

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vyhodnocení obsahu přístupných forem fosforu u pšenice  
ozimé v závislosti na různých systémech hnojení**

**Diplomová práce**

**Autor práce: Bc. Miroslava Brodská**

**Obor studia: Pěstování rostlin, výživa a ochrana rostlin**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci " Vyhodnocení obsahu přístupných forem fosforu u pšenice ozimé v závislosti na různých systémech hnojení " 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 19.04.2024

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu mé práce doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost, čas, pozitivní energii a zkušenosti, které mi předával po celou dobu spolupráce. Také bych chtěla poděkovat za velkou podporu během celého studia své rodině, která při mně vždy stála. Některé momenty nebyli vůbec lehké. V neposlední řadě patří moje velké poděkování všem v mém okolí, kteří mi ve studiu důvěřovali a podporovali mě.

# Vyhodnocení obsahu přístupných forem fosforu u pšenice ozimé v závislosti na různých systémech hnojení

## Souhrn

Cílem práce bylo porovnání vývoje zásobenosti různých frakcí fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení pšenice ozimé, a dále vyhodnocení odběrů fosforu a výnos ozimé pšenice u vybraných variant hnojení, včetně výpočtu jednoduché bilance P.

Vyhodnocení obsahu přístupných forem P stanovených vodným výluhem a metodou Mehlich 3 v půdě ( $P_{H_2O}$  a  $P_{M3}$ ) po sklizni pšenice ozimé v závislosti na různých systémech hnojení probíhalo na pokusných stanicích Humpolec, Hněvčoves a Suchdol v různých půdně-klimatických podmínkách. Monitoring probíhal od roku 1996 z archivních vzorků půdy, které byly odebrány vždy v době sklizně pšenice ozimé po ukončeném 3 honném osevním sledu (brambory-pšenice-ječmen) v letech 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017 a 2020 a příslušně analyzovány.

Z výsledků je zřejmé, že u kontrolní nehnojené varianty v dlouhodobém pokusu zpravidla klesaly obsahy  $P_{H_2O}$  a  $P_{M3}$  v půdě, především jeho odběrem rostlinami pšenice. Bylo zjištěno, že na fosforem hnojených variantách docházelo ke zvýšení obsahu přístupných forem P v půdě, přičemž nejvýznamněji se zvyšují formy P po zapravení organických hnojiv. Experiment dále ukázal, že hnojení minerálním P (NPK) většinou nepřineslo zvýšení  $P_{H_2O}$  v půdě od doby založení pokusu v porovnání s organickými hnojivy.

Nejvyšší efekt hnojení na obsah  $P_{H_2O}$  a  $P_{M3}$  se dostavil po aplikaci organických hnojiv, především čistírenského kalu, tj. jednorázový přísun 240 kg P za jednu 3honnou rotaci plodin. Nejnižší efekt hnojení na obsah P v půdě se dostavil po aplikaci celkem 90 kg P dodané minerálním NPK. Hnojením NPK bylo dodáno do půdy více P než aplikací hnojem, ale i přesto se nedosáhlo vyššího efektu.

Bylo zjištěno, že čím vyšší dávka P byla dodána do půdy v hnojivech, tím byl odběr fosforu rostlinami vyšší. Z výsledků odběru fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé je jasné, že odběr P slámou je vždy nižší než odběr zrnem na všech stanovištích a v celém sledovaném období (1999-2020). Bylo zjištěno, že ze všech použitých hnojiv dokázaly rostliny odebrat nejméně P do zrna a slámy po aplikaci chlévského hnoje. Naopak aplikace čistírenských kalů a minerálního NPK zajistila nejvyšší odběr P zrnem i slámou, což vysvětluje i nižší hodnoty přístupného P v půdě u varianty NPK.

Z dosažených výsledků je patrné, že nejvyšší výnosy zrna a slámy na sledovaných stanovištích jsou dosahovány u varianty NPK. Aplikace čistírenských kalů pozitivně zvyšovala výnos zrna pšenice, ale naopak snižovala výnos slámy. Opačný trend byl pozorován u varianty hnojené hnojem.

**Klíčová slova:** Hnojení fosforem, pšenice ozimá, fosfor v rostlině, přístupný fosfor v půdě, Mehlich 3

# Evaluation bioavailable phosphorus content at winter wheat grown under different fertilizing systems

## Summary

The aim of the work was to compare the development of various phosphorus fractions in soil depending on different fertilization systems for winter wheat, and to further evaluate phosphorus uptake and yield of winter wheat for selected fertilization variants, including the calculation of a simple phosphorus (P) balance. The evaluation of the content of bioavailable forms of P in soil determined by water extraction and the Mehlich 3 method ( $P_{H_2O}$  and  $P_{M3}$ ) after winter wheat harvest depending on different fertilization systems took place at experimental stations in Humpolec, Hněvčeves, and Suchdol under various soil-climatic conditions. Monitoring has been ongoing since 1996 from archive soil samples, which were collected in the years 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017, and 2020 and correspondingly analyzed.

The results clearly show that in the control unfertilized variant in the long-term experiment, the contents of  $P_{H_2O}$  and  $P_{M3}$  in the soil typically decreased, primarily due to the P uptake by the wheat plants. It was found that in phosphorus-fertilized variants there was an increase in the content of bioavailable forms of P in the soil, with the most significant increases after the incorporation of organic fertilizers. The experiment further showed that fertilization with mineral P (NPK) generally did not result in an increase in  $P_{H_2O}$  in the soil since the establishment of the experiment compared to organic fertilizers.

The highest effect of fertilization on the content of  $P_{H_2O}$  and  $P_{M3}$  occurred after the application of organic fertilizers, especially sewage sludge, i.e., a one-time input of 240 kg P for one three-crop rotation. The lowest effect of fertilization on the soil P content occurred after the application of a total of 90 kg P supplied by mineral NPK. Although more P was added to the soil with NPK fertilization than with manure application, a higher effect related to investigated soil P content was not achieved. It was found that the higher the dose of P supplied in the fertilizers, the higher the uptake of P by the plants. From the results of phosphorus uptake by grain and straw of winter wheat, it is clear that the uptake of P by straw is always lower than that by grain at all sites and throughout the observed period (1999-2020). It was found that of all the fertilizers used, plants took up the least P into grain and straw after the application of farmyard manure. On the other hand, the application of sewage sludge and mineral NPK ensured the highest uptake of P by both grain and straw, which also explains the lower values of accessible P in the soil for the NPK variant.

From the results obtained, it is evident that the highest yields of grain and straw at the monitored sites are achieved with the NPK variant. The application of sewage sludge positively increased the grain yield of wheat, but conversely reduced the straw yield. The opposite trend was observed in the variant fertilized with manure.

**Keywords:** Phosphorus fertilization, winter wheat, phosphorus in the plant, available phosphorus in the soil, Mehlich 3

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>LITERÁRNÍ REŠERŠE</b> .....	<b>9</b>
3.1	PŠENICE OZIMÁ .....	9
3.1.1	<i>Botanická charakteristika</i> .....	9
3.1.2	<i>Význam pěstování pšenice</i> .....	10
3.1.3	<i>Historie pěstování pšenice</i> .....	11
3.1.4	<i>Požadavky na prostředí</i> .....	11
3.1.5	<i>Agrotechnika pšenice</i> .....	12
3.2	VÝŽIVA A HNOJENÍ PŠENICE OZIMÉ .....	13
3.2.1	<i>Projevy nedostatku živin u pšenice</i> .....	15
3.2.2	<i>Hnojení pšenice v závislosti na době aplikace hnojiva</i> .....	16
3.3	ÚLOHA FOSFORU VE VÝŽIVĚ ROSTLIN .....	18
3.3.1	<i>Fosfor jako prvek a historie jeho zkoumání</i> .....	18
3.3.2	<i>Fosfor v půdě</i> .....	18
3.3.3	<i>Fosfor v rostlinách</i> .....	20
3.3.4	<i>Nedostatek fosforu</i> .....	22
3.3.5	<i>Nadbytek fosforu</i> .....	23
3.3.6	<i>Hnojení rostlin fosforem</i> .....	23
3.3.7	<i>Hnojení pšenice fosforem</i> .....	24
3.3.8	<i>Postup stanovení dávek fosforečných hnojiv</i> .....	24
3.3.9	<i>Používání minerálních a statkových hnojiv</i> .....	25
3.3.10	<i>Organická hnojiva</i> .....	25
3.3.11	<i>Minerální fosforečná hnojiva</i> .....	29
3.4	PRINCIPY STANOVENÍ PŘIJATELNÉHO OBSAHU FOSFORU V PŮDĚ .....	32
3.4.1	<i>Mehlich 3</i> .....	32
3.4.2	<i>Vodný výluh</i> .....	33
<b>4</b>	<b>METODIKA</b> .....	<b>34</b>
4.1	ANALYTICKÁ STANOVENÍ .....	36
4.1.1	<i>Extrakce fosforu demineralizovanou vodou</i> .....	36
4.1.2	<i>Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3</i> .....	36
4.1.3	<i>Hodnocení výnosů ozimé pšenice</i> .....	36
4.1.4	<i>Obsah fosforu v zrně a slámě pšenice a jeho odběr</i> .....	36
4.2	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ .....	36
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b> .....	<b>37</b>
5.1	VÝSLEDKY ROZBORŮ PŮD .....	37
5.1.1	<i>Obsah okamžitě přístupného fosforu v půdě</i> .....	37
5.1.2	<i>Obsah potencionálně přístupného fosforu v půdě</i> .....	40
5.2	VÝNOSY ZRNA A SLÁMY .....	42
5.3	ODBĚR FOSFORU ZRNEM A SLÁMOU .....	46
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b> .....	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>57</b>

# 1 Úvod

Pšenice setá (*Triticum aestivum*) je v České republice jednou z nejvýznamnějších pěstovaných plodin. Její zastoupení na trhu nabídky všech obilnin činí až 55,6 %, přičemž většina produkce přijde ke zkrmení. Ve světě zaujímá až 30 % z celkových osevních ploch.

