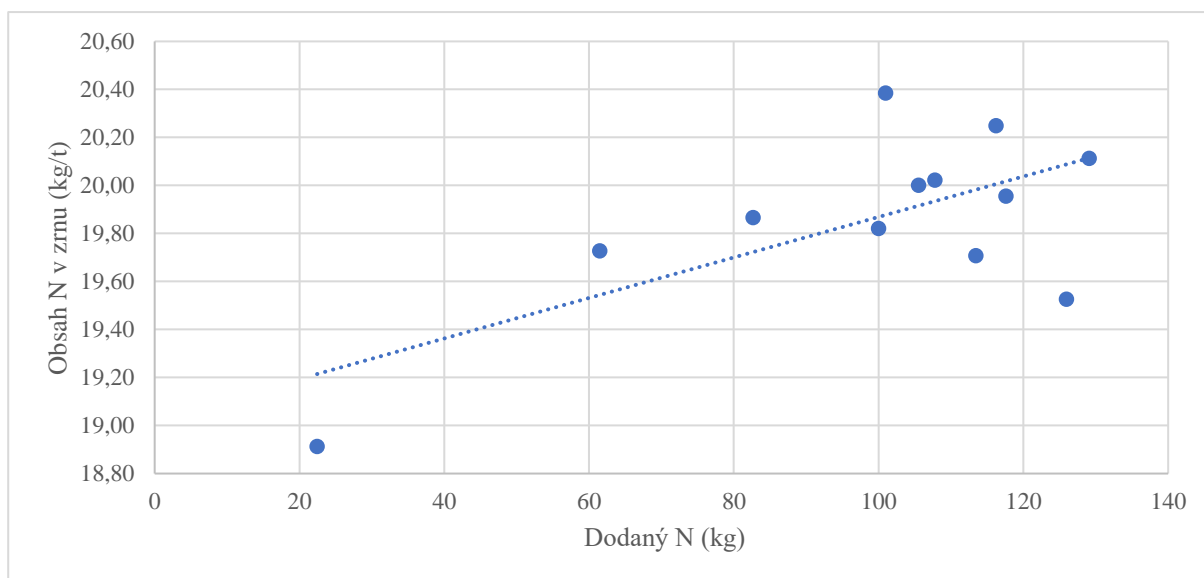


Graf č.12 - Graf hodnot IE-N

6.3.4 Obsah dusíku v zrně

Množství dodaného N mělo statisticky průkazný vliv ($p < 0,05$) na obsah N v zrně (viz Graf č.13). Nejnižší obsah N v zrně byl naměřen u nehnojené kontroly, což je opakem výsledků z roku 2019, kdy u nehnojené kontroly byl naměřen nejvyšší obsah N v zrně. Dále byl prokázán vliv obsahu K v půdě na obsah N v zrně. Tento vliv byl slabší než vliv množství dodaného N. V roce 2021 splnila požadavky normy ČSN 46 1100-5 na obsah dusíkatých látek v zrně jarního ječmene pouze nehnojená kontrola, která obsahovala 11,82 % NL. Všechny ostatní varianty obsahovaly více než 12 % NL. Vysoké obsahy NL v zrně mohly být následkem nižší míry zředovacího efektu, která byla způsobena nepříznivým ročníkem a s tím spojenými nízkými výnosy.

Podobné výsledky publikovali Yousif a Evans (2018), kteří zkoumali vliv hnojení N na obsah N v zrně u 4 různých odrůd jarního ječmene. Došli k závěru, že množství dodaného N a odrůda mají statisticky průkazný vliv na obsah N v zrně. Dále se v jejich výzkumu prokázalo, že celková dávka hnojiva 40 kg N/ha měla nejpříznivější vliv na kvalitu zrna pro jeho další zpracování. Hackett (2019) dodává, že dle výsledků jeho pokusů nemá rozdělení a načasování aplikace N hnojiv průkazný vliv na výnos a obsah N v zrně jarního ječmene. Podstatná je pouze celková dávka N.



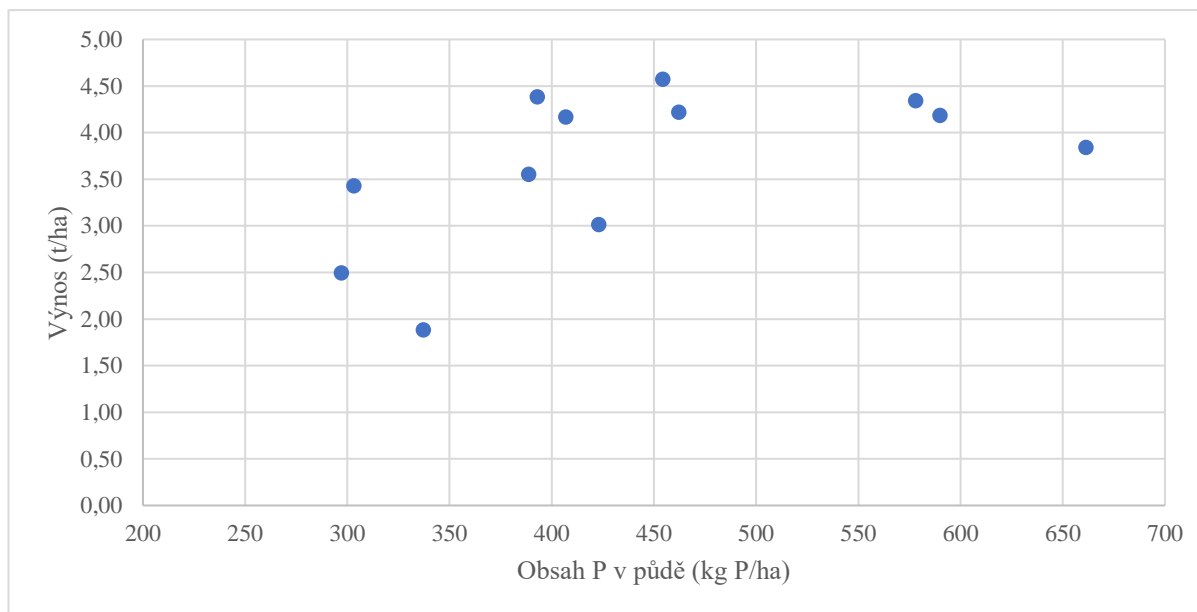
Graf č.13 - Graf závislosti obsahu N v zrně na množství dostupného N

6.4 Obsah fosforu

U obsahu P v půdě nebyl prokázán signifikantní vliv na výnos zrna (viz Graf č.14), obsah P v zrně ani NUE. Protože byl v roce 2021 ječmen hnojen dle metodiky ÚKZÚZ pouze N hnojivem, jsou jako množství vstupního P brány přepočtené obsahy P v půdě ze vzorků, které byly odebrány na podzim roku 2020. Nejvyšší obsah P v půdě byl naměřen u nevápněné varianty 12, což by mohlo být způsobeno dlouhodobými vysokými vstupy P v hnojivech a zároveň nižším výnosem, který je způsoben nižším pH. Dále nebyl prokázán statisticky významný vliv obsahu P v půdě na NUE.

