

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Ing. Filip Vašák

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

Bilance fosforu a draslíku při různých systémech hnojení
The Balance of Phosphorus and Potassium with Different Fertilizing Systems

.....
autoreferát doktorské disertační práce

Studijní program: Fytotechnika

Studijní obor: Obecná produkce rostlinná

Školitel: **prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.**
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

Konzultant **Ing. Jindřich Černý, Ph.D.**
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

Oponenti: prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.
prof. Ing. Otto Ložek, CSc.
prof. Ing. Jaroslav Hlušek, CSc.

Obhajoba doktorské disertační práce se koná dne: 29.9.2016 v 10 hod.
na: Fakultě agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů ČZU v Praze

S doktorskou disertační prací je možno se seznámit na děkanátě FAPPZ ČZU v Praze.

P r a h a 2016

Obsah

1. SUMMARY	1
2. LITERÁRNÍ REŠERŠE	2
2.1 METODY ZJIŠTĚNÍ BILANCE ŽIVIN	2
2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ BILANCI ŽIVIN	2
2.3 FOSFOR	4
2.4 DRASLÍK	6
3. CÍLE	8
4. HYPOTÉZY	8
5. METODIKA.....	9
5.1 CHARAKTERISTIKA STANOVIŠŤ A POLNÍCH POKUSŮ.....	9
5.2 ODBĚR VZORKŮ A JEJICH ZPRACOVÁNÍ	12
5.3 ANALÝZY.....	13
6. VÝSLEDKY A DISKUZE	16
6.1 ODBĚR FOSFORU A DRASLÍKU PĚSTOVANÝMI PLODINAMI	16
6.2 BILANCE FOSFORU NA DLOUHODOBÝCH POLNÍCH POKUSECH	20
6.3 VLIV HNOJENÍ NA OBSAHU PŘÍSTUPNÉHO FOSFORU V PŮDĚ	22
6.4 BILANCE DRASLÍKU NA DLOUHODOBÝCH POLNÍCH POKUSECH	24
6.5 VLIV HNOJENÍ NA OBSAH PŘÍSTUPNÉHO DRASLÍKU V PŮDĚ.....	26
6.6 POPIS PROSTOROVÉ PŮDNÍ VARIABILITY SLEDOVANÝCH PARAMETRŮ	28
7. ZÁVĚR	29
POUŽITÁ LITERATURA	32
SEZNAM PUBLIKACÍ K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE	38

1. Summary

The balance of potassium and phosphorus were observed at long-term 17-year field experiments with different fertilizing systems. The field experiments were located at five sites in the Czech Republic (Červený Újezd, Hněvčeves, Humpolec, Lukavec and Suchdol) with different soil and climatic conditions. The balances were observed at: treatments with organic fertilization (sewage sludge, FYM), treatments with mineral fertilization (NPK, N, N + straw) and unfertilized control treatment, as well. Two experiments were realized: one with crop rotation (potatoes – winter wheat – spring barley) at all mentioned sites and the second was monoculture maize experiment at Červený Újezd and Suchdol sites.

The positive balance of phosphorus was at the treatments with sewage sludge (SS) as well as with farmyard manure (FYM) application and at the NPK treatment. The average phosphorus balance ranged between +1.8 and +14.0 kg/ha/year at the treatments NPK, between +7.2 and +21.6 kg/ha/year at treatments with FYM application and between +66.7 and +75.6 kg/ha/year at SS treatments, respectively. The balance of phosphorus with a higher dose of sewage sludge reached +249.6 kg/ha/year. The average negative balance of phosphorus (from -27.5 to -13.4 kg/ha/year) was calculated at the treatments N and N + straw. The balance of control unfertilized treatments ranged between -21.9 and -11.0 kg/ha/year.

The average positive balance of potassium in the experiment with crop rotation was estimated at all of FYM treatments. The balance reached the values from +2.3 to +30.1 kg/ha/year. On the contrary, the balance at FYM treatment in experiment with maize monoculture was negative (-15.2 kg K/ha/year). The balance of potassium in experiment with crop rotation ranged between -9.5 and 33.2 kg/ha/year at the NPK treatments. Similar values were obtained in the experiment with monoculture, where the balance at the NPK treatment reached +32.1 kg K/ha/year. The negative balance of potassium (between -69.2 and -8.9 kg/ha/year) was obtained at treatments with sewage sludge application. The most negative balances were calculated at N and N+straw treatments (-104 to -55.0 kg/ha/year) and as expected at Control (-73.2 to -43.6 kg K/ha/year).

The bioavailable soil phosphorus and potassium contents changes were in most cases in close relation with balances calculated. Soil variability in observed soil factors was found in the plots and confirms the assumption that the system of fertilization affects crop yields.

2. Literární rešerše

Intenzifikace zemědělské výroby bez adekvátních opatření pro obnovu půdní úrodnosti ohrožuje udržitelnost zemědělství. Bilance živin se uplatňuje jako indikátor udržitelného zemědělství. Kvantitativní odhad odebraných živin rostlinami z půdy je důležitý pro zjištění stavu degradace půdy a návrhu nápravných opatření (Roy et al., 2003).

2.1 Metody zjištění bilance živin

Požadované zvýšení zemědělské produkce pro splnění budoucí poptávky po potravinách zvyšuje nároky na půdní fond. Pro hodnocení kvality půdy jsou používány dva ukazatele:

- 1) potenciální výnos, tj. rozdíl mezi výnosem získaným za optimálních podmínek a výnosem získaným ze základních přírodních zdrojů,
- 2) bilance živin.

(Bindraban et al., 2000)

Bilance živin je kvantifikována buď na základě hodnocení změn organických látek a rostlinných živin v půdě za daný čas, nebo odečtením ztrát živin z množství živin dodaných do půdy. První metoda je limitována pohybem a přeměnami živin v půdě, druhá metoda je limitována rozdílným kvantifikováním vstupů a ztrátou živin (Bationo, 1998).

Druhou metodu kvantifikovali Stoorvogel et Smaling (1990) jako rozdíl toku živin. Stanovili pět hlavních vstupů živin do půdy (minerální hnojení, organické hnojení, suchá a mokrá depozice, fixace dusíku a sedimentace) a pět hlavních ztrát živin z půdy (živiny ve sklizňových produktech, živiny v posklizňových zbytcích, vyplavování, plynné ztráty a eroze). Dosazením těchto deseti faktorů do rovnice a zohledněním vlivu času a prostoru lze vypočítat čistou bilanci živin v půdě (ČBŽP).

$$\text{ČBŽP} = \int \text{prostor} \int \text{čas} \left(\sum_{i=1}^5 \text{vstup}_i - \sum_{j=1}^5 \text{ztráty}_j \right) \quad (1)$$

2.2 Faktory ovlivňující bilanci živin

Při výpočtu bilance živin záleží na zahrnutí vstupů a ztrát živin, prostorovém měřítku, způsobu hospodaření (Panten et al., 2009).

2.2.1 Vstupy živin do půdy

Minerální a organické hnojení - přebytek živin vzniká v případě, že množství živin aplikovaných v minerálním a organickém hnojení je větší než množství živin odebraných rostlinami (Rankinen, 2007).

Depozice - mokrá a suchá depozice jsou jedny z nejméně prostudovaných způsobů transportu živin. Mokrá depozice probíhá prostřednictvím dešťových a sněhových srážek, zatímco suchá depozice vyplývá z plynných a prachových znečišťujících látek a jejich transportu na zem nebo na vodní plochy (Anderson et Downing, 2006). Množství mokré a suché depozice není obvykle známo, a proto se depozice odvozuje pro účely bilance ze srážek (Stoorvogel et Smaling, 1990).

Sedimentace - je relevantní pro bilance pouze v oblastech přirozeně zaplavovaných nebo zavlažovaných. U oblastí přirozeně zaplavovaných se očekává, že sedimentační vrstva nebude poškozena. U zavlažovaných oblastí se počítá s pravidelnou sedimentací (Bindraban et al., 2000).

2.2.2 Ztráty živin z půdy

Živiny v hlavních sklizňových produktech - množství živin v rostlinách můžeme odvodit z průměrných obsahů živin v daném druhu rostliny a z průměrných výnosů ze zemědělských statistik (Stoorvogel et Smaling, 1990).

Živiny v posklizňových zbytcích - posklizňové zbytky jsou vztaženy k produkci dané plodiny, jejíž určité množství je ponecháno na poli (Bindraban et al., 2000). Množství živin v posklizňových zbytcích zjistíme vynásobením výnosu s obsahem živin v posklizňových zbytcích. Na základě sklizňového indexu je možné uvést množství posklizňových zbytků, které jsou na poli ponechány. Sklizňový index by měl reflektovat způsob hospodaření na půdě, jelikož může například dojít k vrácení posklizňových zbytků na pole při aplikaci slámy (Stoorvogel et Samling, 1990).

Vyplavování živin - ze zemědělských půd má za následek snížení půdní úrodnosti, urychlení acidifikace půdy, zvýšení nákladů na hnojiva, snížení výnosu plodin a negativní ovlivnění kvality povrchových a podzemních vod. Problémy vyplavování živin se podstatně liší v závislosti na intenzitě dešťových srážek a půdních vlastnostech (Laird et al., 2010). Proto

Stoorvogel et Smaling (1990) vyplavování živin koreluje s půdní úrodností, aplikací hnojiv, odběrovým normativem pro danou plodinu, obsahem jílu a množstvím srážek.

Ztráty půdní erozí - jsou největší problém obnovitelnosti a produktivity v zemědělství (Pimental et al., 1995). Ztráty živin způsobené půdní erozí vypočteme vynásobením půdních ztrát s obsahem živin v půdě (Bindraban et al., 2000). Česká republika má vodní erozí ohroženo 15,1 % z celkového území (Csathó et al., 2007). Plocha zemědělského půdního fondu je vodní erozí postižena z 50 % své rozlohy. Aktuální vodní erozí je postiženo 40 % orných půd. Větrná eroze postihuje 10 % orných půd (Anonymous, 2009).

2.2.3 Měřítka hodnocení půdní bilance

Bilance živin jsou počítány podle různých měřítek od bilance živin na poli (Vos et Putten, 2000), faremní bilance (Domburg, 2000) až po regionální bilanci (Keller et Schulin, 2003; Khai et al., 2007). Z polní bilance počítanou na ohraničeném poli (parcele), která zahrnuje základní vstupy a ztráty živin, můžeme předpovídat účinky vlivu dlouhodobé agronomické činnosti (Yu et al., 2011).

2.2.4 Půdní variabilita

Pro tok živin je velmi důležité odhadnout prostorovou a časovou variabilitu (Roy et al., 2003). James et Wells (1990) klasifikují půdní variabilitu podle orientace v prostoru (vertikální, horizontální), separovaných bodů v prostoru [mikro (0,0 – 0,05 m), meso (0,05 – 2 m) a makro (2 m a více) a způsobu vzniku (geogenní a antropogenní).

Gotway et al. (1995) popisují různé modelové typy variability části pozemku na zcela nesytematickou variabilitu (náhodná variabilita), systematickou variabilitu (pozemek je znatelně rozdělen na sub-bloky s postupnou změnou úrovně sledovaného faktoru jednotlivých částí) a nestejnorodou variabilitu (obtížné nalézt model popisu).

Půdní vlastnosti se prokazatelně mění i v čase. Obecně je nejlepším obdobím pro odběr půdního vzorku doba od poloviny léta do začátku podzimu, kdy je sezónní efekt minimální. Odběr je limitován dobou sklizně plodiny (Tan, 2005).

2.3 Fosfor

Fosfor patří mezi nejdůležitější živiny ve výživě rostlin. Vyšší obsahy P vykazují půdy s větším obsahem organické hmoty, zatímco půdy lehké s malým obsahem organické hmoty

mají obsah P nízký (Vaněk et al., 2007). Fosfor se v půdách nachází v organické a minerální formě. Organický fosfor je vázán ve sloučeninách a pro rostliny je nepřijatelný až do rozkladu organické hmoty. Zdrojem minerálního P jsou primární minerály, především skupina apatitu (Troeh et Thompson, 2005). Atmosférický spad jako další zdroj fosforu je zanedbatelný (Bünemann and Condon, 2007). Povrchový smyv je obecně považován za hlavní příčinu ztrát fosforu z půdy, jelikož fosfor je v půdě pokládán za relativně nepohyblivý (Sims et al., 1998).

Rozpustnost fosforečnanů je silně ovlivněna půdním pH. Nejpříznivější pH pro zpřístupnění fosforu pro rostliny je pH od neutrálního až po mírně kyselé (Troeh et Thompson, 2005). Efekt hnojení fosforem na výnos rostlin je poměrně nízký, protože často dochází k adsorpci a srážení přijatelných fosforečnanů v půdě (Tisdale et al., 1993). Odběr fosforu se liší podle druhu plodiny i jejich jednotlivých částí. Obecně lze říci, že plodiny pěstované na zrnو přijímají více fosforu oproti ostatním plodinám (Troeh et Thompson, 2005).