Výnos pšenice ozimé je průměrně v rozsahu 3,5 až 6,0 t/ha. Vše závisí na několika faktorech, především na volbě odrůdy a hnojení, tedy výživě. Při správné volbě odrůdy se výnosy mohou pohybovat až mezi 6,0 a 10,0 t/ha. Pro dosažení očekávaných výnosů a kvality pšenice je nezbytné, aby pěstitel vytvořil v půdě optimální podmínky, které zajistí rostlině dobrou zásobu přístupných živin v půdě, čímž může rostlina maximální míře využít genetický potenciál pěstované odrůdy. Pro dosažení optimálních podmínek pro růst a vývoj pšenice ozimé je také nezbytná její výživa, především přes půdu. Pšenice patří mezi plodiny náročné na živiny a jednou z klíčových živin je fosfor.

Fosfor (P) je jednou ze základních živin, zcela nezbytných pro růst a vývoj rostlin, stejně tak je důležitý i pro výživu zvířat. P v rostlině plní úlohu energetického metabolismu, významně ovlivňuje fotosyntézu, dělení buněk, syntézu lipidů a bílkovin. Koncentrace přístupného P v půdě má vysoce pozitivní korelaci s výnosem zrna a schopností porostů přezimovat. Vyšší obsahy P v půdě pozitivně ovlivňují HTZ a sklovitost, neovlivňují však vždy obsah lepku. Zde závisí zejména na odrůdových vlastnostech. V průběhu vegetace se P významně podílí na intenzitě a rozsahu asimilace dusíku. Je rozhodujícím prvkem pro tvorbu generativních orgánů, protože při klíčení a vzházení se rychle spotřebovává ze zásobních látek obsažených v semeni (fytin). Jeho nedostatek, již v počátku vývoje může mít významný dopad na další vývoj porostu. Rozhoduje tak o kvantitě, ale i kvalitě výnosu.

Množství fosforu v půdách je v podmínkách České republiky nízké a převážná část je pro rostliny nedostupná. Celosvětové zásoby P se zmenšují, a naopak se zvyšují náklady na energie a plyn pro výrobu fosforečných minerálních hnojiv a jejich dopravu. Díky těmto faktorům a vyšší poptávce se zvyšuje cena fosforečných hnojiv a tím se snižuje jejich dostupnost. Tato situace tedy vede k hledání efektivních možností hnojení fosforem a omezování jeho ztrát, především do povrchových i podzemních vod. Z těchto důvodů je důležité hledat zdroje fosforu především v odpadních materiálech. Výhodou těchto materiálů je jejich dostupnost, nevýhodou možné zatížení půdy rizikovými prvky a škodlivými látkami.

Stanovení koncentrace přístupného P v půdě lze provést několika způsoby. Nejpoužívanější je využití extrakčního činidla Mehlich 3, kterým lze stanovit obsah přijatelného P, a také dalších makro a mikroelementů v půdě. Metoda Mehlich 3 se běžně používá v rámci agrochemického zkoušení půd (AZP).

Vyhodnocení obsahu přijatelných forem fosforu v půdě je řešeno během pěstování pšenice ozimé v závislosti na různých systémech hnojení a ročníku.

## 2 Hypotézy a cíle práce

### Vědecké Hypotézy

- 1) Předpokládalo se, že na kontrolní nehnojené variantě bude v dlouhodobém pokusu zejména vlivem odběrů rostlinami klesat obsah fosforu v půdě.
- 2) Na fosforem hnojených variantách byl očekáván vzestupný trend obsahu přístupného P v půdě, zejména u variant hnojených minerálním P nebo čistírenskými kalů.
- 3) Dalším předpokladem bylo, že stoupající dávka fosforu do půdy povede ke zvýšeným odběrům fosforu pšenící ozimou.
- 4) Na stanovištích s nižší zásobou P v půdě se dá očekávat, že se stoupající dávkou fosforu v hnojivech bude i vyšší efekt hnojení.

### Cíle práce

- Hlavním cílem práce bylo porovnání vývoje zásobenosti různých frakcí přístupného fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení pšenice ozimé.
- Dalším cílem bylo vyhodnocení odběrů fosforu a výnosů ozimé pšenice u vybraných variant hnojení, včetně výpočtu jednoduché bilance P.



## 3 Literární rešerše

### 3.1 Pšenice ozimá

#### 3.1.1 Botanická charakteristika

Rod pšenice (*Triticum L.*) se řadí do čeledi lipnicovité (*Poaceae*) (Sissons et al. 2012). *Poaceae* jsou byliny se specifickou stavbou, někdy s dřevnatějícím stonkem. Kořeny jsou svazčité, z tenkých adventivních kořínků, a také je velmi častá adventivní mykorhiza. Stonek se nazývá stéblem a je nevětvený, článkovaný, s rhexigenní dutinou. Výjimečně je stonek vyplněn dřevem. Stéblo je inkrustované křemičitany (Klement et al. 2012). Dále jsou stébla bohatá na celulózová vlákna, hemicelulózu, bílkoviny, lignin a popel (Khan & Mubeen 2012). Dlouhé články stébel jsou přerušovány kolénky. Charakteristické jsou také časté podzemní různé dlouhé výhony nebo odnože, které vznikají v paždí nejspodnějších listů na bázi stonku. Listy jsou přisedlé a jejich pochva stéblo objímá. Pochva přechází v úzce čárkovitou čepel se souběžnou žilnatinou, a na místě přechodu je blanitý jazýček. Tvar jazýčku a oušek patří k rozlišovacím znakům některých rodů a druhů (Klement et al. 2012).

U pšenice rozlišujeme poměrně velké množství druhů, a to kolem dvaceti. Zahrnují jak druhy planě rostoucí, tak kulturní. Na tom se shodují Sissons et al. (2012) a Špaldon (1982). (Zimolka 2005) uvádí, že zatímco v dnešní době převažuje pěstování druhu *Triticum aestivum*, dříve se více pěstovaly i jiné druhy, jako např. pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum*), pšenice dvouzrnka (*Triticum dicoccum*), pšenice naduřelá (*Triticum turgidum*) a pšenice shloučená (*Triticum compactum*). V teplejších oblastech se v České republice pěstuje i pšenice tvrdá (*Triticum durum*) (Klement et al. 2012).

Květenstvím pšenice je lichoklas (Klement et al. 2012). Klásky jsou 1-2 květy, či 5-7 květů. Většinou jsou jeden až čtyři kvítky plodné. Klas je nelámavý, různě hustý, osinatý či bezosinný. Plevy a pluchy mají vejčité nebo podlouhle vejčité a zřetelně viditelný kýl. Obilky jsou nahé, buclaté a v průřezu oblé. Klíček je mírně vystouplý, na protější straně ochmýřený (Petr & Húska 1997). Nejdůležitějším výnosovým prvkem je počet a hmotnost zrn v klasu (Prasad et al. 2007). V průběhu vegetace procházejí rostliny vývojovými změnami, což se projevuje na morfologii a anatomii. Vnější znaky hodnotí makrofenologická stupnice. Organogenezi vzrostného vrcholu zaznamenává mikrofenologická stupnice podle Kupermanové (stupeň diferenciaci klasu). Růstová fáze se zaznamenává tehdy, jestliže 50-70 % rostlin v porostu dosáhlo uvedené fáze (Faměra 1993).