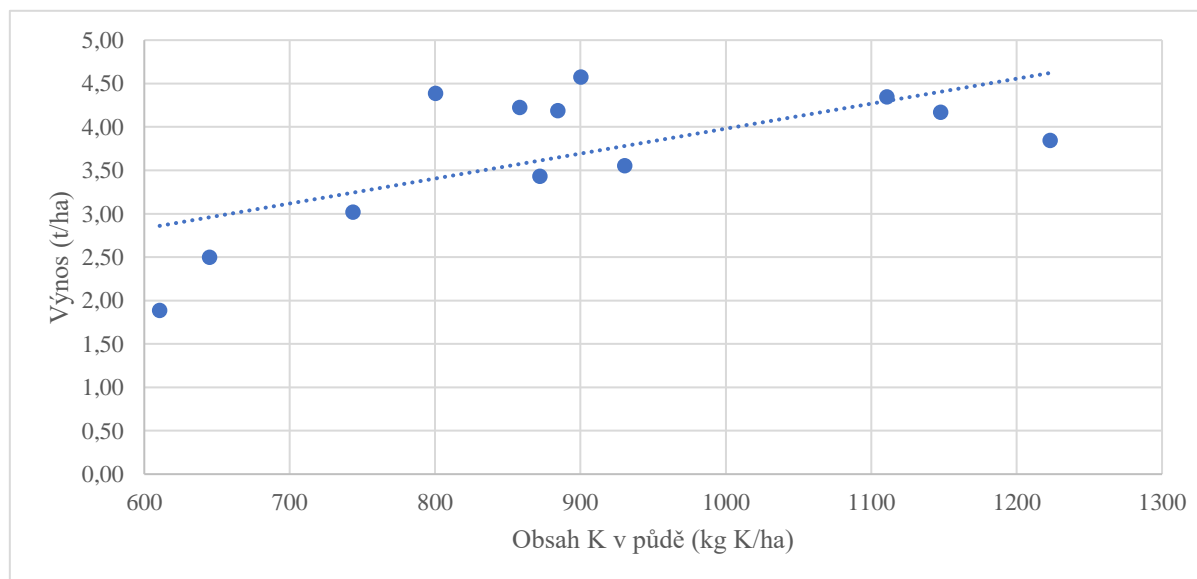
Vlivem dostupnosti P na NUE se zabývali Duan et al. (2014). Výsledky jejich pokusů naopak prokázaly statisticky významný vliv dostupnosti P a K na NUE a AE-N. Při porovnání různých systémů hnojení zaznamenali výrazný nárůst výnosu po dodání P a K do půdy. Vliv P byl výraznější než K. Podobně jako Balík et al. (2012) poukazují na potřebu vyrovnané výživy pro zvýšení NUE rostlinami. Neadekvátní aplikace P hnojiv může vést k nerovnováze v zemědělských ekosystémech a stagnace výnosů se může projevovat stále výrazněji v průběhu času.

Schopnost rostliny adaptovat se v prostředí s nedostatkem P je ovlivněna růstem a kvalitou kořenového systému. V prostředí s nízkou dostupností P nabývá schopnost kořenového systému přijímat a mobilizovat půdní P na významu. White a Broadley (2003) uvádějí, že nedostatek Ca snižuje tvorbu kořenového vlášení. Lze tedy očekávat vzájemný vztah mezi dostupností Ca a P, který bude mít vliv na tvorbu kořenového systému a výnosu.



Graf č.14 - Graf závislosti výnosu na obsahu P v půdě

6.5 Obsah draslíku



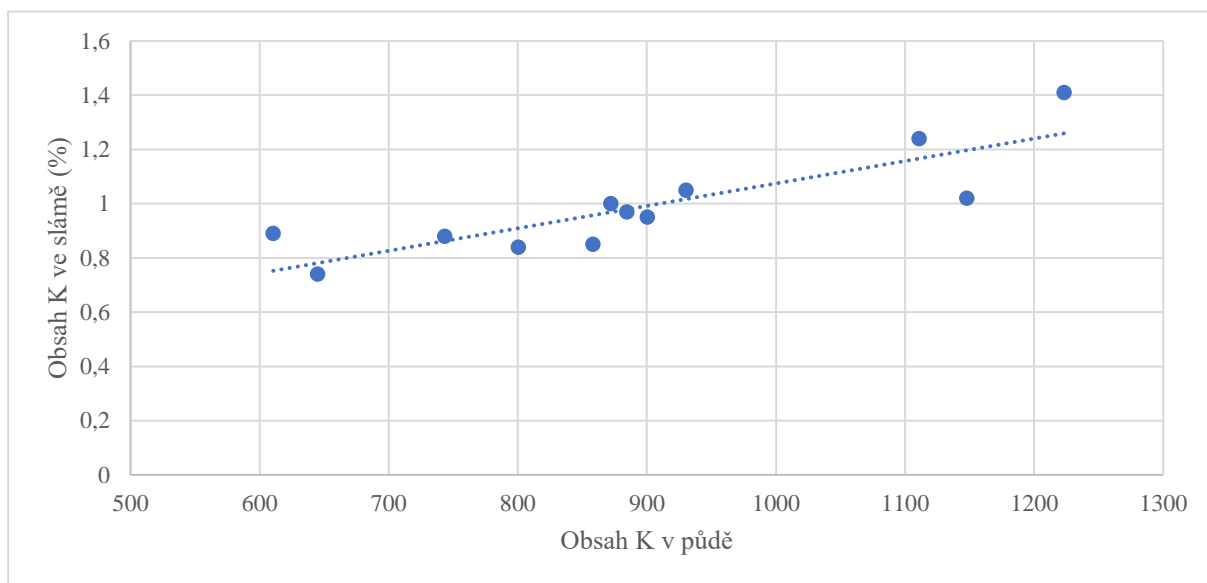
Graf č. 15 - Graf závislosti výnosu na obsahu K v půdě

Obsah K v půdě měl statisticky významný vliv ($p < 0,05$) na výnos jarního ječmene a obsah K ve slámě (viz Graf č. 15 a 16) a obsah N v zrně. Vliv množství dostupného K na obsah K v zrně a NUE však prokázán nebyl. Protože byl v roce 2021 ječmen hnojen dle

metodiky ÚKZÚZ pouze N hnojivy, jsou jako množství vstupního K brány přepočtené obsahy K v půdě ze vzorků, které byly odebrány na podzim roku 2020. Stejně jako u P byl nejvyšší obsah K naměřen u nevápněné varianty 12, což lze opět vysvětlit akumulací K v půdě z vysokých vstupů v podobě minerálních hnojiv a nižším odběrem K, který byl způsoben nižšími výnosy.

Dle Rutkowska et al. (2014) je efektivita využití dostupného N a K ovlivněna mnoha faktory, které zahrnují půdní typ, půdní zásobu N a K, obsah organické hmoty a dostupnost ostatních živin. Výsledky jejich pokusů prokázaly pozitivní vliv hnojení K na hodnotu NUE a AE-N, kdy aplikace K zajistila vyšší transport aminokyselin do generativních orgánů rostlin, ukládání uhlovodíku v kořenech a vyšší využití N.

Dle Amtmann et al. (2008) má výživa K vliv na mnoho fyziologických a biochemických procesů, které ovlivňují citlivost rostlin vůči patogenům a napadení škůdci. Rozpoznání změn v dostupnosti K rostlinou a signály, které na ně upozorňují a vyvolávají adaptivní reakci, zahrnují biofyzikální a chemické signalizační systémy a hormonální dráhy, které ovlivňují obranný mechanismus rostliny. Přestože aplikace K hnojiv ve většině případů vede ke snížení napadení rostlin chorobami, ve výzkumech se objevuje vysoký stupeň variability. Dle Amtmann et al. (2008) je nejpravděpodobnějším vysvětlením této variability různá výkonnost jednotlivých odrůd a plodin pod vlivem změn dostupnosti K a stupně stresu způsobeným napadením patogeny a škůdci a různými podmínkami zkoumaných stanovišť. Lze předpokládat, že výzkum interakce dostupnosti K a citlivosti rostlin vůči napadení patogeny a škůdci v budoucnu přispěje ke snížení potřeby chemických vstupů v zemědělství a podpoří tak snahy o dosažení ekonomicky a environmentálně udržitelného zvýšení produkce potravin.



Graf č. 16 - Graf závislosti obsahu K ve slámě na obsahu K v půdě

7 Závěr

Výsledky pokusů potvrdily pozitivní vliv hnojení minerálními hnojivy na výnos jarního ječmene. Nejvyšší výnos zrna 4,57 t/ha byl naměřen u varianty 5 v roce 2021, která byla hnojena N, P a K ve středních hladinách. Z ekonomického hlediska se při porovnání vstupních nákladů a tržeb ze sklizně nejlépe osvědčila varianta 10, která byla hnojena v nejnižších hladinách, a svým výnosem dokonce převýšila variantu 11, u které byl očekáván nejvyšší výnos, protože byla hnojena v hladinách nejvyšších. Byl prokázán signifikantní vliv množství dostupného dusíku a obsahu draslíku v půdě na výnos zrna jarního ječmene. Vliv množství dostupného N měl větší vliv na výnos než obsah K v půdě, avšak hodnota koeficientu determinace byla rovna 0,4832 a hodnota P 0,0073, což poukazuje na středně úzký vztah mezi těmito hodnotami.