Výsledek bilance by měl být rozdílem mezi celkovým množstvím fosforu dodaným do půdy ve vstupech a celkovým množstvím fosforu exportovaného ve ztrátách za rok. Blake et al. (2003) do své rovnice nezahrnují vstup P depozicí a nerozlišují vedlejší a hlavní sklizený produkt:

$$P_{balance} = P_{hnojení} - P_{odběr\ rostlinami} \quad (2)$$

Steinshamn et al. (2004) do výpočtu bilance fosforu zahrnuli také ztrátu vyplavováním:

$$P_{balance} = P_{hnojení} - P_{odběr\ rostlinami} - P_{ztráty\ vyplavováním} \quad (3)$$

Nevyvážená aplikace fosforu v zemědělských oblastech po celém světě má za následek degradaci půd z důsledku nedostatečného množství P nebo naopak jeho přebytku a znečištěním životního prostředí (Cao et al. 2012). Na světě vykazuje 30 % z pěstebních ploch plodin nedostatek fosforu, zbývajících 70% přebytek (MacDonald et al., 2011). Ve střední Evropě se roční bilance P pohybuje od -7 kg/ha do +6 kg/ha (Csathó et al., 2007).

Na základě průměrných dávek fosforu v minerálních a organických hnojivech a průměrného odběru pěstovanými plodinami můžeme vypočítat bilanci fosforu pro ČR, která je uvedena v tabulce 1 (upraveno dle Kunzová, 2009; Kulhánek et al., 2015).

Tab. 1 Bilance P [kg/ha] na zemědělských půdách za daná období v České republice

	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2008	2010-2014
celková dávka	44	17	14	15	15	13
<i>minerální hnojiva</i>	29	5	5	6	6	5
<i>organická hnojiva</i>	15	12	9	9	9	8
celkový odběr	19	16	13	15	15	15
<i>hlavní produkt</i>	15	13	11	13	13	13
<i>vedlejší produkt</i>	4	3	2	2	2	2
bilance	25	1	1	0	0	-2

2.4 Draslík

Draslík je pro rostliny důležitou živinou. Největší část draslíku je obsažena v primárních minerálech a sekundárních jílových minerálech a množství draslíku v půdě mimo jiné závisí na typu jílových minerálů (Mengel et Kirkby, 2001). Zdrojem draslíku jsou slídové minerály (muskovit, biotit) a minerály skupiny živců – např. ortoklas (Troeh et Thompson, 2005). Různá náchylnost k zvětrávání jednotlivých jílových minerálů, a tím uvolňování draslíku je velmi významná vlastnost pro bilanci draslíku (Anderson et al., 2007). Staré zvětralé půdy mají obvykle nízký obsah a naopak mladší půdy vzniklé z vulkanických materiálů mají vyšší obsah draslíku (Portela, 1993; Graham et Fox, 1973). Hnědozemě vyvinuté na spraších mají také vysoký obsah přístupného K pro rostliny (Mengel et al., 1998). Jako další zdroje draslíku se může uplatnit depozice. V České republice, konkrétně v Praze, byla zaznamenána depozice 2 kg K/ha/rok (Anonymous, 2006).

Příjem draslíku rostlinami závisí na koncentraci draslíku v půdě. Půdní roztok není pravděpodobně nikdy satureován draselnými ionty. Draslík obsažen v půdním roztoku je nejvíce přístupný pro rostliny. Rovnovážný vztah mezi třemi skupinami draslíku je uveden na obrázku 1 (Troeh et Thompson, 2005).



Obr. 1: Vztah rovnováhy mezi třemi druhy půdního draslíku.

Nevýměnného K^+ je v půdě kolem 99 %, výměnného K^+ je kolem 1 % a K^+ v půdním roztoku je obvykle pouze kolem 0,01 % z obsahu celkového draslíku obsaženého v půdě (Troeh et Thompson, 2005).

Dávka draslíku by měla být určována podle jeho zásoby v půdě a výnosové úrovně (Vaněk et al., 2007). Vysoké dávky draslíku způsobují půdní disperzi, která má za následek pokles infiltrační schopnosti půdy, a tím zvýšení její náchylnosti k erozi (Auerswald et al., 1996). V případě využívání pouze nižších dávek organických hnojiv je vyšší riziko vzniku záporné bilance draslíku na takto obhospodařovaném pozemku (Fagerberg et al., 1996; Bengtsson et al., 2003). Odběr draslíku se liší podle druhu plodiny a jejich jednotlivých částí (Troeh et Thompson, 2005)

Rovnici pro výpočet bilance draslíku, kde je počítáno se vstupy ve formě hnojení a ztrátami pouze ve sklizených plodinách, sestavili Andrist-Rangel et al. (2007) následovně:

$$K_{balance} = F_{min} + F_{org} - H_K, \quad (4)$$

kde: F_{min} - vstupy draslíku z minerálního hnojení, F_{org} - vstupy z organického hnojení. Mezi ztráty draslíku zahrnují odběr draslíku (H_K) v sklizených plodinách včetně odvezených posklizňových zbytků.

Z hlediska bilance živin je nedostatek draslíku považován za méně důležitý v porovnání s dalšími hlavními živinami, a to zejména na půdách bohatých na obsah jílu (Öborn et al., 2005). Avšak Ellmer et Baumacker (2005) uvádí na základě sledování dlouhodobých pokusů v Rothamstedu, ve kterých porovnávali vztahy mezi bilancemi živin a vlivem na výnos plodin po 65 letech trvání pokusu, že při úbytku živin byla vyhodnocena důležitost sledovaných živin v pořadí $N > K > Ca > P$.

Na základě průměrných dávek draslíku v minerálních a organických hnojivech a průměrnému odběru pěstovanými plodinami můžeme vypočítat bilanci fosforu pro ČR, která je uvedena v tabulce 2 (upraveno dle Kunzová, 2009; Kulhánek et al., 2015).

Tab. 2 Bilance K [kg/ha] na zemědělských půdách za daná období v České republice

	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2008	2010-2014
celková dávka	131	72	53	58	60	61
<i>minerální hnojiva</i>	54	9	7	7	9	8
<i>organická hnojiva</i>	77	63	46	51	51	53
celkový odběr	91	77	66	71	71	90
<i>hlavní produkt</i>	53	44	43	41	40	*
<i>vedlejší produkt</i>	38	33	23	30	31	*
bilance	40	-5	-13	-13	-11	-29

3. Cíle

Pro doktorskou disertační práci byly zvoleny následující cíle:

- výpočty bilance fosforu na dlouhodobých polních pokusech,
- výpočty bilance draslíku na dlouhodobých polních pokusech,
- vyhodnocení vlivu hnojení na změny obsahu přístupného fosforu a draslíku v půdě,
- vyhodnocení vlivu hnojení na výnos plodin a odběr fosforu a draslíku pěstovanými plodinami,
- popis půdní variability v obsahu přístupného fosforu, draslíku a půdního pH na pokusných parcelách.

4. Hypotézy

Na základě doposud zjištěných poznatků byly stanoveny následující hypotézy:

- Předpokládá se, že rozdílným systémem hnojením bude ovlivněn nejen výnos rostlin, ale také obsah přijatelného fosforu a draslíku v půdě a jejich bilance,
- Předpokládá se výskyt antropogenní, prostorové, horizontální mesovariability s možností výskytu systematické variability.

5. Metodika

Pro účely řešení cílů doktorské disertační práce byly využívány dlouhodobé polní pokusy Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin (ČZU v Praze).

5.1 Charakteristika stanovišť a polních pokusů

Polní pokusy byly založeny na pěti stanovištích v České republice s odlišnými půdními a klimatickými podmínkami (Červený Újezd, Hněvčeves, Humpolec, Lukavec, Praha - Suchdol). Charakteristika jednotlivých stanovišť je uvedena v tabulce 3. Pokusy se dělily na dva typy: stacionární pokus s monokulturním pěstováním kukuřice na siláž (Červený Újezd, Praha – Suchdol) založený v roce 1990, respektive 1992, a stacionární pokus s rotací plodin (na všech stanovištích) založený jednotně v roce 1996.

Tab. 3 Půdní a klimatické charakteristiky stanovišť

Stanoviště	Červený Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Praha - Suchdol
Lokalizace	50°4'22"N, 14°10'19"E	50°18'46"N, 15°43'3"E	49°33'16"N, 15°21'2"E	49°33'23"N, 14°58'39"E	50°7'40"N, 14°22'33"E
Nadmořská výška [m n. m.]	398	265	525	610	286
Průměrná roční teplota [°C]	7,7	8,2	7,0	7,7	9,1
Průměrné roční srážky [mm]	493	573	665	666	495
Půdní typ	Hnědozem	Hnědozem	Kambizem	Kambizem	Černozem
Půdní subtyp	<i>modální</i>	<i>modální</i>	<i>modální</i>	<i>oglejená</i>	<i>modální</i>
Půdní druh (NRSC USDA)	prachovitá hlína	prachovitá hlína	písčítá hlína	písčítá hlína	prachovitá hlína
KVK [mmol ₊ /kg]	118	116	90	45	262
C _{ox} [%]	1,01	0,93	1,24	1,09	1,76
Objemová hmotnost pd [g/cm ³]	1,47	1,50	1,40	1,27	1,43

5.1.1 Dlouhodobé stacionární pokusy s rotací plodin

V rámci pokusu byly střídány tři plodiny ve sledu: brambory - pšenice ozimá – ječmen jarní. Na stanovišti Červený Újezd byla vzhledem k agrotechnickým možnostem pracoviště místo brambor využívána jako pokusná plodina silážní kukuřice. Organické hnojení (kal, hnůj, sláma) bylo aplikováno na podzim vždy pod brambory (kukuřici). Dávka kalu a hnoje byla stanovena podle obsahu dusíku při dávce N 330 kg/ha (hnůj, kal 1) a 990 kg/ha (kal 3). Ječná sláma byla aplikována v množství 5 t/ha na variantu N+sláma. Minerální dusíkaté hnojivo (LAV) bylo aplikováno u brambor a ječmene před založením porostu, na bloku pšenice byla dávka dusíku rozdělena na regenerační a produkční hnojení. Pokus byl založen na podzim 1996, kdy byla poprvé aplikována fosforečná a draselná hnojiva. První sklizeň plodin byla v roce 1997. Fosfor byl aplikován v trojitěm superfosfátu (TSP) a draslík v draselné soli (DS). Varianty hnojení a dávky živin v aplikovaných hnojivech jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Celkové dávky živin [kg/ha] v aplikovaných hnojivech za tříletý cyklus

	kontrola	kal 1	kal 3	hnůj	N	N+sláma	NPK
N	0	330 ¹⁾	990 ¹⁾	330 ¹⁾	330	348	330
P	0	303 ²⁾	909 ²⁾	113 ²⁾	0	6 ²⁾	90
K	0	59 ²⁾	177 ²⁾	326 ²⁾	0	42 ²⁾	300

¹⁾ celkový dusík v organických hnojivech

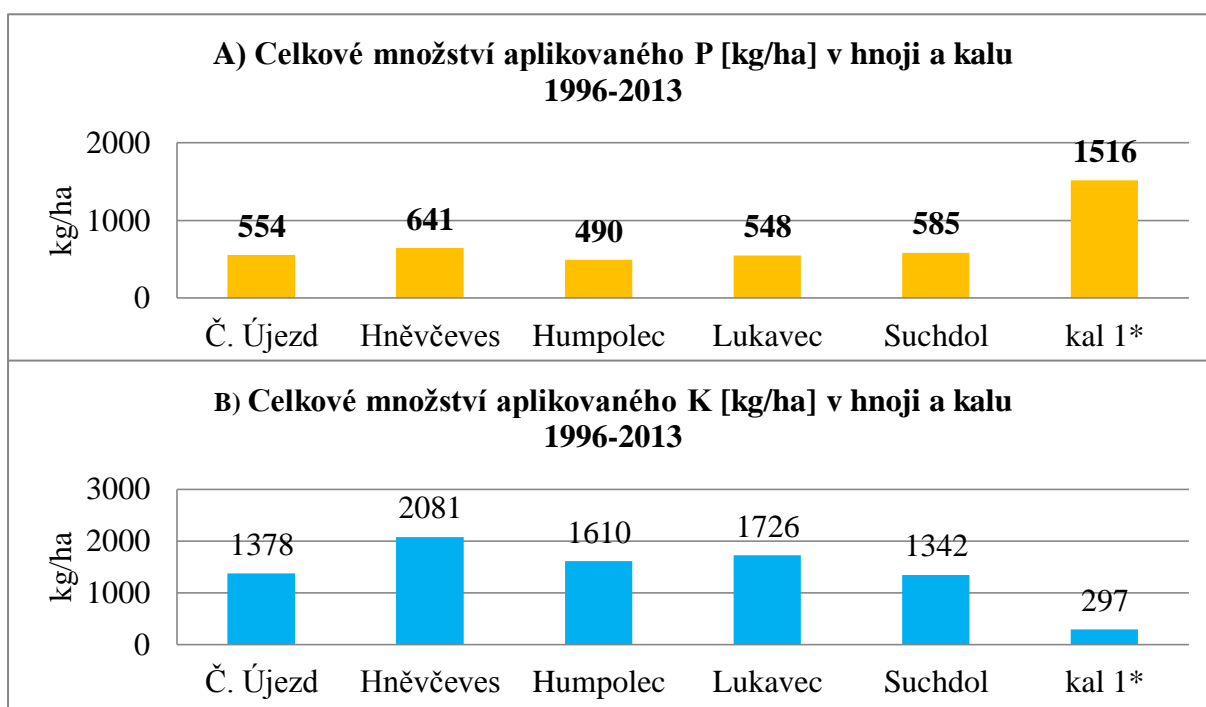
²⁾ průměrná dávka podle obsahu živin v hnojivech

Velikost pokusné parcely byla na stanovištích Hněvčeves, Humpolec a Lukavec 60 m², na stanovišti Suchdol 60,5 m² a na stanovišti Červený Újezd 80 m².