Pšenice setá neboli pšenice obecná je nejvíce pěstovaným druhem u nás i ve světě (Petr & Húska 1997). Pšenici řadíme mezi „velké tři“ obilné plodiny, světově se sklízí více než 607 milionů tun pšenice, ve srovnání s 652 miliony tun rýže a 785 milionů tun kukuřice (Shewry 2009). Pšenice nemá konkurenci z hlediska flexibility, pěstuje se od 67° Skandinávie a Ruska po 45° jižní šířky v Argentině, včetně oblastí v tropech a subtropích (Feldman 1995). Pšenice má vynikající širokou plasticitu a silnou reakci na intenzifikační faktory. Vznikla nejspíše ze špaldy, či různým křížením a mutacemi (Petr & Húska 1997).

Z genetického hlediska dělíme pšenici podle počtu chromozomů na tři skupiny. První skupina je diploidní ( $2n = 14$ ). Zahrnuje pšenici planou i kulturní, takzvanou jednozrnku planou (*Triticum boeoticum*). Větší význam má skupina tetraploidních pšenic ( $2n = 28$ ). Zde řadíme

pšenice, které nazýváme dvouzrnky, pšenice Timofejová (*Triticum timopheevi*), pšenice naduřelá (*Triticum turgidum*), pšenice tvrdá (*Triticum durum*) a pšenice polská (*Triticum polonicum*). Na tomto se shodují Moudrý & Jůza (1998) a Zimolka (2005). Asi 95 % současné světové produkce pšenice je hexaploidní chlebová pšenice, zbývajících 5 % tvoří tetraploidní pšenice tvrdá, která je více přizpůsobena suchému středomořskému podnebí (Szabó & Hammer 1996).

Moudrý & Jůza (1998), Zimolka (2005) a Carver (2009) se shodují, že největší význam má skupina hexaploidní ( $2n = 42$ ), do které patří pšenice setá (*Triticum aestivum*) a také pšenice špalda (*Triticum spelta*).

### 3.1.2 Význam pěstování pšenice

Přestože statistiky poslední doby ukazují, že výživa zhruba 54 % obyvatel zeměkoule je založena především na rýži, stala se pšenice světovou královnou obilovin jak v produkovaném množství, tak svou hodnotou. Vezme-li se v potaz civilizovaný svět jako celek, tvoří pšenice hlavní potravu člověka. Je mnohem více distribuována než její komerční rivalové kukuřice a rýže. Z pšenice se stala prvořadá nutnost civilizovaného života (Dondlinger 2018).

Pšenice obecná (*Triticum aestivum* L.) je i v ČR nejrozšířenější a nejpěstovanější plodinou (Vaněk et al. 2016). Zaujímá více než čtvrtinu orné půdy v ČR a polovinu ploch ze všech obilovin. Pěstují se dvě formy, ozimá a jarní (Štolcová 2009). Výnosy pšenice ozimé jsou obvykle vyšší než pšenice jarní, protože se vysévá koncem léta až začátkem podzimu a je schopna efektivněji využít sluneční svit a potřebnou vlhkost, tedy za předpokladu, že teploty nejsou příliš nízké na to, aby rostlinu nezahubily (Cornell & Hovelings 2019). Tato plodina je nejvýznamnější a nejvhodnější pro mnoho potravinářských výrobků. Její použití je prakticky všestranné (Diviš 2010). Kvůli vysokému obsahu škrobu je pšenice považována za významný zdroj kalorií, využívá se pro výrobu krmiv. Vysoce výnosné odrůdy s nízkým obsahem bílkovin jsou v krmných směsích doplňovány dalšími plodinami bohatými na bílkoviny. Těmi jsou zejména sója a zbytky olejnatých semen (Shewry 2009). Pšenice je vedle zdroje kalorií i zdrojem nejméně 30 % příjmu Fe a Zn a 20 % spotřeby energie a bílkovin ve stravě po celém světě; proto je důležité stále zlepšovat její nutriční kvalitu (Gupta et al. 2020).

Díky kvalitě a obsahu lepku má zároveň vynikající pekařské vlastnosti. Dále je velmi dobře využitelná i v průmyslu, zejména pro výrobu škrobu, lihu a bioplynu. Pšenice má i další kladné vlastnosti, jako například plasticitu, výnosové schopnosti, variabilitu odrůd a možnosti šlechtění (Diviš 2010). Její význam je také dán značnou přizpůsobivostí různým pěstitelským podmínkám, širokou využitelností zrna, a také velkým množstvím odrůd s různými nároky (Pazdera 2006). Úspěšně se pěstuje v našich nejúrodnějších oblastech, hlavně v kukuřičné a řepařské výrobní oblasti, ale i v méně příznivých podmínkách, kde však vyžaduje nejlepší půdy a intenzivní hnojení. U nás převažuje pěstování pšenice ozimé, která poskytuje stabilní a vysoké výnosy zrna. Nejvyšší kvalita potravinářské pšenice je v teplejších oblastech (Vaněk et al. 2016). Spotřeba pšenice na obyvatele v rozvojových zemích stále roste, i když zpomalujícím se tempem. Zato v průmyslových zemích roste podíl celkového využití pšenice na krmení zvířat (Bruinsma 2003).

### 3.1.3 Historie pěstování pšenice

Je prokázáno, že pěstováním pšenice se lidé zabývají již od pravěku. S největší pravděpodobností je tak pšenice nejstarší a nejvýznamnější obilninou, kterou člověk pěstuje a využívá. I nadále pšenice zaujímá přední místo v důležitosti pro výživu převážné části lidstva na naší planetě (Petr & Húska 1997). Její domovinou je území přední Asie a také území Etiopie, odkud se rozšířila před začátkem našeho letopočtu do všech zemí Starého světa. Některé druhy byly pěstovány již několik tisíciletí před naším letopočtem (Špaldon 1963). (Feldman 1995) uvádí, že nejstarší domestikované pšenice se datují přibližně 7500 až 6500 let před naším letopočtem. Jsou spojovány s prehistorickými místy „Úrodného půlměsíce“, které tvoří horské řetězce lemující roviny Mezopotámie a syrskou poušť, a také s Anatólií a Balkánem. Dále dle Dondlinger (2018) mezi obilninami zaujímá v západní části Asie, v Evropě a v severní Africe první místo již od nepaměti. Byla to jedna z hlavních plodin Izraelitů v Kanaánu.

Špaldon (1982) úzce propojuje počátky pěstování pšenice se vznikem zemědělství, které se datuje zhruba do doby 8. - 10. tisíciletí před naším letopočtem. Archeologické nálezy z tohoto období jasně dokazují pěstování pšenice jednozrnky a dvouzrnky. V 6. tisíciletí př. n. l. se již začala pěstovat pšenice obecná (*Triticum aestivum L.*) a také pšenice špalda (*Triticum spelta L.*). Ta je ovšem známá jen z archeologických nálezů v Evropě. V celosvětovém měřítku je pšenice pěstována zhruba na 220 mil. ha. Pěstuje se převážně na severní polokouli v 5° - 58° severní šířky. V přímořských oblastech se nejčastěji pěstuje pšenice až po 64.° severní šířky. Stala se nejdůležitější plodinou mírného pásma, ve kterém jsou srážky do 600 mm a suma vegetačních teplot od 1960 až 2534 °C. Na jižní polokouli připadá pšenici jen 7 % z její celkové světové pěstitelské plochy. Pěstuje se i v Jižní Americe, Austrálii a v Jižní Africe. V České republice představuje pšenice velmi významnou plodinu, která se stala modelem ve využívání moderních agrotechnických metod na základě poznatků z vědeckých výzkumů. Dále je typickou plodinou z pohledu intenzifikace zemědělské výroby (Špaldon 1982).

Dnes jsou na prvním místě v pěstování pšenice Čína a Indie, a to převážně proto, že pšenice vyžaduje méně vody pro pěstování, než jiné srovnatelné plodiny a je hlavní složkou různých polotovarů oceňovaných v moderním, zejména městském životě (Igrejas et al. 2020). Pšenice, která je u nás pěstována, je vyšlechtěnou kulturní pluchatou hexaploidní pšenicí. Ozimé formy se pěstují převážně v konvenčním zemědělství. V ekologickém zemědělství se naopak pěstují spíše jarní formy. Důvodem je zejména předejití možným problémům zapříčiněným vyzimováním, poškozením divokými zvířaty, zaplevelením či deficitem dusíku (Konvalina 2008).

### 3.1.4 Požadavky na prostředí

Pšenice patří mezi náročnější obilniny. Je hlavní plodinou teplejších a sušších oblastí (Konvalina 2008). Nejvhodnější pro pěstování pšenice jsou střední až těžší půdy, které mají neutrální až slabě kyselou půdní reakci. Naopak nevhodné jsou půdy vysychající a lehké, kyselé a zamokřené (Pulkrábek et al. 2003).