Při sledování dynamiky obsahu minerálního N v průběhu vegetace ve formě NO_3^- a NH_4^+ v ornici (0-30 cm) a podorniči (30-60 cm) byla pozorována klesající tendence obsahu těchto forem směrem k období sloupkování. Obsah NH_4^+ dále klesal v obou hladinách v období sklizně, avšak obsah NO_3^- v obou hladinách směrem ke sklizni stoupl. Před obdobím sloupkování se v půdě nacházelo největší množství N ve formě NO_3^- v podorniči, v období sklizně se však největší množství N nacházelo v ornici.

Množství dostupného N pro rostliny mělo statisticky průkazný vliv na hodnotu efektivity využití dusíku, kde při zvyšujícím se množství dostupného N hodnota NUE klesala. Dle výsledků regresní analýzy byla hodnota P rovna 0,0043 a hodnota koeficientu determinace byla rovna 0,5312. Dle hodnoty koeficientu determinace se jedná o středně úzký vztah mezi těmito hodnotami.

Efektivita využití dusíku nebyla ovlivněna hodnotou pH půdy. Výsledky regresní analýzy však potvrdily signifikantní vztah mezi obsahem Ca v půdě a hodnotou pH půdy, kdy hodnota P byla rovna 0,0000 a koeficient determinace 0,8981, což poukazuje na velmi úzký vztah mezi těmito hodnotami.

Vliv obsahu P a K v půdě na efektivitu využití dusíku také nebyl prokázán. Hodnoty P se v obou případech pohybovaly nad hladinou významnosti α 0,05. Dále nebyl prokázán vliv žádné z měřených hodnot na ostatní vypočtené ukazatele efektivity využití dusíku.

Vliv množství dostupného N na obsah K v zrna prokázán nebyl, avšak výsledky regresní analýzy poukázaly na signifikantní vliv N na obsah K ve slámě. Koeficient determinace byl roven 0,358 a hodnota P 0,0234, vztah mezi těmito hodnotami byl tedy slabý. Dále byl prokázán signifikantní vliv množství P a K v půdě na obsah K ve slámě, přičemž obsah K v půdě měl na tuto hodnotu vliv největší.

Při porovnání hodnot efektivity využití dusíku za roky 2019 a 2021 byla nejvyšší efektivita v obou případech vypočtena u varianty 10, která byla hnojena v nejnižších hladinách. Nižší dávky aplikovaného dusíku se tedy projeví jako neefektivnější nejen z ekonomického hlediska, ale také z hlediska omezení úniku N do životního prostředí.

8 Literatura

- Alvarez R, Alvarez CR, Steinbach HS. 2002. Association between soil organic matter and wheat yield in humid pampa of Argentina. *Communications in soil science and plant analysis* **33**:749-757.
- Amtmann A, Troufflard S, Armengaud P. 2008. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia plantarum* **133**:682-91.
- Anbessa Y, Juskiw P. 2012. 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.
- Baethgen WE, Christianson CB, Lamothe AG. 1995. Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barley. *Field Crops Research* **43**:87-99.
- Balík J, Černý J, Kulháněk M. 2012. Bilance dusíku v zemědělství. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze. Available from <https://metodiky.agrobiologie.cz/PDF/KAVR/bilance-dusiku-v-zemedelstvi.pdf> (accessed February 20022).
- Barlóg P, Hlisnikovský L, Kunzová E. 2020. Yield, content and nutrient uptake by winter wheat and spring barley in response to applications of digestate, cattle slurry and NPK mineral fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science* **66**:1481-1496.
- Barrow NJ. 2015. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. *Plant and Soil* **397**:401-409.
- Blažek V. 2014. Laudis 550 - nová odrůda sladovnického ječmene z hrubčického šlechtění. In *Sborník z konference „Technologie sladovnického ječmene - ječmen na rozcestí“*, 27.-30.1.2014. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Briggs DE, Brookes PA, Boulton CA, Stevens R. 2004. *Brewing: science and practice*. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Brunold C, Suter M. 1984. Regulation of sulfate assimilation by nitrogen nutrition in the duckweed *Lemna minor* L. *Plant Physiology* **76**:579-583.
- Campbell WH. 1999. Nitrate reductase structure, function and regulation: bridging the gap between biochemistry and physiology. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **50**:277–303.
- Carciochi WD, Divito GA, Fernández LA, Echeverría HE. 2017. Sulfur affects root growth and improves nitrogen recovery and internal efficiency in wheat. *Journal of Plant Nutrition* **40**:1231-1242.
- Cerozi BS, Fitzsimmons K. 2016. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource technology* **219**:778-781.

- Comadira G, Rasool B, Karpinska B, Morris J, Verrall SR, Hedley PE, Hancock RD. 2015. Nitrogen deficiency in barley (*Hordeum vulgare*) seedlings induces molecular and metabolic adjustments that trigger aphid resistance. *Journal of experimental botany* **66**:3639-3655.
- Cossani CM, Slafer GA, 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.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlár O. 2018. Hnojení jarního ječmene. *Agromanual.cz*. Available from www.agromanual.cz (accessed February 2022).
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlár O. 2020. Hnojení jarního ječmene dusíkem - co vše spolu může souviset a proč vždy hnojení „nefunguje“, jak si přejeme. *Agromanual.cz*. Available from www.agromanual.cz (accessed February 2022).
- Český statistický úřad. 2021. Vývoj ploch a sklizní zemědělských ploch v letech 2009 a 2020. Český statistický úřad. Available from www.czso.cz (accessed February 2022).
- ČSN 46 1100-5 (461100). 2005. Obiloviny potravinářské - Část 5: Ječmen sladovnický. Výzkumný ústav pivovarský a sladařský a.s., Praha.
- Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N, De Falcis D, Maggiore T, Stanca AM. 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy* **9**:11-20.
- Dobermann AR. 2005. Nitrogen use efficiency – State of the art. *Agronomy & Horticulture Faculty Publications* 316.
- Dobermann AR. 2007. Nutrient use efficiency—measurement and management. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 7–9th March, 2007, Brussels.
- 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.
- Duan YH, Shi XJ, Li SL, Sun XF, He XH. 2014. Nitrogen use efficiency as affected by phosphorus and potassium in long-term rice and wheat experiments. *Journal of Integrative Agriculture* **13**:588-596.
- Egle K, Beschow H, Merbach W. 2015. Nitrogen allocation in barley: Relationships between amino acids transport and storage protein synthesis during grain filling. *Canadian journal of plant science* **95**:451–459.
- Evans JR. 1983. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant physiology* **72**:297–302.
- Fernández L. 2022. Global fertilizer consumption 1965-2019, by nutrient. Statista. Available from <https://www.statista.com/> (accessed February 2022).

- Furihata T, Suzuki M, Sakurai H. 1992. Kinetic characterization of two phosphate uptake systems with different affinities in suspension-cultured *Catharanthus roseus* protoplasts. *Plant and Cell Physiology* **33**:1151-1157.
- Ghanbari A, Babaeian M, Esmailian Y, Tavassoli A, Asgharzade A. 2012. The effect of cattle manure and chemical fertilizer on yield and yield component of barley (*Hordeum vulgare*). *African Journal of Agricultural Research* **7**:504-508.
- Good AG, Shrawat AK, Muench, DG. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends in plant science* **9**:597-605.
- Hackett R. 2019. Effect of nitrogen fertiliser application timing on grain yield and grain protein concentration of spring barley. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* **58**:34-43.
- Hay RKM, Ellis RP. 1998. The control of flowering in wheat and barley: what recent advances in molecular genetics can reveal. *Annals of Botany* **82**:541-554.
- Hejzman M, Kunzova E. 2010. Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: results from a long-term fertiliser and crop rotation experiment. *Field Crops Research* **115**:191–199.
- Hell R, Rennenberg H. 1998. The plant sulphur cycle. Pages 135-173 in Schnug E, editor. *Sulphur in Agroecosystems*. Springer, Dordrecht.
- Heuer S, Gaxiola R, Schilling R, Herrera-Estrella L, López-Arredondo D, Wissuwa M, Rouached H. 2017. Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. *The Plant Journal* **90**:868-885.
- Holford ICR. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Soil Research* **35**:227-240.
- Hossain A, da Silva JAT, Lozovskaya MV, Zvolinsky VP, Mukhortov VI. 2012. High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in south-eastern Russia: Yield, relative performance and heat susceptibility index. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* **4**:184-196.
- Chien SH, Teixeira LA, Cantarella H, Rehm GW, Grant CA, Gearhart MM. 2016. Agronomic effectiveness of granular nitrogen/phosphorus fertilizers containing elemental sulfur with and without ammonium sulfate: A review. *Agronomy Journal* **108**:1203-1213.
- Irfan M, Aziz T, Maqsood MA, Bilal HM, Siddique KH, Xu M. 2020. Phosphorus (P) use efficiency in rice is linked to tissue-specific biomass and P allocation patterns. *Scientific reports* **10**:1-14.
- Janković S, Glamočlija D, Maletić R, Rakić S, Hristov N, Ikanović J. 2011. Effects of nitrogen fertilization on yield and grain quality in malting barley. *African Journal of biotechnology* **10**:19534-19541.
- Jeschke WD, Kirkby EA, Peuke AD, Pate JS, Hartung W. 1997. Effects of P deficiency on assimilation and transport of nitrate and phosphate in intact plants of castor bean (*Ricinus communis* L.). *Journal of Experimental Botany* **48**:75-91.