Čistírenský kal byl pro všechna stanoviště získáván z ČOV Praha - Trója. Hnůj byl pro potřeby pokusu získáván z jednotlivých pokusných stanic.

Obsah celkového aplikovaného fosforu a draslíku v hnoji a v kalu (varianta kal 1) je uveden v grafu 1.

Graf č. 1 Celkové množství aplikovaného fosforu (A) a draslíku (B) [kg/ha] v hnoji a v kalu (varianta kal 1*)



5.1.2 Dlouhodobé stacionární pokusy s monokulturou silážní kukuřice

Polní pokus s monokulturou pěstováním kukuřice na siláž byl na stanovišti Červený Újezd založen v roce 1990 a na stanovišti Suchdol v roce 1992. Z důvodu archivovaného rostlinného materiálu, ustálení systému hnojení a sjednocení termínu založení pokusu s rotací plodin byl pokus hodnocen na obou stanovištích pro účely této práce od roku 1996 do roku 2013.

Stacionární pokus s opakovaným pěstováním silážní kukuřice v Červeném Újezdě zahrnoval šest variant hnojení. Systém hnojení spolu s množstvím aplikovaných živin je uveden v tabulce 5. Každá varianta hnojení byla čtyřikrát opakována na jednotlivých pokusných parcelách o velikosti 170 m².

Tab. 5 Č. Újezd - průměrné roční dávky živin [kg/ha] za období 1996 - 2013

	kontrola	kal	hnůj	N	NPK	N+sláma
N	0	120 ¹⁾	120 ¹⁾	120	120	120
P	0	89 ²⁾	36 ²⁾	0	30	6 ²⁾
K	0	19 ²⁾	106 ²⁾	0	150	42 ²⁾

¹⁾ celkový dusík v organických hnojivech

²⁾ průměrná dávka podle obsahu živin v hnojivech

Veškeré hnojení bylo prováděno každoročně. Dusík byl aplikován v hnojivu DAM na jaře před založením porostu a následně byl po aplikaci zapraven. Organické hnojení (hnůj, kal, sláma), stejně jako granulovaný trojitý superfosfát (TSP) a draselná sůl (DS), bylo aplikováno na podzim před orbou. Množství aplikovaného organického hnojení (kal a hnůj) bylo stanoveno na základě obsahu dusíku při roční dávce N 120 kg/ha. Ječná sláma byla aplikována v množství 5 t/ha. Průměrná roční dávka sušiny byla u hnoje 15 t/ha a u kalu 10 t/ha.

Na stanovišti Suchdol bylo v pokusu pět variant hnojení. Systém hnojení spolu s množstvím aplikovaného draslíku a fosforu je uveden v tabulce 6. Každá varianta hnojení byla opakována čtyřikrát na jednotlivých pokusných parcelách o velikosti 46 m².

Tab. 6 Suchdol - průměrné roční dávky P a K [kg/ha] za období 1996 - 2013

	kontrola	N 120	kal 120	N 240	kal 240
N	0	120	120 ¹⁾	240	240 ¹⁾
P	0	0	91 ²⁾	0	182 ²⁾
K	0	0	18 ²⁾	0	36 ²⁾

¹⁾ celkový dusík v organických hnojivech

²⁾ průměrná dávka podle obsahu živin v hnojivech

Aplikace ledku amonného s vápencem (LAV) byla prováděna každoročně na jaře před založením porostu. Aplikace čistírenského kalu jedenkrát za tři roky, přičemž dávka kalu byla vždy stanovena na základě obsahu dusíku při dávce N za 3 roky 360 kg/ha, respektive 720 kg/ha.

5.2 Odběr vzorků a jejich zpracování

5.2.1 Půdní vzorky

Půdní vzorky pro stanovení půdních charakteristik byly v pokusech s rotací plodin a opakovaným pěstováním kukuřice odebrány sondovací tyčí z vrstvy 0 - 30 cm po sklizni všech plodin a před aplikací hnojiv v září. V pokusu s rotací plodin v roce 2013 byly po dokončené rotaci plodin (tj. po jarním ječmeni) odebrány z každé parcely čtyři bodové půdní vzorky podle systematického utříděného nevyrovnaného schématu skládající se z šesti vpichů. Na obou stanovištích s opakovaným pěstováním kukuřice na siláž byl z každé varianty odebrán směsný půdní vzorek skládající se z 8 vpichů v roce 2013 před aplikací hnojiv. Pro hodnocení půdní variability byly na vybraných shodných parcelách v letech 2012

a 2013 před jarní aplikací hnojiv odebrány čtyři půdní vzorky skládající se z šesti vpichů. Půdní vzorky byly po odebrání homogenizovány 5 mm sítí a následně sušeny na vzduchu s řízenou ventilací. Po usušení byly přesety 2 mm sítí.

5.2.2 Rostlinné vzorky

Rostlinné vzorky byly odebrány po sklizni po zvážení hlavních a vedlejších sklizňových produktů. Zrno bylo vyčištěno od nečistot na laboratorním pneumatickém třídíči K 293 (Petkus). Rostlinné vzorky byly sušeny na vzduchu do konstantní hmotnosti s řízenou ventilací. Po usušení byly rostlinné vzorky semlety (< 1 mm) na střížném mlýnu SM 100 (Retsch, Německo).

5.3 Analýzy

Pro potřeby doktorské práce byl u půdních vzorků stanoven: obsah přístupného fosforu a draslíku v půdě, půdní reakce (pH_{KCl}), množství organické hmoty (C_{ox}) a kationtová výměnná kapacita (KVK). V hnoji, čistírenském kalu a rostlinných vzorcích byl stanoven obsah fosforu a draslíku.

Vzorky pro stanovení množství přístupného fosforu a draslíku v půdě, celkového obsahu fosforu a draslíku v kalu, hnoji a rostlinách a KVK byly změřeny na přístroji s optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES) Agilent 720 (Agilent, USA). Vzorky pro stanovení obsahu organické hmoty byly změřeny na spektrofotometru Lambda 25 UV/VIS (PerkinElmer, USA).

5.3.1 Stanovení množství přístupného fosforu a draslíku v půdě

Množství přístupného P a K v půdě bylo stanoveno metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Při navažování byl použit poměr 1:10 w/v. Vzorky byly horizontálně třepány 5 minut. Po skončení třepání byly vzorky okamžitě přefiltrovány (Schroder et al., 2009; Zhang et al., 2009).

5.3.2 Stanovení půdní reakce

Hodnota pH půdních vzorků byla stanovena v 0,2 mol/L KCl 2:5 w/v podle metodiky ÚKZÚZ (Zbiral, 2001). Půdní reakce byla změřena na pH metru WTW pH340i pomocí skleněné elektrody WTW Sentix (WTW, Německo).

5.3.3 Stanovení obsahu organické hmoty

Obsah organické hmoty byl stanoven oxidací uhlíku na mokré cestě (C_{ox}) v půdních organických látkách podle Modifikované Tjurinovy metody. Uhlík organické hmoty byl zoxidován kyslíkem dvojchromanu draselného v chromsírové směsi (Valla et al., 2002). Množství C_{ox} bylo stanoveno kolometricky (Sims et Haby, 1971).

5.3.4 Stanovení sorpční kapacity půd

Velikost sorpční kapacity půd byla stanovena prostřednictvím kationtové výměnné kapacity (KVK) z půdních vzorků podle ČSN ISO 11260 – Stanovení efektivní kationtové výměnné kapacity a výměnných kationtů podle Gillmana (Zbírál et Honsa, 2010).

5.3.5 Stanovení obsahu živin v rostlinách

Pro stanovení obsahu živin v rostlinách byla použita metoda rozkladu na suché cestě. K loužení popela byla použita 0,25 mol/L HNO_3 (Mader et al., 1998).

5.3.6 Stanovení obsahu živin v hnoji a čistírenském kalu

Pro stanovení obsahu živin v hnoji a čistírenském kalu byla použita metoda rozkladu na mokré cestě s podporou mikrovlnného záření. Jako reakční směs byla použita HNO_3 s H_2O_2 (Hoenig et deKersabiec, 1996).

5.3.7 Statistické analýzy

Statistické vyhodnocení bylo prováděno v programu STATISTICA 12 (StatSoft, USA). Pro statistické vyhodnocení vlivu hnojení na obsah přístupného P, K a pro vyhodnocení odběru P a K v pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice na siláž byla použita jednofaktorová analýza rozptylu. Pro test normality byl použit Kolmogorovův-Smirnovův test. Podrobnější vyhodnocení bylo prováděno Tukeyho testem při hladině významnosti $\alpha \leq 0,05$. Pro popis půdní variability sledovaných parametrů byly stanoveny charakteristiky variability (rozsah, směrodatná odchylka, rozptyl a variační koeficient) a charakteristika polohy (aritmetický průměr).

Při relativním vyjádření rozdílů mezi variantami ve výnosech sklizených produktů a odběrech fosforu a draslíku byl použit vztah v poměru jednotlivých variant ke kontrolní variantě, která byla rovna 100 %.

5.3.8 Metodika výpočtů

5.3.8.1 Výpočet odběru fosforu a draslíku pěstovanými plodinami

Na základě výnosu sklizňových produktů a obsahu fosforu a draslíku v nich obsažených byl vypočten odběr fosforu a draslíku rostlinami v jednotlivých letech trvání pokusu (1997 – 2013).

5.3.8.2 Výpočet bilance fosforu a draslíku

Bilance fosforu a draslíku byla počítána podle rovnice (2) Blake et al. (2003)

$$X_{balance} = X_{hnojení} - X_{odběr\ rostlinami},$$

kde X je sledovaná živina (P, K). $X_{hnojení}$ značí množství aplikované živiny v minerálním a organickém hnojení. $X_{odběr\ rostlinami}$ značí množství odebrané živiny pěstovanými rostlinami.

5.3.8.4 Výpočet odběru fosforu a draslíku na tunu produkce

Na základě stanovených obsahů fosforu a draslíku ve sklizňových hlavních a vedlejších produktech a jejich výnosech byly spočteny odběry P a K na tunu produkce jednotlivých pěstovaných plodin. U brambor byl odběr počítán pouze z hlíz. U kukuřice na siláž byl odběr počítán z nadzemní biomasy. Odběry byly stanoveny při 100% sušíně, přičemž průměrná sušina při sklizni hlíz byla 22 %, při sklizni kukuřice na siláž 33 %. Na základě poměru výnosu slámy a zrna byl vypočten odběr sledované živiny celou nadzemní částí rostliny v přepočtu na tunu produkce zrna [kg/t zrna].

5.3.8.5 Data pro výpočty

Pro účely práce byla veškerá potřebná data pro uvedené výpočty získávána z vybraného bloku v pokusu s rotací plodin. Vliv hnojení na výnos plodin byl zjišťován ze všech tří bloků. Pokus s rotací plodin byl navržen tak, aby všechny plodiny byly pěstovány každoročně. Průměrný výnos na sledovaném bloku se lišil od průměrného výnosu ze všech bloků, a to u zrna ječmene o 7 %, zrna pšenice o 6 %, slámy ječmene o 1 %, slámy pšenice o 12 %, hlíz brambor o 3 % a kukuřice o 13 %. Na rozdíl se podílel vliv ročníku. V roce 1997 byla pěstovaná pšenice ozimá a v roce 1998 ječmen jarní. V ostatních letech již byl osevní tříletý cyklus kompletní (brambory/kukuřice – pšenice ozimá – ječmen jarní).

6. Výsledky a diskuze

6.1 Odběr fosforu a draslíku pěstovanými plodinami

Odběr fosforu a draslíku pěstovanými plodinami byl sledován v pokusu s rotací plodin a pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice. V pokusu s rotací plodin byl sledován odběr fosforu a draslíku jako celkový odběr pěstovaných plodin za jednotlivé osevní sledy.