Pšenice ozimá je náročná na předplodinu, přičemž nejvhodnější jsou luskoviny, jeteloviny, olejnin a okopaniny. Svým výnosem reaguje ze všech nejcitlivěji, tudíž ani intenzivní hnojení nemůže nahradit nevhodnou předplodinu (Taufarová et al. 2014).

Pšenice má pomalý jarní vývoj a její kořenový systém je velmi slabě rozvinutý. Díky tomu špatně konkuruje plevelům, je náročnější na výživu a agrotechnická opatření. Při porovnání všech obilovin v ekologickém zemědělství bylo zjištěno, že pšenice reaguje na příznivé podmínky prostředí vysokým výnosem. Pro tvorbu výnosových prvků má důležitou váhu průběh počasí v době intenzivního růstu neboli sloupkování, a v době tvorby klasu a zrna. Chladnější počasí s dešťovými přeháňkami v uvedených fázích podporuje vyšší úroveň tvorby prvků produktivity klasu (Konvalina 2008).

Hlavním sklizňovým produktem je zrno, jehož chemické složení se liší v závislosti na oblasti, odrůdě, průběhu počasí a agrotechnice. Při sklizni by správně mělo zrno obsahovat okolo 14 % vlhkosti (Šroller 1998).

Podle údajů ČSÚ byla v roce 2019 celková plocha pšenice 839. tis ha a celková sklizeň činila 4,87 mil. tun s průměrným hektarovým výnosem 5,80 t/ha. Výnosy při sklizni v roce 2019 jsou z celorepublikového pohledu přibližně o 0,41 t/ha vyšší oproti roku 2018, ale zaostávají o 0,66 t/ha za výnosově rekordními třemi lety 2014-2016. V tu dobu byl výnos průměrně 6,46 t/ha. Zatímco pěstitele u nových odrůd zajímá hlavně výnos a pěstitelské náklady, vyplývající z odolnosti dané odrůdy k poléhání a chorobám, pro zpracovatele a mlynáře je rozhodující vlastností pšeničného zrna jeho kvalita. Ta je charakterizována objemovou hmotností, obsahem bílkovin, sedimentačním testem a číslem poklesu, případně také obsahem lepku a jeho kvalitou. Výnos a kvalitu zrna v zásadě ovlivňuje genotyp neboli odrůda, prostředí a vzájemná interakce těchto faktorů. Mezi hlavní body prostředí patří počasí a agrotechnika (Jirsa et al. 2020).

### **3.1.5 Agrotechnika pšenice**

#### Zařazení pšenice ozimé do osevního sledu

Nejlepšími předplodinami pro pšenici jsou luskoviny, okopaniny, olejninu a jeteloviny. Jeteloviny a vojtěško-travní směsi ale mohou v suchých letech způsobit nedostatek vláhy pro následnou plodinu. V tomto případě je vhodné zařadit před pšenici jinou plodinu. Pšenice ozimá je všeobecně velmi náročná na předplodinu a vysoký výnosový potenciál je využit zpravidla po zlepšujících plodinách. Rozšiřování ploch pšenice ale mnohdy způsobí, že se jejímu pěstování po sobě nevyhneme, ovšem vzrůstá tu nebezpečí vyššího zaplevelení stejného druhového spektra plevelů a velké riziko napadení rostlin škůdci a chorobami. V takovémto případě je nutno dbát na dobrou přípravu půdy a zapravení rostlinných zbytků, zvážit pěstování zlepšující meziplodiny, a také zvýšit dávky minerálních hnojiv (Štípek et al. 2007).

Při zařazení pšenice ozimé do osevního plánu je také třeba počítat s termínem jejího setí. S pozdějším výsevem totiž klesá její výkonnost. Při opožděném termínu setí je třeba uplatnit minimalizaci půdního zpracování, popřípadě sít do nezpracované půdy. Tím minimalizujeme další časové prodloužení. Také bychom měli zvolit vhodnou a tolerantní odrůdu, která lépe snáší pozdní setí (Faměra 1993).

#### Příprava půdy k setí

Po strniskových předplodinách je základním opatřením včasná podmítka ošetřená válením či vláčením podle stavu půdy a podmínek počasí. Pšenice vyžaduje dobře a přirozeně

slehlé seťové lůžko. Orba by měla proběhnout ideálně 4-6 týdnů před setím v hloubce 16-24 cm. Struktura půdy nemá být předseťovou přípravou příliš narušená. Odstup jeden až dva týdny mezi zásahy pomáhá k redukci semenných plevelů (Konvalina 2008).

### Setí

Při zakládání porostu je nejdůležitější vlastní setí, jehož podcenění či nekvalitní provedení se těžko napравuje. Následně se promítá do sklizně i do kvality sklizené produkce. Je tedy třeba k setí přistupovat zodpovědně z hlediska splnění požadavků vyplývajících z biologické podstaty výnosotvorného procesu (Zimolka 2005).

U hustě setých obilnin jsou nejvhodnější užší řádky, nejlépe okolo 125 mm a méně. Zmenšením meziřádkové vzdálenosti se totiž zvyšuje vzdálenost obilek od sebe a vytvoří se příznivější podmínky pro jednotlivé rostliny. Pro setí do nezpracované nebo minimálně zpracované půdy (podle stavu půdy) je vhodné použít kotoučové nebo diskové secí botky (nutno dodržet hloubku setí). Hloubka setí se pohybuje kolem 40 mm a její dodržení je zásadní. Mělké i hluboké setí nepříznivě ovlivňuje vývin porostu, a také má vliv na odnožování. Ideální výsevky se pohybují v rozmezí 400–500 (může být i 600) zrn na m<sup>2</sup>. Samozřejmě záleží také na odrůdě a stanovišti. Na méně úrodných půdách, po zhoršující předplodině, při suchých podmínkách či opožděném setí se výsevek zvyšuje o 10-15 % (Faměra 1993).

Termín setí pšenice začíná od poloviny září ve vyšších polohách. Hlavní období setí je koncem září až začátkem října. Konečná lhůta setí je pro kukuřičnou oblast 15.10., pro řepařskou 10.10. a pro bramborářskou do 5.10. (Šroller 1998).

### Agrobiologická kontrola porostů

Pro regulaci plevelů a omezení výskytu chorob a škůdců můžeme mnoho učinit či změnit promyšleným osevním sledem plodin, způsobem základního a předseťového zpracování půdy, organizací porostu a řadou dalších opatření. Chemická ochrana má řešit situace a problémy, které nelze jinak zvládnout. V takových případech je chemická ochrana důležitým intenzifikačním faktorem a cestou k dosažení vyšší výnosové úrovně.

Zásahy fungicidy, insekticidy, regulátory a dalšími přípravky jsou založeny na informacích z neustálého sledování výskytu škodlivých činitelů a průběhu růstu s vývojem porostu. Pokud výskyt plevelů, rozsah napadení chorobami a počet škůdců přesáhne práh škodlivosti, zvolí se vhodný přípravek, jeho dávka a doba aplikace. Posuzují se též rizika polehnutí a z toho se vyvozují závěry pro aplikaci morforegulátorů. Podobně se sleduje a kontroluje výživný stav rostlin, ze kterého se stanovují dávky hnojiv. To je smyslem agrobiologické kontroly porostů a přísloví: „Kdo na pole chodí, tomu se rodí.“ (Petr & Húska 1997). Pěstování obilnin následně po sobě způsobuje rostoucí počet škodlivých činitelů, což vede k nutnosti používat větší množství pesticidů, a vzhledem k tomu rostou i náklady (Woźniak 2019).

## **3.2 Výživa a hnojení pšenice ozimé**

Ozimá pšenice na 1 tunu zrna a odpovídající množství slámy a kořenů odčerpá během vegetace z půdy v průměru 25 kg dusíku (N), 5 kg fosforu (P), 20 kg draslíku (K), 2,4 kg hořčíku (Mg), 4 kg síry (S). Vývoj pšenice začíná při procesu klíčení již v obilce, kde dochází