- Johnston AE, McEwen J, Lane PW, Hewitt MV, Poulton PR, Yeoman DP. 1994. Effects of one to six year old ryegrass-clover leys on soil nitrogen and on the subsequent yields and fertilizer nitrogen requirements of the arable sequence winter wheat, potatoes, winter wheat, winter beans (*Vicia faba*) grown on a sandy loam soil. *Journal of Agricultural Science* **122**:73–89.
- Johnston AE, Poulton PR, Coleman K. 2009. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in agronomy* **101**:1-57.
- Johnston AE, Poulton PR. 2018. The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility; the Rothamsted experience. *European Journal of Soil Science* **69**: 113-125.
- Klikocka H, Narolski B, Michałkiewicz G. 2014. The effects of tillage and soil mineral fertilization on the yield and yield components of spring barley. *Plant, Soil and Environment* **60**:255-261.
- Kolektiv autorů. 2014. Jednotné pracovní postupy – ANALÝZA ROSTLINNÉHO MATERIÁLU. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.
- Körschens M. 2006. The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research—a review. *Plant Soil Environ* **52**:1-8.
- Kreuzwieser J, Rennenberg H. 1998. Sulphate uptake and xylem loading of mycorrhizal beech roots. *New phytologist* **140**:319-329.
- Kunzová E. 2010. Výživa rostlin a hnojení draslíkem. Výzkumný ústav rostlinné výroby.
- Ladha JK, Pathak H, Krupnik TJ, Six J, van Kessel C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in agronomy* **87**:85-156.
- Lemos SG, Nogueira AR, Torre-Neto A, Parra A, Alonso J. 2007. Soil calcium and pH monitoring sensor system. *Journal of agricultural and food chemistry* **55**:4658-63.
- Mallory BE, Griffin TS, Porter GA. 2010. Seasonal Nitrogen availability from current and past applications of manure. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* **88**:351–360.
- Marschner P, Solaiman Z, Rengel Z. 2005. Growth, phosphorus uptake, and rhizosphere microbial-community composition of a phosphorus-efficient wheat cultivar in soils differing in pH. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168**:343-351.
- Mäser P, Gierth M, Schroeder JI. 2002. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants. Pages 43-54 in Horst WJ, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer WB, Goldbach H, Merbach W, Olf HW, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schenk MK, Wirén N, editors. *Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium*. Springer, Dordrecht.
- Meyer C, Stitt M. 2001. Nitrate reduction and signalling. Pages 37-59 in Lea PJ, Morot-Gaudry JF, editors. *Plant nitrogen*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy journal* **74**:562-564.

- Morgan JA, Follett RF, Allen LH, Del Grosso S, Derner JD, Dijkstra F, Schoeneberger MM. 2010. Carbon sequestration in agricultural lands of the United States. *Journal of Soil and Water Conservation* **65**:6A-13A.
- Muurinen S, Kleemola J, Peltonen-Sainio P. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal* **99**:441-449.
- Oelofse M, Markussen B, Knudsen L, Schelde K, Olesen JE, Jensen LS, Bruun S. 2015. Do soil organic carbon levels affect potential yields and nitrogen use efficiency? An analysis of winter wheat and spring barley field trials. *European Journal of Agronomy* **66**:62-73.
- Pan X, Baquy M, Guan P, Yan J, Wang R, Xu R, Xie L. 2020. Effect of soil acidification on the growth and nitrogen use efficiency of maize in Ultisols. *Journal of Soils and Sediments* **20**:1435-1445.
- Pardo JM, Rubio F. 2011. Na⁺ and K⁺ transporters in plant signaling. Pages 65-98 in Geisler M, Venema K, editors. *Transporters and pumps in plant signaling*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Peltonen-Sainio P, Forsman K, Poutala T. 1997. Crop Management Effects on Pre-and Post-Anthesis Changes in Leaf Area Index and Leaf Area Duration and their Contribution to Grain Yield and Yield Components in Spring Cereals. *Journal of Agronomy and Crop Science* **179**:47-61.
- Petr J, Hradecká D. 1993. The formation of biological yield in triticale. *Cereal Research Communications* **21**:221-229.
- Randall PJ, Spencer K, Freney JR. 1981. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on wheat. 1. Concentrations of sulfur and nitrogen and the nitrogen to sulfur ratio in grain, in relation to the yield response. *Australian Journal of Agricultural Research* **32**:203–212.
- Raun WR, Johnson GV. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy journal*, **91**:357-363.
- Rogers C, Oldroyd G E D. 2014. Synthetic biology approaches to engineering the nitrogen symbiosis in cereals. *Journal of experimental botany* **65**:1939–1946.
- Rubio F, Alemán F, Nieves-Cordones M, Martínez V. 2010. Studies on *Arabidopsis* *athak5*, *atakt1* double mutants disclose the range of concentrations at which *AtHAK5*, *AtAKT1* and unknown systems mediate K⁺ uptake. *Physiologia Plantarum* **139**:220-228.
- Rutkowska A, Pikuł D, Stępień W. 2014. Nitrogen use efficiency of maize and spring barley under potassium fertilization in long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment* **60**:550-554.
- Salvagiotti F, Castellarín JM, Miralles DJ, Pedrol HM. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research* **113**:170-177.

- Salvagiotti F, Miralles DJ. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy* **28**:282–290.
- Samešová J. 2020. Vliv hnojení na výnos a obsah vybraných minerálních látek v zrnu ječmene jarního [MSc. Thesis]. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Sánchez-Calderón L, López-Bucio J, Chacón-López A, Gutiérrez-Ortega A, Hernández-Abreu E, Herrera-Estrella L. 2006. Characterization of low phosphorus insensitive mutants reveals a crosstalk between low phosphorus-induced determinate root development and the activation of genes involved in the adaptation of Arabidopsis to phosphorus deficiency. *Plant physiology* **140**:879-889.
- Scarlat N, Dallemand JF, Fahl F. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable energy* **129**:457-472.
- Sedlář O, Balík J, Černý J, Peklová L, Kubešová K. 2013. Dynamics of the nitrogen uptake by spring barley at injection application of nitrogen fertilizers. *Plant, Soil and Environment* **59**:392-397.
- Sharpley A, Jarvie H, Flaten D, Kleinman P. 2018. Celebrating the 350th anniversary of phosphorus discovery: A conundrum of deficiency and excess. *Journal of environmental quality* **47**:774-777.
- Shewry PR, Tatham AS, & Halford NG. 2001. Nutritional control of storage protein synthesis in developing grain of wheat and barley. *Plant Growth Regulation* **34**:105-111.
- Shukla AK, Behera SK, Pahre A, Chaudhari SK. 2018. Micronutrients in Soils, Animals and Humans. *Indian Journal of Fertilizers* **14**:30-54.
- Schejbalová 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.
- Schelling K, Born K, Weissteiner C, Kühbauch W. 2003. Relationships between yield and quality parameters of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) and phenological and meteorological data. *Journal of Agronomy and Crop Science* **189**:113-122.
- Schindler DW. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **279**:4322-4333.
- Siavoshi M, Nasiri A, Laware SL. 2011. Effect of organic fertilizer on growth and yield components in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural science* **3**:217-224.
- Sieling K, Schröder H, Finck M, Hanus H. 1998. Yield, N uptake, and apparent N use efficiency of winter wheat and winter barley grown in different cropping systems. *Journal of Agricultural Science* **131**:375–387.
- Thai TH, Bellingrath-Kimura SD, Hoffmann C, Barkusky D. 2020. Effect of long-term fertiliser regimes and weather on spring barley yields in sandy soil in North-East Germany. *Archives of Agronomy and Soil Science* **66**:1812-1826.