6.1.1 Odběr fosforu pěstovanými plodinami v pokusu s rotací plodin

Celkový odběr fosforu za období 1997 – 2013 pěstovanými plodinami je uveden v tabulce 7.

Tab. 7 Celkový odběr P [kg/ha] pěstovanými plodinami za období 1997 - 2013

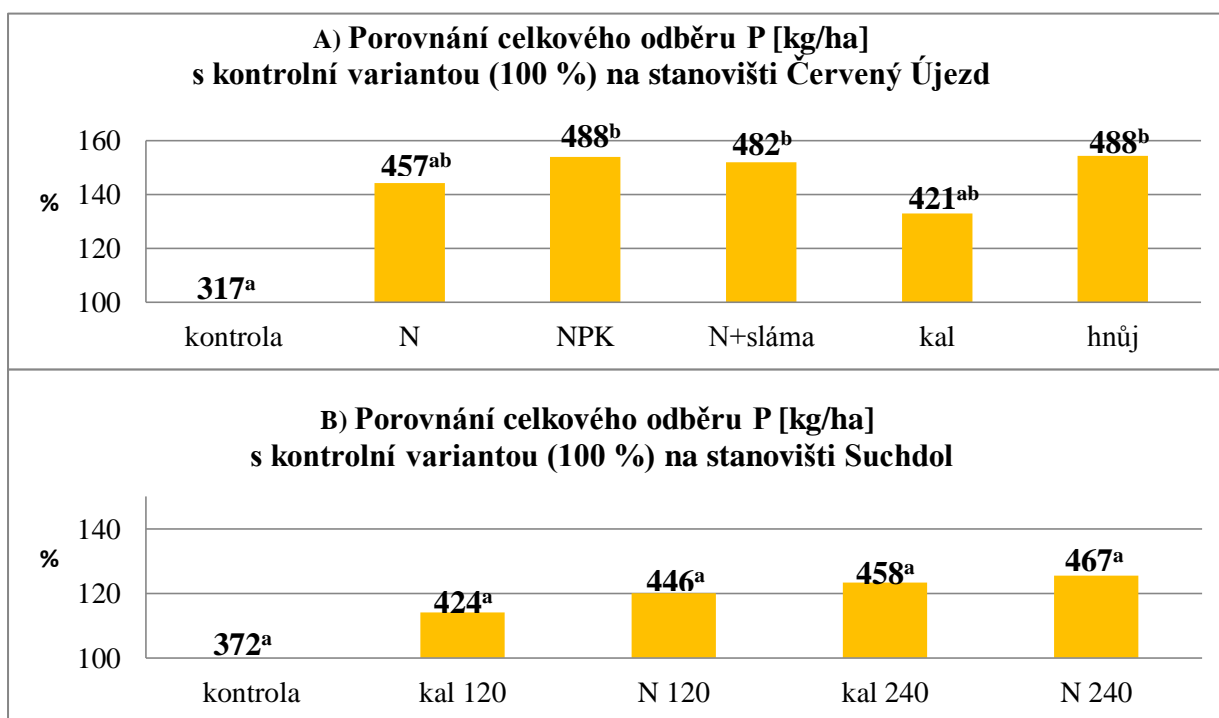
	Č. Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Suchdol
kontrola	288	261	234	195	187
kal 1	383	347	295	236	230
kal 3	444	378	328	320	305
hnůj	395	368	287	272	217
N	423	335	329	336	265
NPK	479	375	306	341	271
N+sláma	447	334	340	302	259

Odběry fosforu pěstovanými plodinami byly ovlivněny jejich výnosy. Na stanovišti Červený Újezd s nejvyšším celkovým výnosem plodin byl zaznamenán nejvyšší celkový odběr fosforu a naopak na stanovišti Suchdol s nejnižším celkovým výnosem plodin byl zaznamenán nejnižší odběr fosforu v porovnání s ostatními stanovišti. Vysoce průkaznou závislost mezi celkovou produkcí rostlin a odběrem fosforu publikovali Tůma (2002) a Baier (1997). Na stanovišti Červený Újezd byl vysoký odběr fosforu způsoben zařazením kukuřice do osevního sledu. Vaněk et al. (2007) uvádí, že kukuřice patří k náročnějším plodinám ve vztahu k požadavkům na fosfor. Kukuřice na siláž se na stanovišti Červený Újezd podílela z celkového odběru fosforu průměrně ze 47 %. Na ostatních stanovištích se hlavní sklizňové produkty z pěstovaných plodin na celkovém odběru průměrně podílely hlízy brambor z 27 %, zrno pšenice ozimé z 34 % a zrno ječmene jarního z 23 %.

6.1.2 Odběr fosforu v pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice

Celkový odběr fosforu kukuřicí na siláž za 17 let trvání pokusu a srovnání odběru jednotlivých variant s kontrolní variantou pro stanoviště Červený Újezd a pro stanoviště Suchdol je uvedeno v grafu 2.

Graf č. 2 Celkové odběry fosforu [kg/ha] kukuřicí na siláž za období 1997 – 2013 na jednotlivých variantách a porovnání (%) s kontrolní variantou pro stanoviště Červený Újezd (A) a Suchdol (B)



Na stanovišti Červený Újezd byl průkazně vyšší odběr fosforu na variantách (NPK, N+sláma a hnůj) s nejvyšším výnosem kukuřice ve srovnání s kontrolní variantou. Na stanovišti Suchdol byl na variantách se stejným hnojivem při vyšší dávce vyšší výnos a zároveň vyšší odběr fosforu. Průměrný obsah fosforu v sušině nadzemní biomasy kukuřice na siláž byl 2077 mg/kg. Podobnou hodnotu publikovali Schroder et al. (2015), kteří nezaznamenali vliv hnojení na koncentraci fosforu v kukuřici na siláž, pokud není fosfor v půdě deficitní.

6.1.3 Odběr draslíku pěstovanými rostlinami v pokusu s rotací plodin

Celkový odběr fosforu za období 1997 – 2013 pěstovanými plodinami je uveden v tabulce 8.

Tab. 8 Celkový odběr K [kg/ha] pěstovanými plodinami za období 1997 - 2013

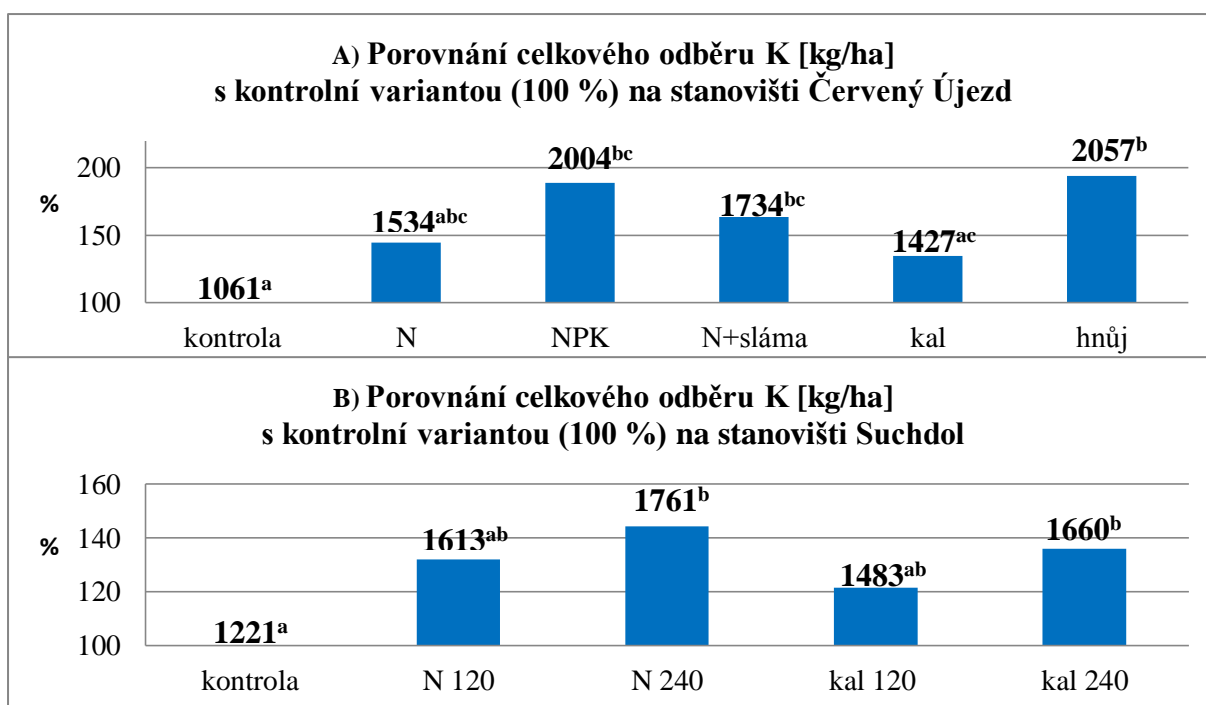
	Č. Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Suchdol
kontrola	832	1070	1244	1031	741
kal 1	1091	1394	1391	1173	804
kal 3	1267	1416	1539	1503	1042
hnůj	1189	1569	1570	1414	915
N	1424	1545	1676	1655	1006
NPK	1631	1862	1867	1807	1136
N+sláma	1547	1490	1805	1622	1144

Nejnižší celkový odběr draslíku byl na stanovišti Suchdol. Bylo to zapříčiněno nejnižším výnosem hlíz brambor ve srovnání s ostatními stanovišti. Na základě analýzy odběrů draslíku u plodin zastoupených v rotaci plodin (brambory/kukuřice – pšenice ozimá – ječmen jarní) se hlízy brambor podílely až z 65 % z celkového odběru draslíku pěstovanými plodinami. Průměrný odběr 147 kg K/ha hlízami brambor v rámci pokusu byl při průměrném obsahu draslíku v hlízách brambor 19 020 mg/kg. Množství draslíku v hlízách brambor odpovídá rozsahu 17900 – 21 500 mg/kg, který publikovali Neshev et Malanov (2015). Z dalších sledovaných pěstovaných plodin se nejvíce na celkovém odběru draslíku v rámci pokusu podílela sláma pšenice ozimé z 16 % a sláma ječmene jarního z 13 %. Nejnižší odběr draslíku pěstovanými plodinami na hnojených variantách byl na variantě kal 1. Naopak na variantě NPK byl zjištěn nejvyšší odběr draslíku na všech stanovištích kromě stanoviště Suchdol. Odběr draslíku byl ovlivněn výnosy pěstovaných plodin. To odpovídá zjištěním, které publikoval Tůma (2002), který na 6 letém polním pokusu prokázal velmi těsný vztah mezi produkcí rostlin a odběrem draslíku.

6.1.4 Odběr draslíku v pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice

Celkový odběr draslíku kukuřicí na siláž za 17 let trvání pokusu a srovnání odběru jednotlivých variant s kontrolní variantou pro stanoviště Červený Újezd a pro stanoviště Suchdol je uvedeno v grafu 3.

Graf č. 3 Celkové odběry draslíku [kg/ha] kukuřicí na siláž za období 1997 – 2013 na jednotlivých variantách a porovnání (%) s kontrolní variantou pro stanoviště Červený Újezd (A) a Suchdol (B)



V pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice na stanovištích Červený Újezd a Suchdol byl z hnojených variant nejnižší odběr draslíku na variantě kal, respektive kal 120. Tyto varianty se vyznačovaly nejnižšími průměrnými výnosy z hnojených variant. Na stanovišti Červený Újezd byly na variantách s nevyšším výnosem průkazně vyšší odběry draslíku ve srovnání s kontrolní variantou. Na stanovišti Suchdol na variantách se shodným typem hnojením byly při vyšší dávce aplikovaného hnojiva vyšší výnosy a statisticky průkazně vyšší odběry draslíku ve srovnání s kontrolní variantou.

6.2 Bilance fosforu na dlouhodobých polních pokusech

Bilance fosforu byla sledována za období 1997 – 2013 na dlouhodobých polních pokusech s rotací plodin a s monokulturálním pěstováním kukuřice na siláž. Bilance fosforu pro jednotlivá stanoviště a jednotlivé typy pokusů byla vypočtena podle rovnice 2.

Bilance fosforu [kg P/ha/rok] za období 1997 – 2013 v pokusu s rotací plodin na stanovištích Červený Újezd, Hněvčeves, Humpolec, Lukavec a Suchdol je uvedena v tabulce 9.