vlivem enzymatické činnosti k rozkladu složitých organických látek na látky jednoduché, které zárodek (embryo) využívá pro svůj růst. Tvorba kořenového systému závisí na chemickém složení obilky a posléze na složení výživného stavu půdy. Obilka pšenice sama o sobě neobsahuje dostatek energie pro svůj růst a vývoj v počátečním období, a to ani v případě, že je osivo kvalitní a bohaté na dostatek zásobních látek. Ve 200 kg osiva je obsaženo pouze cca 4-5 kg N, 0,6-0,8 kg P, 1-1,2 kg K, 0,2-0,25 kg Ca, 0,25-0,3 kg Mg a 0,3- 0,4 kg S. Na optimální růst a vývoj pšenice na počátku vegetace má tak významný dopad dobrý obsah živin v půdě. Na dobrých a strukturních půdách může dosáhnout kořenový systém pšenice již na podzim hloubky 0,7 – 1 m. Podstatná část kořenového systému se rozprostírá ve vrstvě do 0,4 m. Proto právě v této vrstvě je třeba udržet v půdě vyrovnaný a kvalitní poměr živin. Nedostatek živin se může projevit výrazným omezením metabolických procesů, jejichž výsledkem jsou špatné a slabé odnože rostliny, které při silnějších zimách často vymrzají. Je tedy důležité, aby si rostliny během podzimu dokázaly vytvořit energetické zásoby. Významnou roli sehrává také termín setí, který limituje délku podzimní vegetace. Časné výsevy přispívají při optimálním průběhu povětrnosti k vyšší tvorbě sušiny rostlin během podzimu, což přispívá i k vyšší vitalitě a schopnosti rostlin přežít mrazivé období. Platí to ale pouze tehdy, má-li rostlina k dispozici dostatek živin, což můžeme vyhodnotit na základě rozborů vzorků rostlin, které během podzimu odebereme. Všeobecně na podzim rostliny pšenice odeberou poměrně málo živin, přesto se jejich deficit může projevit, a to i v zimních měsících, pokud jsou teploty vyšší a rostliny vegetují. Tímto způsobem jsou spotřebovávány zásoby živin a energie, které si rostliny vytvořily během podzimu (Hřivna 2012). Optimální obsah živin pro pšenici v podzimním období je uveden v tabulce č.1.

**Tabulka 1: Optimální obsah živin v podzimním období v porostech pšenice (Hřivna 2012)**

Hmotnost sušiny 1 rostliny (v g)	Obsah živin sušiny (v %)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
0,20-0,40	4,60-5,20	0,40-0,60	3,60-4,00	0,45-0,60	0,13-0,15	0,32-0,37

Při sklizení pšenice jsou spolu s plodinou z půdy odebírány různé druhy potřebných prvků, zejména dusík, fosfor, draslík, uhlík, voda a další minerály (Norwood et al. 2015). Rostliny pšenice odeberou na podzim necelých 10 % dusíku z celkového jeho odběru, proto není nutné aplikovat vysoké dávky dusíkatých hnojiv již na podzim. Odběr dusíku se zvyšuje na jaře, kdy rostliny po zimě obnovují biomasu. Do začátku sloupkování rostliny přijmou kolem 40 % N a intenzita jeho příjmu roste až do konce kvetení. Do té doby odebere rostlina dalších zhruba 30 % N. Po odkvětu se nároky rostlin na výživu dusíkem snižují. Dusík se přemísťuje do zrna z ostatních částí rostliny. Na konci vegetace je v zrně nahromaděno až 75 % dusíku. Využití dusíku pro tvorbu zrna ovlivňují i další prvky podílející se na výživě rostliny. Je to především fosfor, draslík a hořčík. Je proto velmi důležité nezapomenout na základní hnojení fosforečnými a draselnými hnojivy. Rovněž bychom měli hnojit i hořčíkem a sírou, a to především tam, kde bylo zapravováno velké množství posklizňových zbytků předplodiny.

Poměr C:S má totiž vliv na rychlost rozkládání posklizňových zbytků. Rychlost rozkladu posklizňových zbytků samozřejmě také ovlivňuje dusík. Obecně se udává, že na 1 tunu slamnatých zbytků z obilniny by se mělo aplikovat 0,8-1 kg N/ha (Hřivna 2012).

Celkové dávky hnojiv by měly být vypočteny s ohledem na obsah přístupných živin v půdě. Při nízkém obsahu živin v půdě je nezbytné dávky hnojiv zvyšovat (Hřivna 2012). Množství přístupných živin v půdě je stanovováno agrochemickým zkoušením zemědělských půd u fosforu, draslíku, hořčíku a vápníku. Tyto rozborů půd zajišťuje jednou za šest let stát. Ovšem šest let je v potřebě výživy rostlin velmi dlouhá doba, proto je vhodné rozborů minimálně jednou v mezidobí opakovat na vlastní náklady. Zároveň zjistíme i půdní reakci a potřebu vápnění. Pro stanovení a korekce dávek dusíku je vhodné na jaře provést rozbor půdy na obsah minerálního dusíku ( $N_{\min}$ ). Pro aktuální zjištění výživného stavu porostu je vhodné v průběhu vegetace provést anorganický rozbor rostlin (Trávník 2010). Optimální zásoba živin v půdě pro pěstování ozimé pšenice, která byla stanovena metodou Mehlich 3 je uvedena v tabulce 2.

**Tabulka 2.: Optimální zásoba živin v půdě (mg/kg) pro pěstování ozimé pšenice stanovené metodou Melich 3 (Hřivna 2012)**

Dobrá zásoba	Půdní druh		
	Lehká	Střední	Těžká
P	81-115		
K	161-275	171-310	261-350
Ca	1801-2800	2001-3300	3001-4200
Mg	136-200	161-265	221-330

### 3.2.1 Projevy nedostatku živin u pšenice

Nejvýraznějšími projevy, jaké můžeme prostým okem v porostech vidět se projevují nedostatkem dusíku. Důsledkem deficiencie dusíku jsou slabé rostliny, nevyrovnanost porostů, snížení počtu odnoží a redukovaný počet stébel, krátký vegetační vrchol, krátký klas s malým počtem zrn v klasu. Porosty mají specifické chlorózy na listech. Snižuje se také kvalita zrna, které má zhoršené technologické parametry. Pšenice ozimá přijímá dusík od počátku růstu až do jeho ukončení, tedy prakticky do sklizně. Z tohoto důvodu je nutné neprovádět aplikaci dusíku naráz, ale podle fáze vývoje, ve které se obilnina právě nachází (Hřivna 2012).

Nedostatek fosforu nebývá u pšenic často viditelný. Na kyselějších půdách a na půdách, kde dojde k zablokování příjmu P, se však listy pšenice mohou zbarvovat modrozeleně, až do červenofialové barvy. Tato barva se může přechodně objevovat i na plochách listů. V průběhu vegetace mizí (Bittner 2024). Nedostatek fosforu má za důsledek redukci odnoží, krátká a slabě vyvinutá stébla, snížený počet zrn v klasu a energetické narušení metabolismu rostlin. Rostliny jsou také náchylnější k poškození mrazem, zvyšuje se náchylnost k poléhání, a také se zvyšuje nebezpečí napadení porostu houbovými chorobami (Hřivna 2012).

Černý et al. (2014) tvrdí, že nedostatek P u rostlin nelze řešit mimokořenovou výživou, s ohledem na pomalý vstup fosforečných aniontů do vnitřního prostředí rostlin. Rovněž vysokou potřebu pšenice (20-30 kg P/ha) nelze touto aplikací dodat. Na stanovištích

s výrazným deficitem fosforu může foliární aplikace přinést určité zlepšení stavu, ale nelze tento deficit odstranit.

Typickým příznakem u obilovin při nedostatku draslíku ve většině půd, hlavně v období sucha a při zhoršeném příjmu, může u mladých rostlin být postupné bělení až žloutnutí, následně postupné zasychání špiček listů, či nekróza (Bittner 2024). Vlivem nedostatku draslíku se snižuje škrobnatost zrna a negativně je také ovlivněna proteosyntéza. Optimální zásoba draslíku vede k lepšímu využití a zhodnocení dusíku v rostlinách a způsobuje zvýšení obsahu proteinů, zlepšení sedimentace, HTZ a obsahu lepku. Ovlivňuje pevnost buněčných stěn a zvyšuje odolnost porostů proti poléhání (Hřivna 2012).

Deficience síry se také negativně odráží na tvorbě odnoží, limituje příjem dusíku, proteosyntézu a nepříznivě ovlivňuje rovněž kvalitu zrna a jakost výrobku z něho vyrobeného. Síra v kombinaci s vyrovnanou výživou dusíkem může významně přispět k vysokému a zároveň kvalitativně dobrému výnosu zrna. Společné hnojení dusíkem a sírou je předpokladem pro ekonomické a ekologicky efektivní řešení. Zvyšuje se využití jednotlivých živin, a tím se omezuje i případná kontaminace okolního prostředí nadbytečnými živinami (Hřivna 2012). Nedostatek je viditelný na rostlinách žloutnutím listů, které začíná od nejmladších listů a při trvalejším deficitu postupně přechází na starší listy (Vaněk et al. 2016).

Deficit vápníku a hořčíku ovlivňuje negativně mrazuvzdornost rostlin, při nedostatku vápníku kořen neroste a může docházet až k odumírání vegetačního vrcholu. Deficit hořčíku snižuje výkon fotosyntézy a klesá obsah bílkovin v zrně. Hořčík se také zúčastňuje při fosforylaci redukce nitrátů a zabudování amonného dusíku do oxokyselin. Při jeho nedostatku společně s draslíkem klesá intenzita proteosyntézy a stoupá obsah aminokyselin a amidů, čímž se většinou snižuje i kvalita ozimé pšenice (Hřivna 2012). Dle Vaněk et al. (2016) má nedostatek Mg za následek snížení obsahu chlorofylu a hromadění sacharidů v nadzemních částech rostlin. Díky tomu nejsou sacharidy využívány pro tvorbu biomasy, takže nejsou transformovány do kořenů. Tím je růst kořenů značně omezen.