- Theodorou ME, Plaxton WC. 1993. Metabolic adaptations of plant respiration to nutritional phosphate deprivation. *Plant physiology* **101**:339-344.
- United Nations. 2019. How certain are the United Nations global population projections? United Nations – Department of Economic and Social Affairs. Available from <https://www.un.org/> (accessed February 2022).
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press, Praha.
- Villegas M, Sommarin M, Brodelius PE. 2000. Effects of sodium orthovanadate on benzophenanthridine alkaloid formation and distribution in cell suspension cultures of *Eschscholtzia californica*. *Plant Physiology and Biochemistry* **38**:233–241.
- Wang Y, Harding SV, Thandapilly SJ, Tosh SM, Jones PJ, Ames NP. 2017. Barley β -glucan reduces blood cholesterol levels via interrupting bile acid metabolism. *British Journal of Nutrition* **118**:822-829.
- Weeks Jr JJ, Hettiarachchi GM. 2019. A review of the latest in phosphorus fertilizer technology: Possibilities and pragmatism. *Journal of environmental quality* **48**:1300-1313.
- White PJ, Broadley MR. 2003. Calcium in plants. *Annals of botany* **92**:487-511.
- Wu JT, Zhang XZ, Li TX, Yu HY, Huang P. 2011. Differences in the efficiency of potassium (K) uptake and use in barley varieties. *Agricultural Sciences in China* **10**:101-108.
- Yousif AM, Evans DE. 2018. The impact of barley nitrogen fertilization rate on barley brewing using a commercial enzyme (Onde Pro). *Journal of the Institute of Brewing* **124**:132-142.
- Yu X, Keitel C, Dijkstra FA. 2021. Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security* **29**:100545.
- Zbírál J, Čižmárová E, Obdržálková E, Rychlý M, Vilamová V, Srnková J, Žalmanová A. 2016. *Jednotné pracovní postupy – Analýza půd I. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.*
- Zimolka J. 2006. *Ječmen-formy a užitkové směry v České republice*. Profi Press, Praha.

9 Samostatné přílohy

Tabulka č.1 - Plán hnojení

rok plodina	živina	měrná jednotka	doba použití	kombinace											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2014 jetel	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	podzim 2013	0	0	120	120	120	120	0	60	240	60	240	240
	K ₂ O	kg č.ž./ha	podzim 2013	0	0	0	80	160	320	160	160	160	80	320	320
	N	kg č.ž./ha	základní - jaro 2014	0	0	60	60	60	60	60	60	60	40	80	80
2015	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	jaro 2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	K ₂ O	kg č.ž./ha	jaro 2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N	kg č.ž./ha	jaro 2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vápnění	t/ha	podzim 2015	0	dávka podle hodnoty pH a zrnitostního složení půdy (dávka na 4 roky)										
2016 ozimá pšenice	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	podzim 2015	0	0	60	60	60	60	0	30	120	30	120	120
	K ₂ O	kg č.ž./ha	podzim 2015	0	0	0	40	80	160	80	80	80	40	160	160
	N	kg č.ž./ha	základní - podzim 2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N	kg č.ž./ha	regenerační - jaro 2016	0	0	45	45	45	45	45	45	45	30	60	60
	N	kg č.ž./ha	produkční - 2016	0	0	45	45	45	45	45	45	45	30	60	60
2017 rané brambory	chl. hnůj	t/ha	podzim 2016	0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	podzim 2016	0	0	120	120	120	120	0	60	240	60	240	240
	K ₂ O	kg č.ž./ha	podzim 2016	0	0	0	80	160	320	160	160	160	80	320	320
	N	kg č.ž./ha	jaro 2017	0	0	120	120	120	120	120	120	120	80	160	160
2018 ozimá pšenice	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	jaro 2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	K ₂ O	kg č.ž./ha	jaro 2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N	kg č.ž./ha	základní - podzim 2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N	kg č.ž./ha	regenerační - jaro 2018	0	0	45	45	45	45	45	45	45	30	60	60
	N	kg č.ž./ha	produkční - 2018	0	0	45	45	45	45	45	45	45	30	60	60
	vápnění	t/ha	podzim 2018	0	dávka podle hodnoty pH a zrnitostního složení půdy (dávka na 4 roky)										
2019 jarní ječmen	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	jaro 2019	0	0	60	60	60	60	0	30	120	30	120	120
	K ₂ O	kg č.ž./ha	jaro 2019	0	0	0	40	80	160	80	80	80	40	160	160
	N	kg č.ž./ha	jaro 2019	0	0	60	60	60	60	60	60	60	40	80	80
2020 brambory	chl. hnůj	t/ha	podzim 2019	0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	podzim 2019	0	0	120	120	120	120	0	60	240	60	240	240
	K ₂ O	kg č.ž./ha	podzim 2019	0	0	0	80	160	320	160	160	160	80	320	320
	N	kg č.ž./ha	jaro 2019	0	0	120	120	120	120	120	120	120	80	160	160
2021 jarní ječmen	P ₂ O ₅	kg č.ž./ha	podzim 2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	K ₂ O	kg č.ž./ha	podzim 2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N	kg č.ž./ha	jaro 2021	0	0	45	45	45	45	45	45	45	30	60	60

Tabulka č.2 - Obsah N_{min}

varianta	Obsah N _{min} v půdě (kg/ha)					
	30.3.2021		29.6.2021		11.8.2021	
	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm
1.nehnojená kontrola	19,36	27,71	11,09	11,35	5,06	9,09
2. CHM	27,90	25,16	14,46	11,03	12,26	4,41
3. N₂P₂K₀	29,26	34,19	24,85	23,24	10,41	5,29
4. N₂P₂K₁	32,91	46,69	15,20	11,59	10,15	5,07
5. N₂P₂K₂	33,81	38,13	15,58	21,04	13,83	6,88
6. N₂P₂K₃	30,47	45,74	13,72	6,27	22,48	8,87
7. N₂P₀K₂	23,79	38,85	16,50	28,48	10,31	8,55
8. N₂P₁K₂	52,72	53,23	12,30	6,69	30,76	12,93
9. N₂P₃K₂	25,69	45,61	18,74	5,78	32,76	24,46
10. N₁P₁K₁	29,03	30,27	11,34	5,35	15,59	10,34
11. N₃P₃K₃	27,07	22,34	9,79	7,68	22,04	26,00
12.N₃P₃K₃ nevápněno	44,68	24,80	12,55	7,68	22,78	21,33
Průměr	31,39	36,06	14,68	12,18	17,37	11,93

Tabulka č.3 - Obsah vybraných prvků v půdě a hodnoty pH pro roky 2019 a 2021

Rok měření	2021					2019				
Číslo parcely	pH půdy	K (mg/kg)	P (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	pH půdy	K (mg/kg)	P (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
1.nehnojená kontrola	5,3	145	80	1140	172	5,4	102	30	1060	151
2. CHM	6,2	154	71	1523	231	6,2	139	31	1450	241
3. N₂P₂K₀	6,4	177	101	1670	246	6,3	173	42	1840	267
4. N₂P₂K₁	6,4	204	110	1687	240	6,3	250	50	1630	248
5. N₂P₂K₂	6,2	214	108	1482	233	6,1	245	59	1390	236
6. N₂P₂K₃	6,3	273	97	1477	233	6,2	254	43	1500	225
7. N₂P₀K₂	6,3	208	72	1547	243	6,1	235	30	1400	241
8. N₂P₁K₂	6,3	222	93	1533	229	6,1	218	36	1510	234
9. N₂P₃K₂	6,5	211	140	1678	228	6,2	172	67	1550	232
10. N₁P₁K₁	6,4	191	94	1584	248	6,2	136	46	1570	237
11. N₃P₃K₃	6,3	265	138	1538	231	6,1	246	72	1470	231
12.N₃P₃K₃ nevápněno	5,4	291	157	1227	171	5,2	257	82	1140	154
průměr celkem	6,16	212,8	105,1	1507	225,4	6,03	202,25	48,96	1459,17	224,75