Tab. 9 Průměrná bilance P [kg/ha/rok] v pokusu s rotací plodin

	Č. Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Suchdol
kontrola	-17,0	-15,4	-13,8	-11,5	-11,0
kal 1	+66,7	+68,8	+71,9	+75,3	+75,6
kal 3	+241,5	+245,4	+248,3	+248,8	+249,6
hnůj	+9,4	+16,1	+12,0	+16,2	+21,6
N	-24,9	-19,7	-19,3	-19,8	-15,6
NPK	+1,8	+7,9	+12,0	+9,9	+14,0
N+sláma	-24,5	-17,8	-18,2	-15,9	-13,4

Bilance fosforu [kg/ha/rok] v pokusu s monokulturálním pěstováním kukuřice za období 1997 - 2013 je pro stanoviště Červený Újezd uvedena v tabulce 10 a pro stanoviště Suchdol v tabulce 11.

Tab. 10 Průměrná bilance P [kg/ha/rok] v pokusu s monokulturou v Červeném Újezdě

kontrola	kal	hnůj	N	NPK	N+sláma
-18,6	+63,8	+7,2	-26,9	+1,3	-22,3

Tab. 11 Průměrná bilance P [kg/ha/rok] v pokusu s monokulturou v Suchdole

kontrola	kal 120	N 120	kal 240	N 240
-21,9	+66,2	-26,3	+155,4	-27,5

Průměrná roční bilance fosforu v pokusu s rotací plodin se na kontrolních variantách pohybovala od -11,0 do -17,0 kg/ha/rok. Hodnota bilance byla ovlivněna celkovým výnosem plodin a zařazenými plodinami do osevního sledu. Blake et al. (2000) uvádí průměrnou roční bilanci fosforu na kontrolní variantě -5,9 kg/ha/rok na základě 30 letého pokusu v Rothamstedu (Velká Británie) při osevním sledu hrách jarní – pšenice ozimá – brambory.

Kladná bilance fosforu byla na všech stanovištích a typech pokusů na variantách s aplikací čistírenského kalu a hnoje a na variantě NPK. To je ve shodě s publikovaným výsledkem z pokusu Leipzig – Halle (Německo), u kterého byla kladná bilance fosforu +8,4 kg/ha/rok na variantě NPK při dávce 32 kg P/ha/rok při průměrném odběru rostlin 23,6 kg P/ha/rok a osevním sledu cukrová řepa – ječmen jarní – brambor – pšenice ozimá (Blake et al., 2000). Kladnou bilanci fosforu +93,1 kg/ha po aplikaci čistírenského kalu při průměrné dávce 111 kg P/ha/rok publikovali Annaheim et al., (2016). Na základě 16 letého pokusu při osevním sledu s rovnoměrným zastoupením brambor k obilovinám (pšenice, ječmen) uvádí Lauringson et al. (2004) bilanci fosforu +5,1 kg/ha/rok při průměrném množství aplikovaného P v hnoji 18 kg/ha/rok. Blake et al. (2003) publikují kladnou bilanci fosforu +38 kg/ha/rok po aplikaci hnoje při dávce 46 kg P/ha/rok na 25 letém pokusu a bilanci +10,7 kg P/ha/rok při dávce 18 kg P/ha/rok v aplikovaném hnoji na 50 letém pokusu.

Záporná bilance fosforu byla vždy na variantě N+sláma a N. Bylo to způsobeno vlivem aplikovaného dusíku v minerálních hnojivech, což přispělo ke zvýšení výnosů pěstovaných plodin, a tím i vyšším odběrům fosforu. Na jednotlivých stanovištích byla záporná bilance varianty N+sláma vždy nižší ve srovnání s variantou N. Bylo to zapříčiněno dodáním fosforu ve slámě.

V pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice byly podobné výsledky jako v pokusu s rotací plodin, kde na variantách s aplikací čistírenského kalu a hnoje a na variantě NPK byla kladná bilance. Na variantách s minerálním dusíkatým hnojením byla vyšší záporná bilance při vyšší dávce N. Bylo to zapříčiněno vyšším výnosem, a tím i vyšším odběrem fosforu.

6.3 Vliv hnojení na obsahu přístupného fosforu v půdě

Vliv hnojení na obsah přístupného fosforu v půdě byl sledován v pokusech s rotací plodin a monokulturním pěstováním kukuřice. Byl vyhodnocen rozdíl v obsazích přístupného fosforu od založení pokusu do roku 2013 a porovnány rozdíly v obsazích přístupného fosforu mezi jednotlivými variantami na jednotlivých stanovištích.

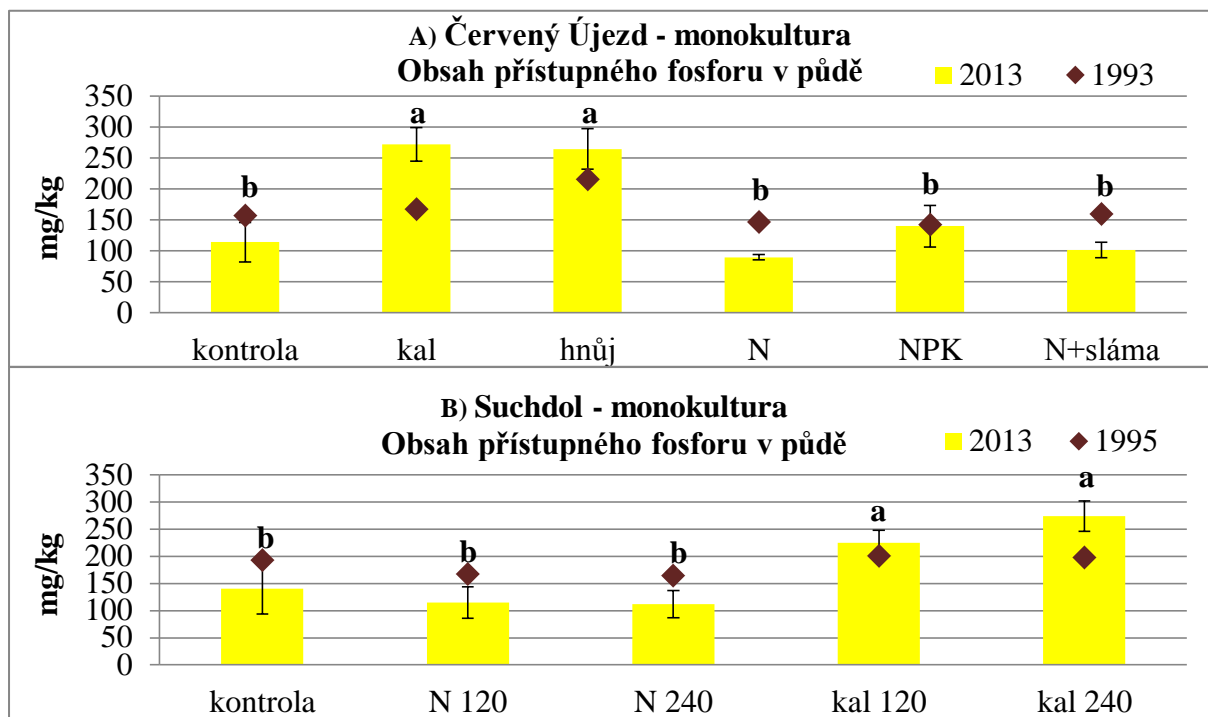
V tabulce 12 jsou uvedeny změny v obsahu přístupného fosforu v pokusu s rotací plodin mezi lety 1996 a 2013 na jednotlivých stanovištích spolu se znázorněním statistického vyhodnocení obsahu přístupného P v roce 2013 mezi variantami na jednotlivých stanovištích.

Tab. 12 Změna obsahu přístupného P [mg/kg] po 17 letech trvání pokusu

	Č. Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Suchdol
kontrola	-45 ^d	15 ^{cd}	-10 ^a	-44 ^b	-3 ^c
kal 1	107 ^b	126 ^b	31 ^a	40 ^{ab}	83 ^b
kal 3	258 ^a	208 ^a	71 ^a	135 ^a	123 ^a
Hněj	37 ^c	72 ^{bc}	-19 ^a	56 ^{ab}	18 ^c
N	-57 ^d	1 ^{cd}	57 ^a	-44 ^b	-22 ^c
NPK	-36 ^{cd}	-12 ^{cd}	-25 ^a	-56 ^b	-8 ^c
N+sláma	-54 ^{cd}	-16 ^d	-61 ^a	-42 ^b	-11 ^c

Obsah přístupného fosforu v půdě na začátku sledování pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice a v roce 2013, spolu se statistickým vyhodnocením pro stanoviště Červený Újezd a Suchdol, jsou znázorněny v grafu 4. Na stanovišti Červený Újezd byly jako vstupní vzorky využity archivní vzorky z jara 1993. Na stanovišti Suchdol byly jako vstupní vzorky využity archivní vzorky z podzimu 1995.

Graf č. 4 Obsah přístupného P v půdě na začátku sledování pokusu a v roce 2013 společně se statistickým vyhodnocením na stanovišti Červený Újezd (A) a Suchdol (B)



Po 17 letech trvání pokusu s rotací plodin a monokulturním pěstováním kukuřice obsah přístupného fosforu na všech stanovištích na variantách s aplikací čistírenského kalu vzrostl. Bylo to způsobeno dodáním fosforu v čistírenském kalu, ve kterém se množství fosforu v aplikovaných kalech pohybovalo v rozmezí 1 – 6 % (tj. 10 – 60 g/kg v kalu). Je to více než uvádí Balík et al. (1999), který pro Českou republiku udává průměrný obsah 1,2 % fosforu v čistírenském kalu. Vyšší obsah 2,5 % fosforu v kalu uvádí Sommers (1977). Varianta hnůj na obou typech pokusu vykazovala většinou vyšší obsah přístupného fosforu ve srovnání s variantami s aplikací minerálních hnojiv. Může to být způsobeno dodáním organické hmoty v hnoji do půdy. Huminové kyseliny (obsaženy mj. i v hnoji) snižují sorpci fosforu, protože se dělí o sorpční místa na aktivním povrchu půdy a zvyšují uvolňování fosforu půdou (Mikulášová et al., 1997). Zvýšení obsahu přístupného fosforu v půdě po přidání huminové kyseliny po aplikaci fosforečnanu amonného publikovali Bermudez et al. (1993). Přidání hnoje či kompostu pro zvýšení obsahu fosforu v půdě doporučuje v závěrech své práce Eghball (2002). Vrkoč et al (2002) uvádí, že při dávce fosforu 22 kg/ha v kombinaci s hnojem aplikovaným jedenkrát za tři roky se každoročně zvýší obsah fosforu v půdě o 1-3 mg/kg.

6.4 Bilance draslíku na dlouhodobých polních pokusech

Bilance draslíku byla sledována za období 1997 – 2013 v dlouhodobých polních pokusech s rotací plodin a s monokulturálním pěstováním kukuřice na siláž. Bilance draslíku pro jednotlivá stanoviště a jednotlivé typy pokusu byla spočtena podle rovnice 2.

Bilance draslíku [kg K/ha/rok] za období 1997 – 2013 v pokusu s rotací plodin na stanovištích Červený Újezd, Hněvčeves, Humpolec, Lukavec a Suchdol je uvedena v tabulce 13.

Tab. 13 Průměrná bilance K [kg/ha/rok] v pokusu s rotací plodin

	Č. Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Suchdol
kontrola	-48,9	-63,0	-73,2	-60,6	-43,6
kal 1	-46,7	-64,5	-64,3	-51,5	-29,8
kal 3	-22,1	-30,9	-38,2	-36,0	-8,9
hnůj	+11,1	+30,1	+2,3	+18,3	+25,2
N	-83,8	-90,9	-98,6	-97,4	-59,2
NPK	+4,1	-9,5	-9,8	-6,3	+33,2
N+sláma	-78,6	-75,2	-93,8	-83,0	-54,9

Bilance draslíku [kg/ha/rok] v pokusu s monokulturálním pěstováním kukuřice za období 1997 - 2013 je pro stanoviště Červený Újezd uvedena v tabulce 14 a pro stanoviště Suchdol v tabulce 15.

Tab. 14 Průměrná bilance K [kg/ha/rok] v pokusu s monokulturou v Č. Újezdě

kontrola	kal	hnůj	N	NPK	N+sláma
-62,4	-65,2	-15,2	-90,3	+32,1	-60,0

Tab. 15 Průměrná bilance K [kg/ha/rok] v pokusu s monokulturou v Suchdole

kontrola	kal 120	N 120	kal 240	N 240
-71,8	-69,1	-94,9	-61,5	-103,6

Průměrná roční bilance draslíku se v pokusu s rotací plodin pohybovala na kontrolních variantách v rozmezí od -43,6 do -73,2 kg/ha/rok. Hodnota bilance byla ovlivněna výnosem plodin, zejména výnosem hlíz brambor. Blake et al. (1999) uvádí průměrnou roční bilanci draslíku na kontrolní variantě -21 kg/ha/rok, a to na základě 30 letého pokusu v Rothamstedu (Velká Británie) při osevním sledu hrách jarní – pšenice ozimá – brambor.