### **3.2.2 Hnojení pšenice v závislosti na době aplikace hnojiva.**

Významný vliv na účinnost organických látek má způsob jejich aplikace. V případě, kdy jsou organické látky přidány na povrch, kde se zachovávají jako mulč, poskytnou maximální zachování vlhkosti, sníží ztráty vody jejím odpařováním, přispějí k udržení teploty a také zabrání zhutnění nebo erozi půdy. Při zaorání organických hnojiv se velice rychle uvolňují živiny, které jsou v půdě zároveň lépe rozprostřeny. Ochrana proti erozi ale neprobíhá v takové míře, jako když se aplikují pouze na povrch půdy (Wolf et al. 2003).

#### Základní hnojení

Základní hnojení je realizováno nejpozději v období setí. S ohledem na malou potřebu rostlin na živiny v podzimním období, zvláště dusíku, který se může během zimního období vyplavit, není třeba volit vysoké dávky. V některých případech je vhodné i základní hnojení vynechat (Vaněk et al. 2016). Při základním hnojení by měla být aplikována především fosforečná, draselná a hořečnatá hnojiva. Vždy vycházíme z výživného stavu pozemku a plánovaného výnosu zrna, který by měly dodané živiny zajistit. Samozřejmě musíme kalkulovat i s obsahem živin, který vracíme ve formě posklizňových zbytků zpět do půdy. Pokud je vysoká zásoba živin v půdě, provedeme odpočtové normativy (Hřivna



2012). (Chesworth 2008) uvádí, že se obecně dává přednost hnojení z jara a podzimní hnojení se omezuje na minimum nezbytné k tomu, aby ozimé plodiny měly dostatečnou startovní dávku živin.

### Regenerační hnojení

Toto hnojení se provádí co nejdříve v jarním období. Hnojíme tedy jakmile to půdní a povětrnostní podmínky dovolí a rostliny začínají vegetovat. Vhodné je využít nočních mrazíků, kdy je půda lehce přimrzlá a umožní tak vstup techniky do porostů. Ovšem pozor na půdu promrzlou do větších hloubek, než je 8 cm. Na poli rovněž nesmí ležet sněhová pokrývka. V obou případech je aplikace hnojiv zakázána. Časná aplikace hnojiv může urychlit vývoj porostu, jeho regeneraci a podpořit odnožování rostlin. Regeneračním hnojením se porostům nejčastěji dodávají hnojiva s obsahem dusíku. Brzké jarní přihnojení pšenice ozimé dusíkem zvyšuje intenzitu přijímání fosforu, čímž se dosahuje stabilních přírůstků biomasy (Fecenko & Ložek 2000). Podle regionu a podmínek se také upravuje množství a rozložení jednotlivých dávek hnojení. Je prokázáno, že v sušších oblastech, a také v oblastech s vyšší nadmořskou výškou, je výhodné aplikovat převážnou celkovou část dusíku právě již v regeneračním hnojení. Je to v ohledu na vláhové a teplotní podmínky. Nejčastěji aplikovaným hnojivem v této fázi je LAV v dávce mezi 20 až 60 kg N/ha (Vaněk et al. 2016).

### Produkční hnojení

Aplikujeme nejčastěji na počátku sloupkování, kdy dochází k diferenciaci vegetačního vrcholu. V tomto období se zakládá počet zrn v klasu. Později fytomasa narůstá a začíná tak zvýšený příjem dusíku. Je tedy třeba zajistit tvorbu založených stébel. Optimální počet stébel a dostatečný počet zrn v klasu je základním předpokladem dobrého výnosu. Při produkčním hnojení aplikujeme často větší část dusíku. Je to hlavně v oblastech, kde bylo regenerační hnojení provedeno v menší míře. Vhodnými hnojivy do této fáze jsou DAM 390 a LAV. Dávka hnojiv je nejčastěji v rozmezí 20 až 60 kg N/ha (Vaněk et al. 2016).

### Kvalitativní hnojení

Jedná se o pozdní přihnojení v období před metáním nebo krátce po něm. Tímto hnojením dokážeme ovlivnit kvalitu zrna a hmotnost 1000 semen. Aplikujeme dávku rovnoměrně 20 až 30 kg N/ha. Nejlépe v LV nebo LAV (Vaněk et al. 2016). Je doporučeno použít pevná hnojiva, aby nemohlo dojít k popálení vrcholů klasů, a také praporcového listu (Zimolka 2005). Po kvalitativním hnojení přijmou rostliny podobné množství dusíku jako po hnojení regeneračním a produkčním. Většina dusíku ale zůstane zabudována ve slámě. Při předcházející dobré výživě a dobrém výživném stavu rostliny, nemusí být efekt kvalitativního hnojení patrný. Zvláště v suchém období, kdy nejsou vhodné podmínky pro příjem živin, je efekt tohoto hnojení malý až mizivý. Regenerační a produkční hnojení u pšenice se řadí mezi nejvýznamnější hnojení (Vaněk et al. 2016).

### Spotřeba hnojiv

Vaněk et al. (2016) uvádí, že celková spotřeba živin dodaných do půdy minerálními hnojivy má dlouhodobě rostoucí tendenci. Oproti tomu spotřeba statkových hnojiv je dlouhodobě v poklesu. Je zřejmé, že negativní cenová politika v živočišné výrobě zapříčiňuje

snížení stavů hospodářských zvířat, tedy i snížení produkce statkových hnojiv. Tento následek kompenzuje živiny pro rostliny v podobě průmyslových hnojiv. Vznikají mezipodnikové a mezikrajové rozdíly od úplné nepřítomnosti živočišné výroby až po podniky s dostatečnou výrobou statkových hnojiv (Ministerstvo zemědělství 2017).

### 3.3 Úloha fosforu ve výživě rostlin

#### 3.3.1 Fosfor jako prvek a historie jeho zkoumání

Fosfor se řadí mezi nekovové prvky. Elementární fosfor je vysoce reaktivní, proto se jako prvek obvykle v přírodě nevyskytuje, ale je vázán pouze ve formě sloučenin (Housecroft & Sharpe 2012). Elementární forma fosforu byla objevena kolem roku 1669 německým alchymistou Henningem Brandtem z moči. Je pravděpodobné, že byl znám již ve starověkém Římě, jenže poté byl jeho objev zapomenut. Brandt fosfor objevil při hledání bájněho kamene mudrců, kdy destiloval 50 kbelíků moči. Kámen sice nevyrobil, ale objevil čistou formu P, která ve tmě září. Nejprve byl využíván hlavně k léčebným účelům. Po jeho objevu v kostech začal být získáván v poměrně velkém množství a využíval se k výrobě zápalek (Emsley 2000). V roce 1843 začal vyrábět superfosfátové hnojivo Sir J. B. Lawes, který se dlouhodobě zabýval výrobou fosfátového hnojiva z kostí (Huffman & Evenson 2006).

Fosfor je přímo zapojen do mnoha důležitých životních procesů, a byl proto nazván jako „klíč k životu“. Je komponentem každé živé buňky a jako část nukleoproteinu nese genetický kód živých organismů (Troeh & Thompson 2005). Je také silně zapojen do mechanismů přenosu energie, při kterém se chemická vazebná energie přeměňuje na jiné chemické vazby nebo na jiné formy energie, včetně kinetické energie ve svalovém pohybu, elektrického výboje u úhořů a bioluminiscence u světlušky (Molins 1991). Fosfor má tendenci být koncentrován v semenech a rostoucích částech rostlin. Významnou roli také zastává v energetických sloučeninách živočichů i rostlin, podílejících se na celé řadě životně důležitých reakcí (Troeh & Thompson 2005).

Je to jeden ze základních biogenních prvků, patří mezi důležitou složku protoplazmy, hlavně buněčného jádra. Z agrochemického hlediska je označován jako „faktor plodnosti“, protože urychluje zrání, podporuje nasazení květů a také napomáhá k tvorbě pevných pletiv. Využívá se především pro tvorbu nukleových kyselin a sloučenin ATP. Ze všech biogenních prvků je nejméně hojný (Šafarčíková & Kouřil 2016).