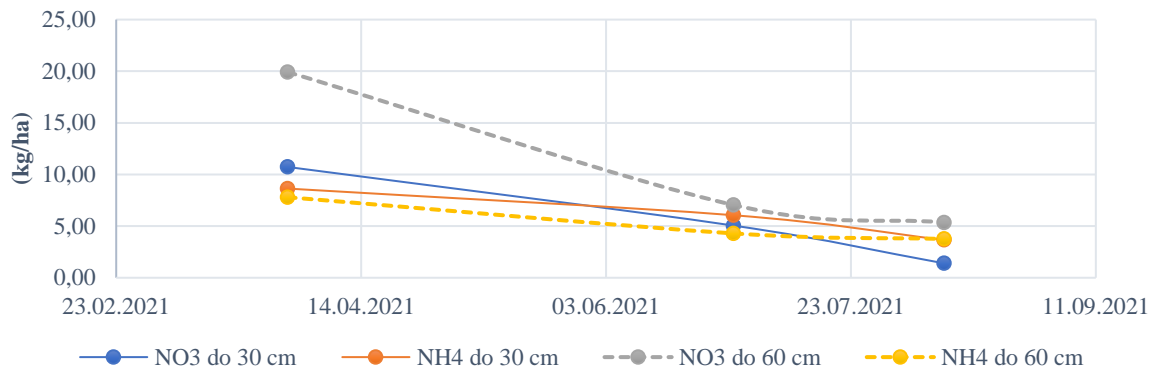
Tabulka č.4- Výnosy

Číslo parcely	Přepočtený výnos (kg/parcelu)						Celkem	Průměrný výnos			Porovnání s kontrolou (%)	Pořadí
	A	B	C	D	E	F		za rok 2021		2019		
								kg/parc	t/ha	t/ha		
1.nehnojená kontrola	4,8	2,74	1,69	2,39	1,76	3,87	17,25	2,88	1,88	3,15	100	12.
2. CHM	5,74	5,37	2,16	3,2	1,59	4,81	22,87	3,81	2,50	4,01	133	11.
3. N₂P₂K₀	7,65	6,06	2,91	3,78	2,73	4,48	27,61	4,60	3,02	5,81	160	10.
4. N₂P₂K₁	9,1	7,9	4,75	5,62	4,57	6,71	38,65	6,44	4,22	5,83	224	4.
5. N₂P₂K₂	8,9	9,49	6,25	5,17	4,08	7,98	41,87	6,98	4,57	6,66	243	1.
6. N₂P₂K₃	8,29	7,66	4,92	4,14	5,8	7,36	38,17	6,36	4,17	6,81	221	6.
7. N₂P₀K₂	6,81	6,69	3,55	4,42	3,36	6,59	31,42	5,24	3,43	6,32	182	9.
8. N₂P₁K₂	6,92	6,88	3,73	4,6	3,55	6,85	32,53	5,42	3,55	6,48	189	8.
9. N₂P₃K₂	8,31	7,88	4,09	6,72	3,94	7,39	38,33	6,39	4,19	6,91	222	5.
10. N₁P₁K₁	8,62	8,71	3,87	6,57	4,7	7,69	40,16	6,69	4,39	6,43	233	2.
11. N₃P₃K₃	7,98	8,09	4,94	5,81	4,76	8,21	39,79	6,63	4,35	7,34	231	3.
12.N₃P₃K₃ nevápněno	7,3	7,32	4,17	5,04	3,99	7,35	35,17	5,86	3,84	6,76	204	7.
celkem	90,42	84,79	47,03	57,46	44,83	79,29						

Tabulka č.5 - Obsah vybraných prvků v zrně za roky 2019 a 2021

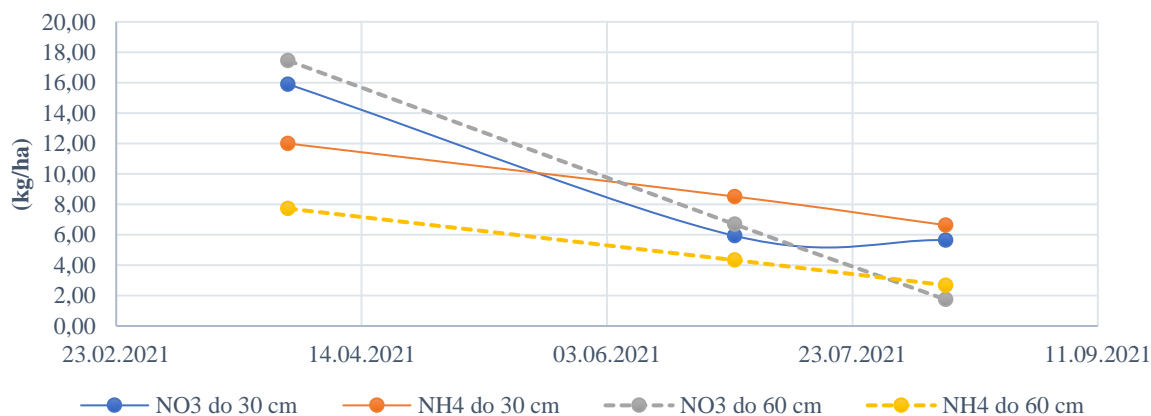
Měřený rok	2021							2019						
	Obsah NL (%)	Obsah N v zrně (kg/t)		Obsah P v zrně (kg/t)		Obsah K v zrně (kg/t)		Obsah NL (%)	Obsah N v zrně (kg/t)		Obsah P v zrně (kg/t)		Obsah K v zrně (kg/t)	
		Zrno	Sláma	Zrno	Sláma	Zrno	Sláma		Zrno	Sláma	Zrno	Sláma	Zrno	Sláma
1. nehnojená kontrola	11,82	18,91	12,24	4,42	2,11	6,80	9,90	11,33	18,12	5,29	4,1	0,97	5,19	12,19
2. CHM	12,33	19,73	9,03	4,88	2,23	6,69	8,25	10,63	17,01	4,73	4,3	1,07	5,27	12,89
3. N₂P₂K₀	12,57	20,11	8,79	4,86	1,78	6,44	9,79	10,83	17,32	3,11	3,9	0,32	4,82	13,18
4. N₂P₂K₁	12,51	20,02	8,68	4,72	1,89	6,07	9,45	10,83	17,32	3,33	3,8	0,54	5,04	17,83
5. N₂P₂K₂	12,47	19,95	9,69	4,62	1,78	5,98	10,58	10,49	16,78	3,46	3,7	0,32	4,93	18,47
6. N₂P₂K₃	12,74	20,39	10,17	4,76	1,79	6,34	11,40	10,41	16,65	2,92	3,7	0,32	4,96	20,76
7. N₂P₀K₂	12,20	19,53	8,35	4,74	1,67	6,21	11,14	10,73	17,16	3,02	3,9	0,32	5,06	19,29
8. N₂P₁K₂	12,39	19,82	8,27	4,82	1,68	6,61	11,73	10,50	16,79	3,35	3,7	0,32	5,34	19,26
9. N₂P₃K₂	12,50	20,00	9,10	4,83	1,89	6,74	10,77	10,18	16,28	3,02	3,8	0,32	5,25	18,23
10. N₁P₁K₁	12,42	19,87	7,22	4,83	1,56	6,62	9,33	10,85	17,36	3,13	3,6	0,32	4,69	17,89
11. N₃P₃K₃	12,32	19,71	8,57	4,84	1,89	6,31	13,79	10,31	16,50	3,32	3,9	0,75	5,03	26,05
12. N₃P₃K₃ nevápněno	12,66	20,25	9,57	4,64	1,67	6,56	15,68	11,22	17,95	4,07	3,9	0,64	5,07	23,26

Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace - Nehnojená kontrola



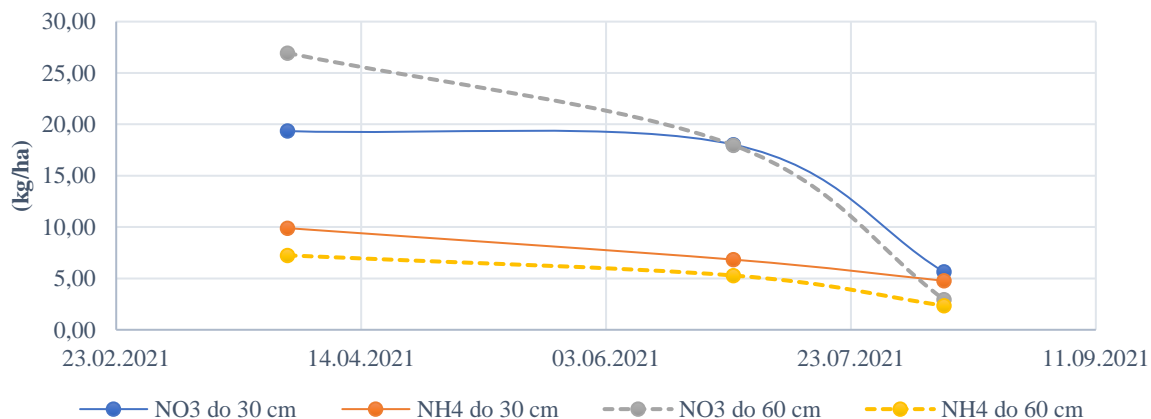
Graf č. 1

Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace - 2. CHM



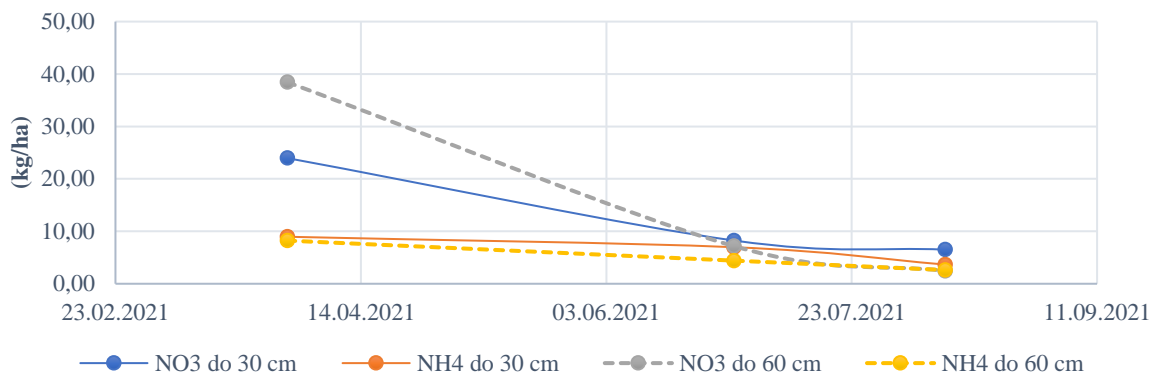
Graf č.2

Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace - 3. N₂P₂K₀



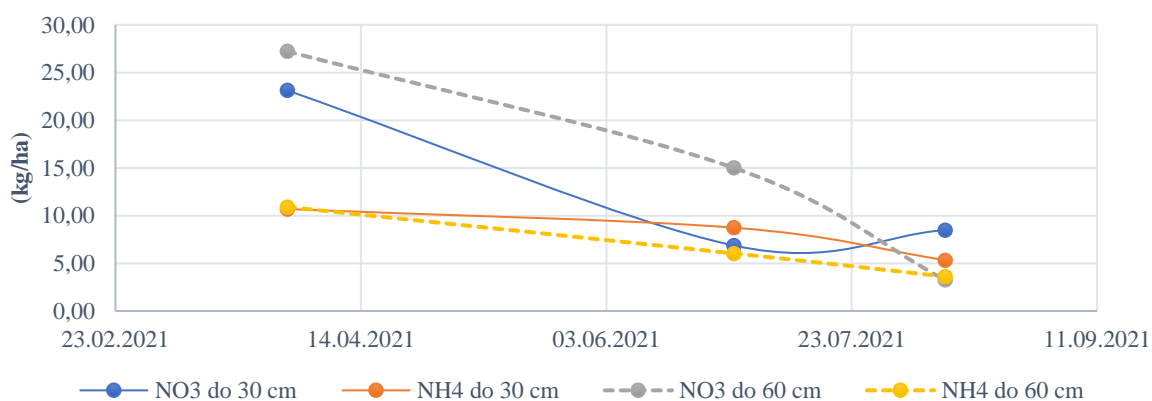
Graf č.3

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
4. N₂P₂K₁**



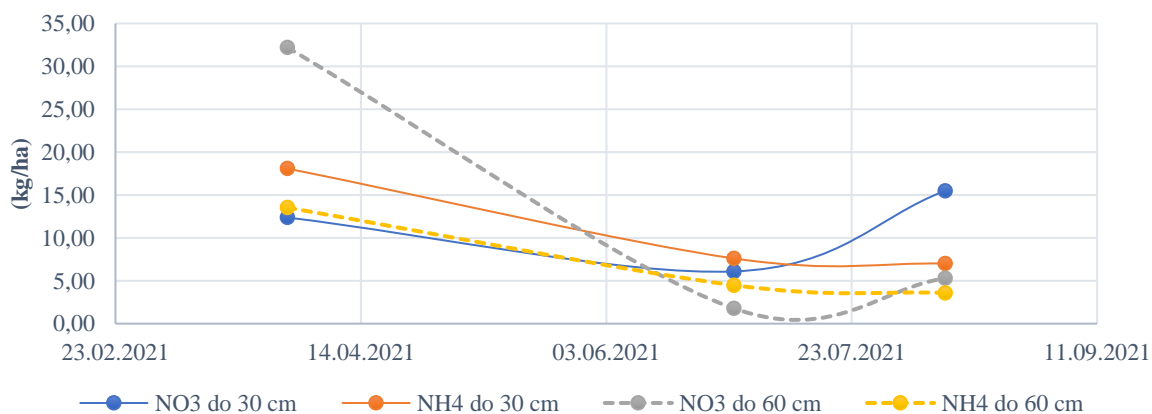
Graf č.4

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
5. N₂P₂K₂**



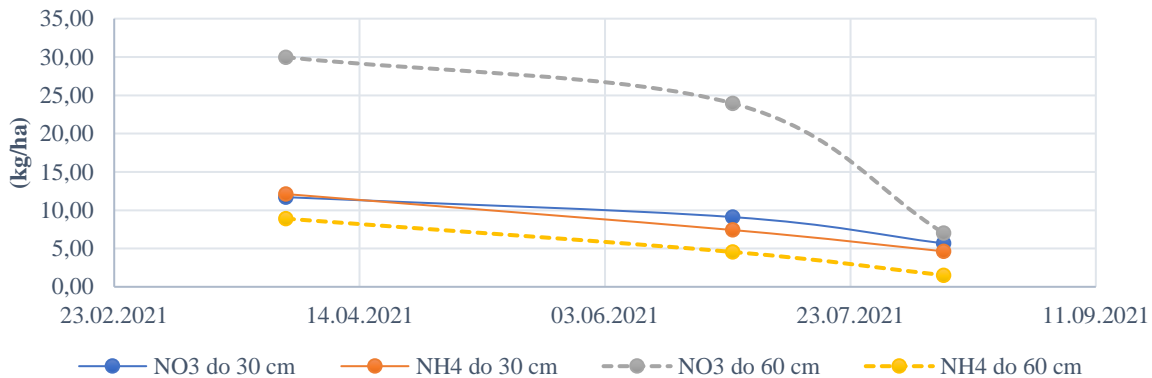
Graf č.5

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
6. N₂P₂K₃**