Kladná průměrná bilance draslíku byla v pokusu s rotací plodin na variantě hnůj a pohybovala se průměrně od +2,3 do +30,2 kg/ha/rok. Bylo to způsobeno jednak dodáním draslíku v hnoji, a jednak menším odběrem draslíku pěstovanými plodinami. Kladnou bilanci draslíku po aplikaci hnoje uvádí řada autorů. Blake et al. (1999) uvádí na zmiňovaném pokusu v Rothamstedu bilanci draslíku na variantě hnůj +234 kg K/ha/rok při průměrné dávce draslíku v aplikovaném hnoji 336 kg/ha/rok. V pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice na siláž na stanovišti Červený Újezd byla na variantě hnůj zjištěna záporná bilance draslíku. Oproti pokusu s rotací plodin to bylo vlivem opakovaného vyššího odběru draslíku kukuřicí na siláž a nižším vstupem draslíku v aplikovaném hnoji. Na variantě NPK byla na stanovištích Červený Újezd a Suchdol kladná bilance, draslíku na rozdíl od ostatních stanovišť. Na stanovišti Červený Újezd to bylo způsobeno zařazením kukuřice na siláž do osevního sledu, která měla nižší odběr draslíku ve srovnání s hlízami brambor. Odběr draslíku u silážní kukuřice byl v průměru o 23 % nižší ve srovnání s odběrem draslíku hlízami brambor na stanovištích Hněvčeves, Humpolec a Lukavec. Na stanovišti Suchdol byla kladná bilance draslíku z důvodu nízkých výnosů hlíz brambor. Na stanovištích Hněvčeves, Humpolec a Lukavec byla na variantě NPK bilance draslíku záporná. Bylo to zapříčiněno celkovými vyššími výnosy pěstovaných plodin, zejména hlízami brambor, a tím vyšším odběrem draslíku. Blake et al. (1999) uvádí průměrnou zápornou roční bilanci draslíku na variantě NPK -28 kg/ha/rok v pokusu v Leipzig – Halle (Německo) založeném v roce 1902 při osevním sledu cukrová řepa – ječmen jarní – brambor – pšenice ozimá. Jak autoři uvádí, na zápornou bilanci draslíku má vliv především zařazení okopanin do osevního sledu, a tím vyšší odběry draslíku. V pokuse s monokulturou kukuřice na variantě NPK byla zjištěna kladná bilance draslíku, a to z důvodu vyššího množství aplikovaného K (o 50 kg/ha/rok) ve srovnání s pokusem s rotací plodin.

6.5 Vliv hnojení na obsah přístupného draslíku v půdě

Vliv hnojení na obsah přístupného draslíku v půdě byl sledován v pokusech s rotací plodin a monokulturním pěstováním kukuřice. Byl vyhodnocen rozdíl v obsazích přístupného draslíku od založení pokusu do roku 2013 a porovnány rozdíly v obsazích přístupného draslíku mezi jednotlivými variantami na jednotlivých stanovištích.

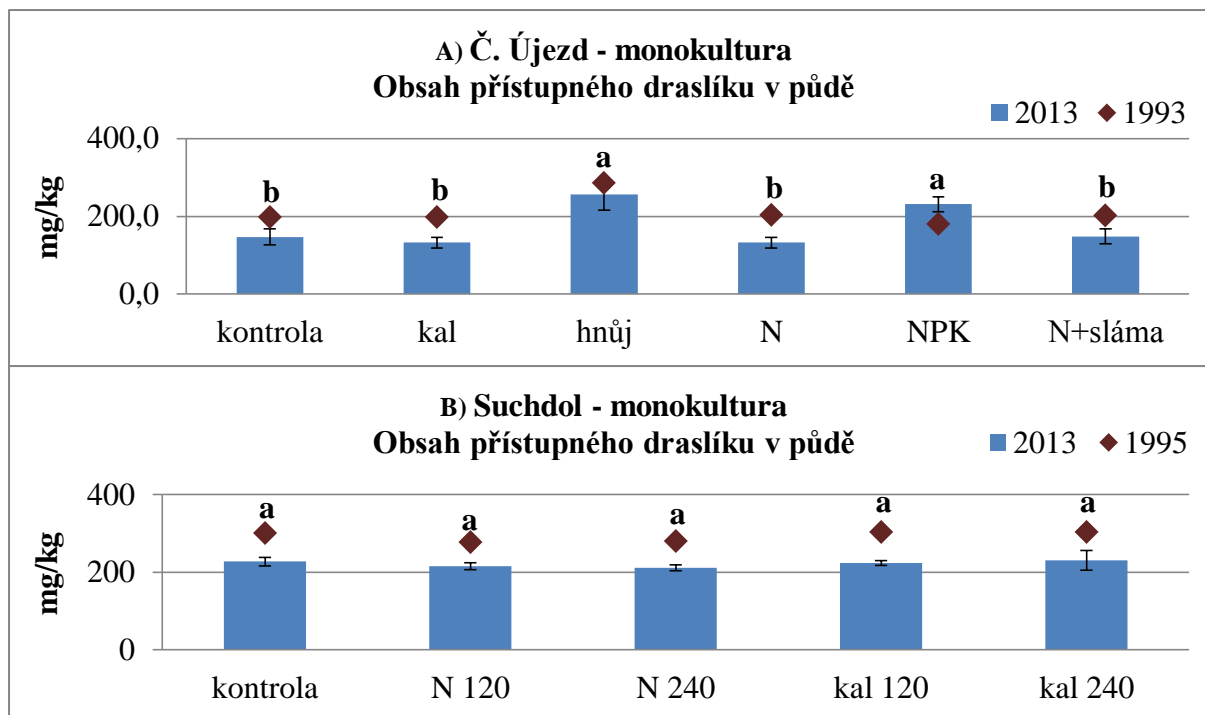
V tabulce 16 jsou uvedeny rozdíly v obsahu přístupného draslíku v pokusu s rotací plodin mezi lety 1996 a 2013 na jednotlivých stanovištích spolu se znázorněním statistického vyhodnocení obsahu přístupného K v roce 2013 mezi variantami na jednotlivých stanovištích.

Tab. 16 Změna obsahu přístupného K [mg/kg] po 17 letech trvání pokusu

	Č. Újezd	Hněvčeves	Humpolec	Lukavec	Suchdol
kontrola	-69 ^{cd}	-28 ^b	-43 ^b	-81 ^{ab}	-44 ^{ab}
kal 1	-27 ^{bcd}	-26 ^b	-81 ^b	-55 ^{ab}	-31 ^b
kal 3	-17 ^{abc}	-8 ^b	-45 ^b	-62 ^{ab}	-66 ^b
hnůj	28 ^{ab}	69 ^a	-37 ^a	-1 ^a	-18 ^{ab}
N	-38 ^d	-36 ^{ab}	-71 ^b	-83 ^b	-37 ^{ab}
NPK	41 ^a	-64 ^b	1 ^a	-82 ^{ab}	17 ^a
N+sláma	-10 ^{bcd}	-26 ^b	-75 ^b	-100 ^{ab}	-27 ^b

Obsah přístupného draslíku v půdě na začátku sledování pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice a v roce 2013, spolu se statistickým vyhodnocením pro stanoviště Červený Újezd a Suchdol, jsou znázorněny v grafu 5. Na stanovišti Červený Újezd byly jako vstupní vzorky využity archivní vzorky z jara 1993. Na stanovišti Suchdol byly jako vstupní vzorky využity archivní vzorky z podzimu 1995.

Graf č. 5 Obsah přístupného K v půdě na začátku sledování pokusu a v roce 2013 společně se statistickým vyhodnocením na stanovišti Červený Újezd (A) a Suchdol (B)



Aplikace hnoje přispěla k udržení nebo zvýšení obsahu přístupného draslíku na většině stanovišť. Bylo to jednak zapříčiněno množstvím aplikovaného draslíku v hnoji a dodáním organické hmoty v aplikovaném v hnoji. Kondratowicz - Maciejewska et Kobiński (2011) zjistili na 22 letém pokusu, že obsah přístupného draslíku v půdě se zvyšující se dávkou hnoje prokazatelně stoupá. Vrkoč et al (2002) uvádí, že při dávce draslíku 83 kg/ha v kombinaci s hnojem aplikovaným jednou za tři roky se každoročně zvýší obsah draslíku v půdě o 1 - 3 mg/kg. Pokles přístupného draslíku v půdě na variantě NPK byl zaznamenán v pokusu s rotací plodin na stanovištích s vyšším výnosem hlíz brambor. Snížení obsahu přístupného draslíku v půdě po 17 letech na variantcáh kal 1 a kal 3 na všech stanovištích v pokusech s rotací plodin a monokulturním pěstováním kukuřice je pravděpodobně zapříčiněno nízkým obsahem draslíku v kalech, kterého bývá méně než ve stájových hnojivech. V aplikovaných kalech v rámci pokusu se obsah draslíku pohyboval v rozmezí 0,5 – 0,8 %, což odpovídá publikované hodnotě 0,6 % (Černý et al., 2009). Další autoři uvádí menší obsah draslíku v čistírenském kalu. Například Sommers (1977) uvádí 0,4 % a Gondek et Kopec (2008) pouze 0,3 %.

6.6 Popis prostorové půdní variability sledovaných parametrů

Prostorová půdní variabilita byla sledována u obsahu přístupného fosforu, draslíku a půdní reakce (pH_{KCl}) v pokusech s rotací plodin a s monokulturním pěstováním kukuřice na siláž.

Variabilita půdní reakce byla nízká na všech stanovištích na obou typech pokusu. Hodnota variačního koeficientu (CV %) se na polních pokusech pohybovala v rozmezí od 0,1 do 8,4 %, přičemž průměrná hodnota byla 2,3 %. Na stanovišti Suchdol byla variabilita půdní reakce nejnižší ze všech stanovišť. Hodnota CV se pohybovala na jednotlivých parcelách od 0,1 % do 2,2 %. Bylo to způsobeno dobrou pufrací schopností černozemě, kterou prokázali na shodném pokusu Vašák et al. (2015), u které nedošlo ke změně půdní reakce po 14 leté aplikaci hnojiv. To se shoduje s výsledky pokusu publikovanými Gandois et al. (2011), na kterém nedošlo při dávkách dusíku 310 kg/ha a 610 kg/ha na karbonátových půdách ke změně pH. Naopak na bezkarbonátových půdách došlo k poklesu pH o 1,3.

Variační koeficient obsahu přístupného fosforu se na polních pokusech pohyboval v rozmezí 1 – 46 %. Nízkou míru variability v obsahu přístupného P na polních pokusech vykazovaly varianty NPK, kontrola a N+sláma. Vysoké hodnoty CV vykazovaly varianty s aplikací kalu. V pokusu s rotací plodin byl na variantě kal 1 rozsah CV 14 – 32 %, na variantě kal 3 byl rozsah CV 10 – 46 %. Vysoké hodnoty CV byly způsobeny dodáním většího množství fosforu do půdy v čistírenských kalech a důsledkem toho zvýšením obsahu P v svrchní vrstvě půdy. Podobné výsledky publikovali Mantovi et al. (2000). Na variantě s aplikací kalu mohla nastat chyba vzorkování (Kempthorne et Allmaras, 1986; Petersen et Calvin, 1986), protože při odběru půdního vzorku se mohla odebrat část půdní matrice s nerozloženým kalem.

Půdní variabilita přístupného draslíku nebyla na polních pokusech vysoká. Hodnota variačního koeficientu obsahu přístupného K se pohybovala v rozmezí 1 – 22 %, přičemž průměrná hodnota CV byla 8 %. Nejvyšší míru variability vyjádřenou CV vykazovala varianta hnůj v pokusu s rotací plodin, na které byla průměrná hodnota CV 15 %. Bylo to pravděpodobně zapříčiněno dodáním draslíku v hnoji.

Hodnota CV v obsahu přístupného fosforu a draslíku je nižší, než uvádí Geypens et al. (1999), který u P uvádí rozsah 15 – 19 % a u K 33 – 65 %. Je to zapříčiněno bližším umístěním odběrových bodů. To odpovídá výsledkům publikovaným v Brodský (2003).

7. Závěr

Z výsledků získaných z dlouhodobých polních pokusů s rotací plodin a s monokulturním pěstováním kukuřice na siláž můžeme konstatovat následující závěry.

Průměrná bilance fosforu na nehnojených variantách v pokusu s rotací plodin se pohybovala v rozmezí od -11,0 do -15,4 kg/ha/rok, na stanovišti se zařazením kukuřice do osevního sledu byla bilance -17,0 kg P/ha/rok. V pokusu s monokulturou kukuřice byla bilance na nehnojené variantě -18,6 respektive -21,9 kg P/ha/rok. Odběr fosforu byl ovlivněn pěstovanými plodinami a výnosem hlavních sklizňových produktů a projevil se vliv vyšších nároků kukuřice na fosfor.