Withers et al. (2014) zase tvrdí, že soudobý přístup k hospodaření s fosforem se často zaměřuje na udržování vysokých hladin fosforu v půdě, což může být neefektivní, a také škodlivé pro životní prostředí. Místo toho navrhuje posun k cílenějšímu přístupu, kdy se fosfor aplikuje přímo na plodiny ve formě, která je snadno dostupná pro příjem rostlinami. Autoři zdůrazňují důležitost porozumění komplexním interakcím mezi půdou, rostlinami a fosforem, aby bylo možné vyvinout udržitelnější strategie hospodaření s fosforem. Zdůrazňují zároveň potřebu spolupráce mezi vědci, tvůrci politik a zemědělci, aby bylo možné tyto strategie účinně implementovat.

#### 3.3.2 Fosfor v půdě

Jackson (2005) uvádí, že v půdě existuje celé spektrum fosfátů, od fosforečnanů vápenatých po fosforečnany vázané s hliníkem, železem apod. Autor mimo jiné potvrdil,

že vápněním, pomocí změny pH půdy, dochází ke zvýšení dostupnosti fosfátů, a to tím, že se sníží aktivita železa a hliníku.

Celkové množství fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí od 0,01 do 0,15 %. Vyšší obsah P vykazují půdy s vyšším obsahem organické hmoty. Lehčí půdy s malým obsahem organické hmoty mají vždy obsah nízký. Převážná část fosforu, která je v půdě obsažena, je pro rostliny nepřijatelná (Vaněk et al. 2016). Marschner (2012) uvádí, že podle složení a typu půd se celkový obsah P pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,20 %. Množství P v půdách objektivně odpovídá jeho obsahu v zemské kůře. Základem různých forem P v půdě jsou sloučeniny kyseliny trihydrogenfosforečné a v malé míře pyrofosforečné (Vaněk et al. 2016).

Fosfor je v půdách hojný v organické i anorganické formě, často je hlavním faktorem limitujícím růst rostlin. Biologická dostupnost půdního anorganického fosforu v rhizosféře se významně liší podle druhu rostlin, nutričního stavu půdy a okolních půdních podmínek (Lichtfouse et al. 2009).

Rhizosféra je tudíž klíčová zóna interakce mezi půdou a kořeny rostlin, kde probíhá mnoho zásadních transformací fosforu, které pomáhají regulovat a zvyšovat tok volného fosfátu do rostliny (Elsen & Haygarth 2021). Fosfor je v půdě velmi málo pohyblivý a obecně je poután v blízkosti místa aplikace (Prasad & Power 1997).

### Anorganické formy fosforu

Primární formy fosforu se v přírodě běžně vyskytují nejčastěji ve svém nejvyšším oxidačním stupni jako aniont kyseliny trihydrogenfosforečné a v sloučeninách prakticky vždy tvoří orthofosforečnany nebo méně často pyrofosfáty (Mengel 1991). Dle Vaňka et al. (2007) jsou minerální formy fosforu vytvářeny převážně primárními fosforečnými minerály (apatity). Jsou to vápenaté sloučeniny sestavené ze tří molekul fosforečnanu vápenatého  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  a jedné molekuly chloridu, fluoridu nebo hydroxidu vápenatého, podle čehož je také odvozen název sloučeniny, např. -chlor apatit apod. Vyskytují se rozptýleně ve všech magmatických horninách.

Sekundární formy fosforu jsou vysrážené a adsorbované fosforečnany-vápenaté soli. Převažují v půdách slabě kyselých až alkalických a jsou to sloučeniny, které v půdách vznikají při chemických reakcích původně rozpustných sloučenin či uvolňované kyseliny fosforečné:  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{CaHPO}_4$  až  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , jež vede až ke vzniku apatitů (Vaněk et al. 2016).

Dle Mehmood et al. (2018) se primární minerál apatit vyskytuje rozptýleně ve všech magmatických horninách ve formě fluorapatitu, chlor apatitu a hydroxyl apatitu. Je nejdůležitějším přirozeným zdrojem fosforu v půdě. V bazických horninách je jeho podíl mnohdy vyšší než v horninách kyselých.

V neutrálních půdách nejčastěji vzniká stabilnější sloučenina z molekul fosforečnanu vápenatého a hydrogen fosforečnanu vápenatého, nazývaného oktakalciumfosfát. V alkalickém prostředí vzniká hlavně hydroxyl apatit. V kyselém prostředí se vlivem vyšší rozpustnosti a přítomnosti Al a Fe iontů v půdním roztoku vytváří soli těchto kationtů: variscit a strengit. Tvorba solí kyseliny fosforečné v půdě závisí na pH prostředí a má významný dopad na chování fosforu v půdě a jeho dostupnost rostlinám (Vaněk et al. 2016).

Smatanová (2021) uvádí, že rozpustnost anorganických sloučenin je určována aktivitou železitých a hlinitých iontů s aktivitou vápenatých iontů. V půdách probíhá chemická sorpce fosforu rychle, především s Al a Fe. Tento proces je doprovázen srážením rozpustných

fosforečnanů přes různé nestabilní sloučeniny, které se vysráží ve formě koloidních hydratovaných částic. Ty jsou pro rostliny ještě přijatelné (mají velký povrch), ale následně dochází k jejich dehydrataci a postupné krystalizaci. Jejich rozpustnost, a tím i přijatelnost pro rostliny se stárnutím těchto sloučenin snižuje (Vaněk et al. 2007).

Dle Ivanič et al. (1984) je zdrojů fosforu vyskytujících se v půdě mnoho. Existují čistě přírodní zdroje jako např. apatit, kdy zvětráváním minerálu apatitu dochází buď k rozkladu organických zbytků, nebo ke vzniku anorganické sloučeniny fosforu.

Významným antropogenním zdrojem anorganického P jsou odpadní vody z domácností a prádelen, do kterých se fosforečnany dostávají z pracích a čistících prostředků. Dalším zdrojem jsou polyfosforečnany, které se používají v čistících a odmašťovacích prostředcích. Do této skupiny se řadí i aplikace fosforečných hnojiv na zemědělskou půdu (Pitter 1999).

### Organické formy fosforu

Organické formy fosforu jsou nedílnou a důležitou součástí organické půdní hmoty (Vaněk et al. 2007). Podíl organického fosforu v půdě se pohybuje většinou v rozmezí 30-50 % z celkového obsahu fosforu v půdě. Množství organického fosforu je závislé na množství obsahu organické hmoty v půdním profilu. Podstatnou část organického fosforu tvoří fytyin, fosfolipidy, nukleové kyseliny, nukleoproteiny a fosforylované lipidy, které se nacházejí v kořenové hmotě. Z té se dále dostávají posklizňovými zbytky (strniště, sláma chrást, nať, opad listů) a statkovými hnojivy zpět do půdy. Velká část organicky vázaného fosforu v půdách je výsledkem biologické sorpce fosforu půdními mikroorganismy, které imobilizují fosfor do svých těl. Tento fosfor může být následnou mineralizací těl mikroorganismů po jejich odumření uvolňován a zpřístupňován rostlinám (Vaněk et al. 2016). Dle Pitter (1999) je zdrojem organického P fosfor obsažený v živočišných odpadech nebo v rozkládající se biomase zooplanktonu a fytoplanktonu, který se usazuje na dně jezer a toků. Ivanič et al. (1984) uvádí, že v České republice obsahují půdy 11,5-55 % organického fosforu. Shromažďuje se převážně ve svrchním humusovém horizontu a jeho podíl klesá s hloubkou půdního profilu. Organický fosfor je vázán v humifikované organické hmotě (Sharpley et al. 2003).

Pod trvalými travními porosty je obsah fosforu v půdě vyšší než v orných půdách (Balík et al. 2008, Macháček et al. 2004). Z dlouhodobých sledování je však zřejmé, že po zaorání porostů se výrazněji snižuje obsah dusíku a uhlíku než obsah fosforu. Toto způsobuje, že odběr dusíku rostlinami je vyšší než odběr fosforu, ztráty dusíku vyplavením jsou vyšší než ztráty fosforu, a to také ztráty dusíku denitrifikací (Balík et al. 2008).

Kolář & Kužel (2002) zase zmiňují, že z hlediska výživy rostlin má organický fosfor v půdách význam dle své hydrolyzovatelnosti neboli rychlosti, kterou je transformován na minerální formu přístupnou rostlinám.