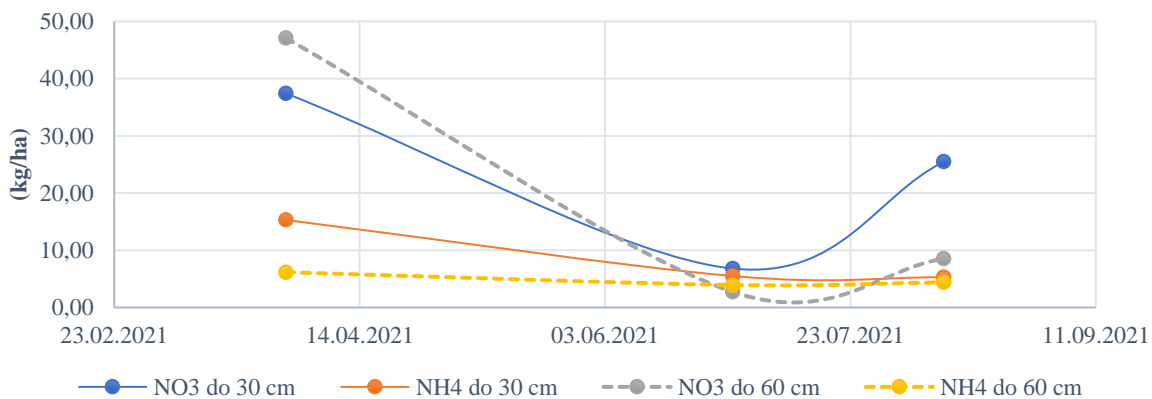
Graf č.6

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
7. N₂P₀K₂**



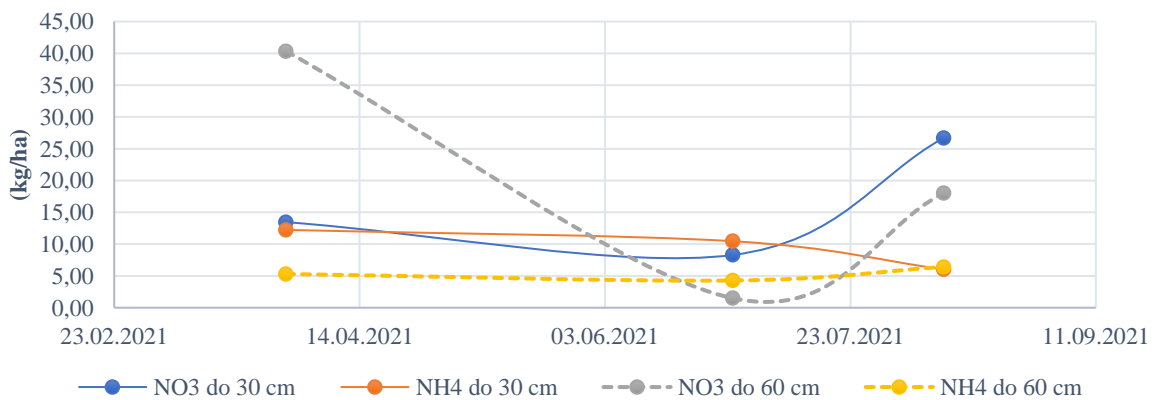
Graf č.7

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
8. N₂P₁K₂**



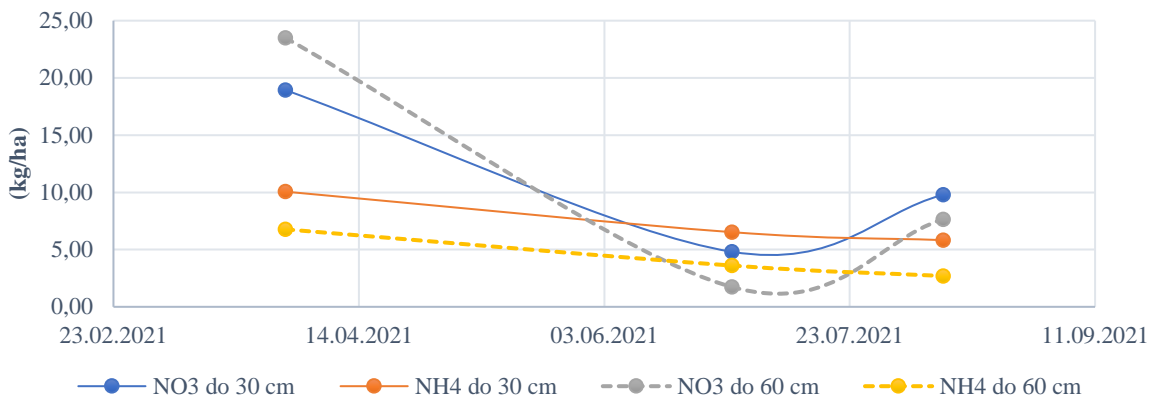
Graf č.8

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
9. N₂P₂K₂**



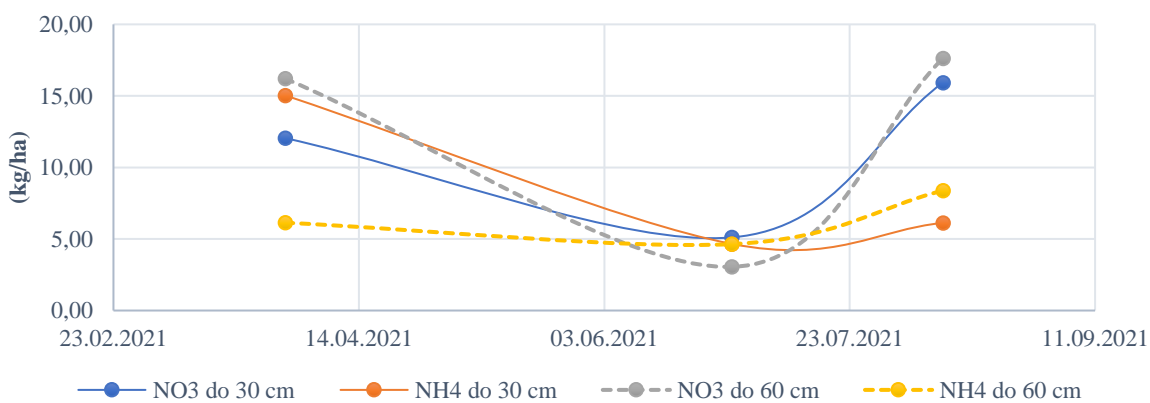
Graf č.9

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
10. N₁P₁K₁**



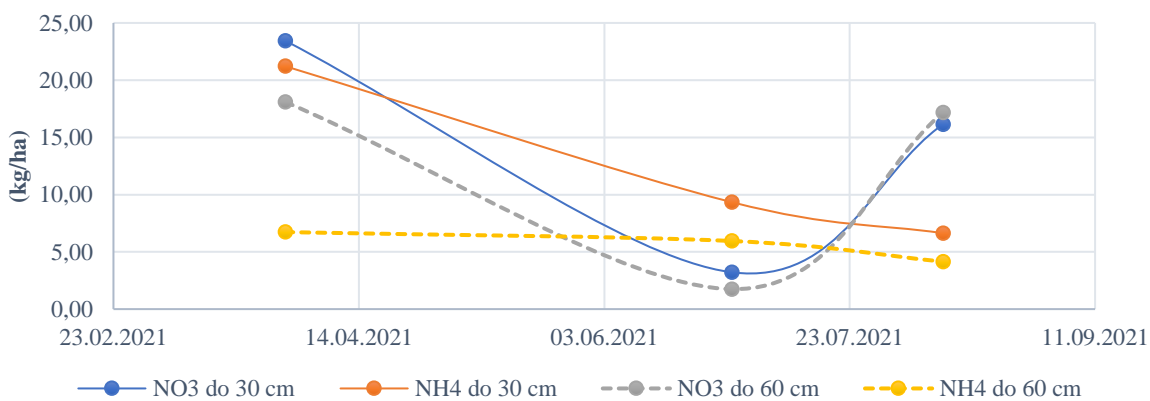
Graf č.10

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
11. N₃P₃K₃**



Graf č.11

**Graf obsahů NO₃⁻ a NH₄⁺ v průběhu vegetace -
12. N₃P₃K₃ - Ca**



Graf č.12