Kladná průměrná bilance fosforu byla na obou typech pokusů na variantách s aplikací čistírenského kalu, hnoje a na variantě NPK. Na variantě NPK byla bilance fosforu při dávce 30 kg P/ha/rok v pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice +1,3 kg P/ha/rok. V pokusu s rotací plodin při shodné dávce fosforu se bilance pohybovala v rozmezí od +1,8 do +14,0 kg P/ha/rok. Na variantě hnůj v pokusu s rotací plodin se bilance fosforu pohybovala v rozmezí od +9,4 kg P/ha/rok do +21,6 kg P/ha/rok při průměrné dávce fosforu v aplikovaném hnoji 33,2 kg P/ha/rok. V pokusu s monokulturou kukuřice byla průměrná bilance fosforu při průměrném množství aplikovaného fosforu v hnoji 36 kg P/ha/rok na variantě hnůj +7,2 kg P/ha/rok. Přestože průměrná bilance fosforu na variantě NPK a hnůj byla kladná, v některých sledovaných letech vykazovala záporné hodnoty. Na variantě kal 1 se bilance fosforu pohybovala v rozmezí od +66,7 do +75,6 kg/ha/rok při průměrném množství aplikovaného fosforu 89 kg P/ha/rok. S vyšší dávkou kalu se zvyšoval výnos a odběr fosforu a bilance dosahovala hodnoty až +250 kg P/ha/rok. Varianty s aplikací čistírenského kalu vykazovaly nadměrný přísun fosforu.

Průměrná záporná bilance fosforu na variantách N a N+sláma se na obou typech pokusu pohybovala v rozmezí od -13,4 do -27,5 kg P/ha/rok. Záporná bilance fosforu na jednotlivých stanovištích na variantě N byla vždy vyšší ve srovnání s variantou N+sláma, a to pravděpodobně z důvodu částečné úhrady fosforu ve slámě.

Průměrná bilance draslíku na nehnojených variantách v pokusu s rotací plodin se pohybovala v rozmezí od -43,6 do -73,2 kg/ha/rok. V pokusu s monokulturou kukuřice byla bilance draslíku -62,4 respektive -71,8 kg/ha/rok. Odběr draslíku byl ovlivněn výnosy plodin, v pokusu s rotací plodin zejména výnosem brambor.

Kladná průměrná bilance draslíku byla na variantě hnůj v pokusu s rotací plodin. Bilance se na pokusných stanovištích pohybovala v rozmezí od +2,3 do +30,1 kg K/ha/rok při průměrném množství draslíku aplikovaného v hnoji 95,7 kg/ha/rok. V pokusu s monokulturou kukuřice byla záporná průměrná bilance na variantě hnůj (-15,2 kg K/ha/rok) vypočtena při průměrné dávce K 106 kg/ha/rok v aplikovaném hnoji, a to vlivem opakovaných vyšších odběrů draslíku kukuřicí.

Průměrná bilance draslíku na variantě NPK se v pokusu s rotací plodin pohybovala v rozmezí od -9,5 do +33,2 kg/ha/rok při dávce 100 kg K/ha/rok. Kladná bilance byla na stanovišti s průměrným nízkým výnosem hlíz brambor (> 6,4 t/ha/rok). Na variantě NPK v pokusu s monokulturou kukuřice byla při dávce draslíku 150 kg/ha/rok průměrná bilance +32,1kg K/ha/rok.

Záporná průměrná bilance draslíku na variantách s aplikací kalu se na obou typech pokusů pohybovala v rozmezí od -8,9 do -69,1 kg/ha/rok, přičemž průměrné množství aplikovaného draslíku bylo 18 kg/ha/rok při dávce 110 kg N/ha/rok ve formě kalů. Bilance draslíku na variantách N a N+sláma se pohybovala v rozmezí od -54,9 do -103,6 kg/ha/rok, přičemž na variantě N+sláma byla na jednotlivých stanovištích nižší záporná bilance ve srovnání s variantou N, a to vlivem aplikovaného draslíku ve slámě.

System hnojení ovlivnil podle předpokladů i výnos plodin. V pokusu s rotací plodin byl výnos zrna a slámy ječmene jarního a pšenice ozimé ve srovnání s variantou hnůj a kal 1 na variantách s aplikací minerálních hnojiv vyšší. Na variantě kal 3 byl výnos hlavních sklizňových produktů ve srovnání s variantami kal 1 a hnůj vyšší, avšak přírůstek výnosu neodpovídal množství dodaných živin. V pokusu s monokulturním pěstováním kukuřice na variantách s minerálním hnojením byl výnos ve srovnání s variantami s aplikací čistírenského kalu vyšší. Na stanovišti Suchdol byl celkový výnos sklizňových produktů nejnižší, stejně jako celkový odběr fosforu a draslíku.

Obsah přístupného fosforu na variantách s aplikací čistírenského kalu a hnoje vzrostl. Aplikace hnoje přispěla k udržení nebo zvýšení obsahu přístupného draslíku na většině stanovišť. Obsah přístupného draslíku na variantě NPK v pokusu s rotací plodin se při dávce 100 kg K/ha/rok nezvýšil na stanovištích s vyšším výnosem hlíz brambor, v pokusu s monokulturou kukuřice při dávce 150 kg K/ha/rok vzrostl. Změny obsahu přístupného fosforu a draslíku v půdě většinou korespondovaly s bilancemi.

Výsledky obsahu přístupného fosforu a draslíku byly i v polních pokusech ovlivněny půdní variabilitou. Byl zjištěn výskyt antropogenní, prostorové a horizontální meso až makro variability v obsahu přístupného fosforu a draslíku. Nejvyšší míru půdní variability vykazoval obsah přístupného fosforu v půdě. Vliv stanoviště nebyl prokázán, ale nižší míru variability vykazovaly varianty kontrola, NPK a N+sláma. V pokusu s monokulturou kukuřice byla míra variability obsahu přístupného P ve srovnání s pokusem s rotací plodin průměrně nižší. Výsledky obsahu přístupného fosforu z variant s aplikací kalu mohou být zatíženy chybou vzorkování. Půdní variabilita přístupného draslíku nebyla v polních pokusech vysoká a nebyla ovlivněna stanovišti. Nejvyšší míru variability v obsahu přístupného draslíku vykazovala varianta hnůj v pokusu s rotací plodin. Velmi nízkou půdní variabilitu na všech stanovištích na obou typech pokusu vykazovala půdní reakce. Nejnižší míra variability půdní reakce vlivem vysoké pufrční schopnosti půdy byla na stanovišti Suchdol.

Použitá literatura

- Anderson, K. A., Downing, J. A. 2006. Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen, phosphorus and silicon in an agricultural region. *Water Air and Soil Pollution*. 176 (1-4). 351–374.
- Andrist-Rangel, Y., Edwards, A. C., Hillier, S., Oborn, I. 2007. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 122 (4). 413-426.
- Annaheim, K. E., Doolette A. L., Smernik, R. J., Mayer, J., Oberson, A., Frossard, E., Bünemann, E. K. 2015. Long-term addition of organic fertilizers has little effect on soil organic phosphorus as characterized by ³¹P NMR spectroscopy and enzyme additions. *Geoderma*. 257. 67-77.
- Anonymous, 2006. Praha ŽP 2006 - Stav a vývoj složek životního prostředí. [cit. 2014-06-17]. Dostupné z: <http://envis.prahamesto.cz/%28tezra22d2eanxg45eup3ssmw%29/rocnky/Pr06_pdf/kap_B1.pdf>
- Anonymous, 2009. Ministerstvo životního prostředí. Poškození půd erozí. [cit. 2014-08-23]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poskozeni_pudy_erozi/\\$FILE/OOH_PP-Poskozeni_pudy_erozi-081119.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poskozeni_pudy_erozi/$FILE/OOH_PP-Poskozeni_pudy_erozi-081119.pdf)
- Auerswald, K., Kainz, M., Angermuller, S., Steindl, H. 1996. Influence of exchangeable potassium on soil erodibility. *Soil Use and Management*. 12 (3). 117–121.
- Baier J., 1997. Vztah mezi výnosem a odběrem fosforu a draslíku u jarní pšenice. *Rostlinná Výroba*. 43 (10). 501-506.
- Balík, J., Petrášek, K., Tlustoš, P., Száková, J., 1999. Kaly z čistíren odpadních vod. Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze. Praha. s. 47-53. ISBN: 80-213-0560-6.
- Bationo, A., Lompo, F., Koala, S. 1998. Research on nutrient flows and balances in west Africa: state of the art. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 71 (1-3). 19-35.
- Bengtsson, H., Öborn, I., Jonsson, S., Nilsson, I., Andersson, A. 2003. Field balances of some mineral nutrients and trace elements in organic and conventional dairy farming - a case study at Öjebyn, Sweden. *European Journal of Agronomy*. 20 (1-2). 101-116.
- Bermudez, D., Juarez, M., Sanchezandreu, J., Jorda, J. D. 1993. Role of EDDHA and humic acids on the solubility of soil-phosphorus. *Communications In Soil Science And Plant Analysis*. 24 (7-8). 673-683.
- Bindraban, P. S., Stoorvogel, J. J., Jansen, D. M., Vlaming, J., Groot, J. J. R. 2000. Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 81 (2). 103 - 112.

- Blake, L., Johnston, A. E., Poulton, P. R., Goulding, K. W. T. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil*. 254 (2). 245-261.
- Blake, L., Mercik, S., Koerschens, M., Moskal, S., Poulton, P. R., Goulding, K. W. T., Weigel, A., Powlson, D. S. 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 56 (3). 263-275.
- Blake, L., Mercik, S., M. Koerschens, M., Goulding, K. W. T., Stempen, S., Weigel, A., Poulton, P. R., Powlson, D. S. 1999. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. *Plant and Soil*. 216 (1-2). 1-14.
- Brodský, L. 2003. Využití geostatistických metod pro mapování prostorové variability a agrochemických vlastností půd. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. s. 120. ISBN: 80-213-1100-2.
- Bünemann, E. K., Condron, L. M. 2007. Phosphorus and sulphur cycling in terrestrial ecosystems. In: Marscher, P., Rengel, Z. (eds.) *Soil biology – Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Springer. Meppel, Nizozemsko. p. 397. ISBN: 978-3-540-68026-0.
- Cao, N., Chen, X., Cu, Z., Zhang, F. 2012. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 94 (2-3). 161-170.
- Cohran, 1953. In: Wollenhaupt, N. C., Mulla, D. J., Gotway, C. A. 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. In: *The Site-Specific Management for Agricultural Systems ASA-CSSA-SSA*, 677. Madison, WI 53711. p. 19-53.
- Csathó, P., Sisák, I., Radimsky, L., Lushaj, S., Spiegel, H., Nikolova, M. T., Nikolov, N., Čermák, P., Klir, J., Astover, A., Karklins, A., Lazauskas, S., Kopyński, J., Hera, C., Dumitru, E., Manojlovic, M., Bogdanović, D., Torma, S., Leskošek, M., Khristenko, A. 2007. Agriculture as a source of phosphorus causing eutrophication in Central and Eastern Europe. *British Society of Soil Science*. 23 (Issue Suppl. 1). 36-56.
- Černý, J., Balík, J., Švehla, P., Kulhánek, M. 2009. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. *Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze*. Praha. s. 36-41. ISBN: 978-80-213-2006-2.
- Domburg, P., Edwards, A. C., Sinclair, A. H., Chalmers, N. A. 2000. Assessing nitrogen and phosphorus efficiency at farm and catchment scale using nutrient budgets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80 (13). 1946-1952.
- Eghball, B. 2002. Soil properties as influenced by phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications. *Agronomy Journal*. 94 (1). 128-135.

- Ellmer F., Baumecker M. 2005. Der statische Nährstoffmangelversuch Thyrow. Ergebnisse nach 65 Versuchsjahren. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 51 (2). 151-161.
- Fagerberg, B. Salomon, E., Jonsson, S. 1996. Comparisons between conventional and ecological farming systems at Oejebyn. Nutrient flows and balances. *Swedish Journal of Agricultural Research*. 26 (4). 169-180.
- Gandois, L., Perrin, A. S., Probst, A. 2011. Impact of nitrogenous fertiliser-induced proton release on cultivated soils with contrasting carbonate contents: A column experiment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 75 (5). 1185-1198.
- Geypens, M., Vanongeval, L., Vogels, N., Meykens, J. 1999. Spatial variability of agricultural soil fertility parameters in a Gleyic podzol of Belgium. *Precision Agriculture*. 1. 319-326.
- Gondek, K., Kopec, M. 2008. Potassium content in maize and soil fertilized with organic materials. *Journal of Elementology*. 13 (4). 501-512.
- Gotway, C. A., Bullock, D. G., Pierce, F. J., Stroup W. W., Hergert, G. W., Eskridge, K. M. 1995. Experimental design issue and statistical evaluation techniques for site-specific management. In: Pierce, F. J., Sadler, E. J. (eds.). *The state of site-specific management of agriculture*. ASA, CSSA, SSSA. 14. 301-335.
- Hoening, M., deKersabiec, A. M. 1996. Sample preparation steps for analysis by atomic spectroscopy methods: Present status. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*. 51 (11). 1297-1307.
- James D. W., Wells K. L. 1990. Soil Sample Collection and Handling. Technique Based on Source and Degree of Field Variability. In: Westerman, R. L. (ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. 3rd edition. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, USA. p. 25-44. ISBN-13: 9780891188445.
- Keller, A., von Steiger, B., van der Zee, S., Schulin, R. 2001. A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems. *Journal of Environmental Quality*. 30 (6). 1976–1989.
- Kemphorne O., Allmaras R. R. 1986. Errors and variability of observation. In: Klute, A. (ed.) *Methods of soil Analysis: part 1 – Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, USA. p. 1-31. ISBN: 0-89118-088-5.
- Khai, N. M., Ha, P. Q., Öborn, I. 2007. Nutrient flows in small-scale peri-urban vegetable farming systems in Southeast Asia—A case study in Hanoi. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 122 (2). 192–202.
- Kondratowicz-Maciejewska, K., Kobierski, M. 2011. Content of available magnesium, phosphorus and potassium forms in soil exposed to varied crop rotation and fertilisation. *Journal of Elementology*. 16 (4). 543-553.

- Kulhánek, M., Černý, J., Vaněk, V., Balík, J., Budňáková, M. 2015. Přísun živin v minerálních hnojivech a jejich bilance. Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze. Praha s. 61-67. ISBN: 978-80-213-2594-4.
- Kunzová, E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby. s. 1-24. ISBN: 978-80-7427-015-4.
- Kunzová, E. 2010. Výživa rostlin a hnojení draslíkem. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby. s. 1-24. ISBN: 978-80-7427-066-6.
- Laird, D., Fleminga, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*. 158 (3-4). 436-442.
- Lauringson, E., Talgre, L., Roostalu, H., Vipper, H. 2004. The effect of tillage and crop rotation on the content of available nitrogen, phosphorus and potassium. *Agronomy Research*. 2 (1). 63-70.
- MacDonald, G. K, Bennett, E. M., Potterc, P. A., Ramankutty, N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 108 (7). 3086–3091.
- Mader, P., Szakova, J., Miholova, D. 1998. Classical dry ashing of biological and agricultural materials. Part II. Losses of analytes due to their retention in an insoluble residue. *Analisis*. 26 (3). 121-129.
- Mantovi, P., Baldoni, G., Toderi, G. 2005. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. 39 (2-3). 289-296.
- Mehlich, A. Mehlich-3 soil test extractant - a modification of mehlich-2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 15 (12). 1409-1416
- Mengel, K., Kirkby, E. A. 2001. *Principales of plant nutrition*. 5th Edition. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherland. p. 833. ISBN: 1-4020-00008-1.
- Mengel, K., Rahmatullah, Dou, H. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils. *Soil Science*. 163 (10). 805-813.
- Mikulášová, B., Lapčík, J. R. L., Mašek, I. 1996. Lignit – struktura, vlastnosti a použití. *Chemické Listy*. 91. 160-168.
- Neshev, N. Manolov, I. 2015. Content and uptake of nutrients with plant biomass of potatoes depending on potassium fertilization. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 6. 63-65.
- Oborn, I., Andrist-Rangel, Y., Askegaard, M., Grant, C. A., Watson, C. A. Edwards, A. C. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management*. 21 (1). 102-112.

- Panten, K., Rogasik, J., Godlinski, F., Funder, U., Greef, J. M., Schnug, E. 2009. Gross soil surface nutrient balances: The OECD approach implemented under German conditions. *Agriculture and Forestry Research*. 59 (1). 19-28.
- Petersen, R. G., Calvin, L. D. 1986. Sampling. In: Klute, A. (ed.) *Methods of soil Analysis: part 1 – Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, USA. p. 31-51. ISBN: 0-89118-088-5.
- Rankien, K., Salo, T., Granlund, K., Hanu, R. 2007. Simulated nitrogen leaching, nitrogen mass field balances and their correlation on four farms in south-western Finland during the period 2000- 2005. *Agricultural and Food Science*. 16 (4). 387-406.
- Roy, R. N., Misra, R. V., Lesschen, J. P., Smaling, E. M. 2003. Assessment of soil nutrient balance. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Itali. p. 87. ISBN: 92-5-105038-4.
- Schroder, J. J., Vermeulen, G. D., van der Schoot, J. R., van Dijk, W., Huijsmans, J. F. M., Meuffels, G. J. H. M., van der Schans, D. A. 2015. Maize yields benefit from injected manure positioned in bands. *European Journal of Agronomy*. 64. 29-36.
- Schroder, J. L., Zhang, H. L., Richards, J. R., Payton, M. E. 2009. Interlaboratory validation of the Mehlich 3 method as a universal extractant for plant nutrients. *Journal of AOAC International*. 92 (4). 995-1008.
- Sims, J. R., Haby, V. A. 1971. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Science*. 112 (2). 137-141.
- Sims, J. T., Simard, R. R., Joern, B. C. 1998. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *Journal of Environmental Quality*. 27 (2). 277-293.
- Sommers, L. E. 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. *Journal of Environmental Quality*. 6 (2). 225-232.
- Spiess, E. 2011. Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 91 (3). 351-365.
- Stoorvogel, J. J., Smaling, E. M. A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983–2000. 4 Volumes. Report 28. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, Netherlands. ISSN: 0924-3062.
- Tan, K. H. 2005. *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. p. 680. ISBN: 9780849334993.
- Tisdale, S. J., Nelson, W. L., Beaton, J. D., Havlin, J. L. 1993. *Soil fertility and fertilisers*. MacMillan, New York. p. 634.

Troeh, R. F., Thompson L. M. 2005. *Soils and Soil Fertility*. (6th Edition). Blackwell Publishing. Ames, USA, 2005. p. 489. ISBN: 0-8138-0995-X.

Tůma, J. 2002. Vliv hnojení minerálními hnojivy na výnosy plodin a odběr živin v Kostelci nad Orlicí. *Práce a Studie*. 10. 27-33.

Valla, M., Kozák, J., Němeček, J., Matula, S., Borůvka, L., Drábek O. 2002. *Pedologické praktikum*. Česká zemědělská univerzita v Praze, katedra pedologie a geologie. s. 147. ISBN: 80-213-0914-8.

Vaněk, V., Balík J., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2007. *Výživa polních a zahradních plodin*, Profi Press. Praha. s. 176. ISBN: 976-80-86726-25-0.

Vašák, F., Černý, J., Buráňová, Š., Kulhánek, M., Balík, J. 2015. Soil pH Changes in Long-Term Field Experiments with Different Fertilizing Systems. *Soil and Water Research*. 10 (1). 19-23.

Vos, J., van der Putten, P. E. L. 2000. Nutrient cycling in a cropping system with potato, spring wheat, sugar beet, oats and nitrogen catch crops. I. Input and offtake of nitrogen, phosphorus and potassium. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 56 (2). 87–97.

Vrkoč, F., Vach, M., Veleta, V., Kosner, J. 2002. Influence of different organic mineral fertilization on the yield structure and on changes of soil properties. *Rostlinná Výroba*. 48 (5). 212-216.

Yu, W. T., Zhou. H., Zhu, X. J., Xu, Y. G., Ma, Q. 2011. Field balances and recycling rates of micronutrients with various fertilization treatments in Northeast China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 90 (1). 75-86.

Zbiral, J., Honsa I. 2010. *Analýzy půd I. ÚKZÚZ, Národní referenční laboratoř*. Brno. s 290. ISBN: 978-80-7401-031-6.

Zhang, H. L., Kariuki, S., Schroder, J. L., Payton, M. E., Focht, Ch. 2009. Interlaboratory validation of the Mehlich 3 method for extraction of plant-available phosphorus. *Journal of AOAC International*. 92 (1). 91-102.

Seznam publikací k řešení problematice

Vědecké publikace s IF

Vašák, F., Černý, J., Buráňová, Š., Kulhánek, M., Balík, J. 2015. Soil pH Changes in Long-Term Field Experiments with Different Fertilizing Systems. *Soil and Water Research*. 10 (1). 19-23.

Shejbalová, Š., Černý, J., **Vašák, F.**, Kulhánek, M., Balík, J. 2014. Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment. *Plant Soil and Environment*. 60 (7). 291-296.

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

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., **Vašák, F.**, Peklová, L., Sedlář, O. 2012. The effect of mineral N fertiliser and sewage sludge on yield and nitrogen efficiency of silage maize. *Plant Soil and Environment*. 58 (2). 76-83.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., **Vašák, F.**, Shejbalová, Š. 2014. Influence of long-term fertilizer application on changes of the content of Mehlich-3 estimated soil macronutrients. *Plant Soil and Environment*. 60 (4). 151-157.

Recenzované publikace

Vašák, F., Černý, J., Shejbalová, Š., Kulhánek, M., Balík, J. 2014. Porovnání půdní reakce v dlouhodobých pokusech. *Úroda* (10). 44-47.

Příspěvky v nerecenzovaných časopisech a na konferencích

Vašák, F., Černý, J., Kulhánek, M., Shejbalová, Š., Zámečnicková, H., Balík, J. 2014. Vliv dlouhodobého hnojení na kationtovou výměnnou kapacitu půd. *Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze*. Praha. s. 112-115. ISBN: 978-80-213-2511-1.

Vašák, F., Černý, J., Shejbalová, Š., Kulhánek, M., Balík, J. 2013. Soil reaction changes in long-term field experiments with different fertilizing system. *Sborník: Long-term Field Experiments and Their Contribution to Environmentally Balanced Agriculture*. Praha, VÚRV. Praha. s. 50-50. ISBN: 978-80-7427-144-1.

Vašák, F., Černý, J., Shejbalová, Š., Kulhánek, M., Balík, J. 2013. Změny půdního pH v dlouhodobých polních pokusech s rotací plodin. *Sborník konference Časové změny půdních vlastností a jejich predikce*. Mendelova univerzita v Brně. s. 28-28. ISBN: 987-80-7375-796-0.

Vašák, F., Černý, J., Kulhánek, M., Shejbalová, Š., Balík, J. 2013. Srovnání analytických měření obsahu přístupných živin z extraktu Mehlich 3. Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze. Praha. s. 157–160. ISBN: 978-80-213-2416-9.

Vašák F., Černý J., Kulhánek M., Shejbalová Š., Balík J. 2012. Porovnání půdního pH na variantách s různou dávkou dusíku na dlouhodobých polních pokusech. Sborník konference Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze, Praha. s. 182-185. ISBN: 978-80-213-2331-5.

Vašák, F., Černý, J., Kulhánek, M., Balík, J. 2011. Porovnání množství a kvality organické hmoty v půdě dlouhodobých polních pokusů s různým způsobem hnojení. Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze. Praha. s. 145-150. ISBN: 978-80-213-2224-0.

Vašák F., Černý J., Kulhánek M., Balík J. 2011. Phosphorus balance in long-term field experiments. Sborník konference Soil, Plant and Food Interactions, Brno

Černý J., Balík J., Kulhánek M., **Vašák F.** 2010. Bilance živin v dlouhodobých hnojařských pokusech. Sborník konference Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze. Praha. s. 26-31. ISBN: 978-80-213-2118-2.

Černý J., Balík J., Kulhánek M., **Vašák F.** 2011. Effect of fertilization on yield and nutrient accumulation of wheat and barely. Proceedings of International Conference Soil, Plant and Food Interactions. Brno

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., **Vašák, F.**, Vaněk, V. 2014. Využití kalů z čistíren odpadních vod. Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze. Praha. s. 19-26. ISBN: 978-80-213-2511-1.

Černý, J., Kulhánek, M., Shejbalová, Š., **Vašák, F.** 2013. Základní hnojení ozimých obilnin. Úroda 61 (7). 48-52.

Černý, J., Kulhánek, M., **Vašák, F.**, Shejbalová, Š., Kovářík, J. 2014. Základní hnojení fosforem a draslíkem. Zemědělec 22 (28). 19-20.

Kulhánek M., Černý J., **Vašák F.** 2012. Metody pro stanovení různých forem fosforu v půdě. Konference enviromentální archeologie. ČZU v Praze, Praha. s. 44-45.

Kulhánek M., Černý J., **Vašák F.**, Balík, J. 2013. Changes of mobile P, K, Ca and Mg contents in long-term field experiments. Sborník: Long-term Field Experiments and Their Contribution to Environmentally Balanced Agriculture. Praha, VÚRV. Praha. s. 18-18. ISBN: 978-80-7427-144-1.

Kulhánek, M., Černý, J., Madaras, M., **Vašák, F.**, Balík, J. 2014. Draslík - podceňovaný prvek ve výživě rostlin. Úroda. 62 (3). 64-66.

Kulhánek, M., Černý, J., **Vašák, F.**, Shejbalová, Š. Kovářík, J. 2014. Jak dlouhodobě udržet půdní úrodnost. Zemědělec 22 (37). 18-19.