### **3.3.3 Fosfor v rostlinách**

Společně s dusíkem a draslíkem je fosfor ve výživě rostlin nejčastěji diskutovaným prvkem. Rostlinami je přijímán ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné. Převážně ve formách  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  a  $\text{HPO}_4^{2-}$  na tom se shodují (Balík et al. 2008, Mengel 1991). V půdním roztoku je fosfor obsažen pouze v malých koncentracích. Je tedy důležité, aby se po postupném odčerpávání z roztoku dostatečně rychle doplňoval z pevné fáze půdy. Rostliny jsou schopné fosfor přijímat i při jeho velmi malých koncentracích v půdním roztoku, ovšem musí

překonávat značný koncentrační gradient. Příjem fosforu rostlinou je aktivní proces a vyžaduje tedy dostatek energie. Tato energie je získávána z makro-energetické vazby v ATP, která se uvolňuje pomocí enzymu ATPázy. Příjem fosforu je rovněž ovlivněn teplotou půdy. Při nízkých teplotách půdy, kdy rostliny nemají potřebnou energii pro příjem fosforu, se může projevit jeho nedostatek, i když je v půdě obsažen v optimální koncentraci. Rostliny si v určité míře umí příjem fosforu upravovat dle potřeby. Vlivem nedostatku fosforu v jejich pletivech aktivují v membránách kořenů fosfatázy a přenašeče s vysokou afinitou k fosforečnanům, aby se zlepšil příjem fosforu. Je tak upřednostněn růst kořenů nad nadzemní částí, aby kořeny získaly větší povrch, větší rozsah a z půdy tak dosáhly do vrstev, kde je fosfor obsažen ve větší míře. Rovněž se zvyšuje kořenová sekrece. Výměšky kořenů umožňují zvyšovat rozpustnost, a tedy tím i přijatelnost prvku (Vaněk et al. 2016). Adaptace rostliny zvyšující odběr fosforu jsou důležité zejména kvůli nízké pohyblivosti fosforu v půdě, přičemž nejvyšší koncentrace se obvykle nacházejí v orniční vrstvě. Fosfor se díky své nízké pohyblivosti dostává do spodnějších půdních profilů velmi obtížně (Vance et al. 2003). Naproti tomu v rostlině je fosfor společně s dusíkem a draslíkem vysoce mobilní a podléhá neustálé redistribuci (Forbes & Watson 1996).

I když je příjem fosforu rostlinou rovnoměrný během vegetace, rozhodující je příjem na počátku vegetace. V úplném počátku čerpají rostliny fosfor ze semene (Grant et al. 2001). Semena rostlin vykazují nejvyšší obsah fosforu. Právě do nich je fosfor ke konci vegetace nejvíce transportován. V semeni je fosfor vázán v podobě fytinu (Vaněk et al. 2016). Ve druhé fázi, je přijímán z vnějšího prostředí a příjem je ovlivňován okolním prostředím (Grant et al. 2001). Na příjem fosforu také působí pozitivně dostatečná vlhkost půdy, příznivá půdní reakce, která by se měla pohybovat v rozmezí mezi 5,5 až 7 pH. V půdě by měl být dostatek organických látek a půda by měla být dostatečně biologicky činná. Optimální množství přijatelného fosforu v půdě se pohybuje na hladině 40 až 80 mg/kg P (Vaněk et al. 2016). Hodnocení obsahu fosforu v půdě je níže uvedeno v tabulce (tabulka 3).

**Tabulka 3.: Hodnocení obsahu přístupného P v půdě podle Mehlich 3 (Hřivna 2012)**

Hodnocení	Obsah P (mg/kg)
Nízký	do 50
Vyhovující	51-80
Dobrý	80-115
Vysoký	116-185
Velmi vysoký	nad 185

Fosfor má od jiných živin několik odlišností. První je, že je v rostlině obsažen jak v organické, tak i anorganické formě. Dalším specifíkem je, že během asimilace zůstává fosfor v oxidovaném stavu, na rozdíl od dusičnanů a síranů, které jsou během asimilace redukovány (Balík et al. 2008).

Tento prvek má pro rostlinu klíčový význam. Jeho sloučeniny se podílejí na rozvinutém spektru reakcí, a to buď jako donory energie, nebo jako strukturní části složitých sloučenin. Dále je součástí spousty organických sloučenin, např. ATP, NADP, fosforylovaných sacharidů, Calvinova cyklu a kyseliny fosfoglycerové (Tlustoš et al. 2002). Anorganický fosforečnan

je nezbytný pro vznik ATP při fosforylaci a jeho hladina ve stomatu ovlivňuje syntézu škrobu v chloroplastu a transport sacharidů do cytoplazmy. Kyselina fosforečná patří mezi nezbytné komponenty nukleových kyselin. Nukleové kyseliny se skládají právě z kyseliny fosforečné, monosacharidů ribosy nebo deoxyribosy a z dusíkatých heterocyklických bází. Fosfor je v nukleových kyselinách nositelem jejich acidity, a tedy i vysoké koncentrace kationů ve strukturách nukleových kyselin. Důležitou roli hraje fosfor i při přenosu signálů na vnitro i mezibuněčné úrovni. Z důležitých posílů je to adenosinmonofosfát. Z vnějšího prostředí do buněk přenáší signály dva poslové, a to inositol-1,4,5-trifosfát a diacylglycerol (Balík et al. 2008).

Jednou z nejvýznamnějších sloučenin obsahujících P je fytin. Jedná se o nízkoenergetickou sloučeninu fosforu. V semenech vytváří obsah fytinu 60 až 80 % celkového obsahu fosforu. Ve fytinu je také soustředěna velká část hořčiku. V obilninách se množství fytinu pohybuje okolo 1 %. Hrách a sója obsahuje 1,2 % a řepka až 4 %. Při klíčení semen se aktivitou fytázy uvolňují anionty kyseliny fosforečné a kationty  $Mg^{2+}$ , případně  $Ca^{2+}$ , které jsou hlavním zdrojem fosforu a hořčiku pro klíčící rostlinky. Vysokou aktivitu vykazují semena žita, nižší pšenice, nízkou oves a luskoviny, a nejnižší kukuřice. Fytin se navrácí do půdy ve formě organických hnojiv nebo v posklizňových zbytcích. V živých organismech začíná enzymový rozklad fytinu v trávicím ústrojí. Působí na něj fytázy četných mikroorganismů střevní mikroflóry. Rozklad je poměrně rychlý u přežvýkavců. U ostatních zvířat a lidí je rozklad pozvolnější a část fytinu se tak dostává výkaly do statkových hnojiv a následně do půdy (Vaněk et al. 2016).

### 3.3.4 Nedostatek fosforu

Nedostatek fosforu se projevuje méně často. Velice často se jedná o latentní nedostatek, což znamená, že na rostlinách nejsou zřetelné žádné zjevné příznaky, nemohou ovšem probíhat biochemické funkce na potřebné úrovni. Nejdůležitější období pro příjem fosforu rostlinami je na začátku vegetace. Nejvíce je ztížen příjem za chladného nebo suchého počasí. Běžný je tento výskyt především na chudých stanovištích, utužených půdách a okrajích pozemků. Napomáhá k tomu chladné počasí, kdy je nižší biologická činnost půd a omezené uvolňování fosforu z organických sloučenin mineralizací (Vaněk et al. 2016). Nedostatek fosforu narušuje životní procesy rostlin. Nejvíce fotosyntézu, kde dochází ke snížení výnosů a obsahu cukru, škrobu, bílkovin a dalších složek v pěstovaných produktech (Vaněk et al. 2007). Dle Withers et al. (2014) příjem závisí na energetických zásobách v rostlinných pletivech, tudíž jeho nedostatek může nastat nejen při nedostatečném příjmu z vnějšího prostředí, ale i v případě nedostatku energie nashromážděné ve fosforečných esterech. Aktivní proces příjmu fosforu vyžaduje dostatek energie z makroenergetických vazeb, neboli ATP uvolněných pomocí enzymu ATPasy (Vaněk et al. 2007).

Rostliny s nedostatkem fosforu zaostávají v růstu, jsou malé, zakrslé a mají podobně vzpřímené postavení, jako při nedostatku dusíku. Starší listy jsou šedo zelené, z části i načervenalé. Kořeny se vyvíjejí slabě a je omezen jejich růst. Stonky jsou tenké a načervenalé. Tvorba plodů a semen je omezena. U obilnin je omezeno odnožování. Generativní vývoj je opožděný (Baier 1962). Poměr mezi hmotností nadzemní biomasy a kořenů je značně nižší. Rostliny nadbytečně ukládají zásobní látky ve formě sacharidů, převážně škrobu. Stromy omezují růst letorostů, tvorbu květů, semen a plodů (Tlustoš et al. 2002).

Dle Černý et al. (2014) se při nedostatku fosforu jednotlivá stadia vývoje pšenice opožďují. Dochází taktéž ke snížení počtu fertálních klasů a stupňuje se podíl hluchých klásků a klasů. Bylo prokázáno, že odrůdy tvořící výnos počtem zrn v klasu, jsou méně ovlivněny nedostatkem fosforu než odrůdy, které tvoří výnos počtem klasů na rostlinu. Na konci vegetace je P ve velkém podílu ukládán v znu. Rostliny část P remobilizují z vegetativních částí do generativních a určitý podíl je i nadále přijímán kořeny. Tím, že je fosfor v znu obsažen relativně v hojném množství, ovlivňuje nejen výnos, ale i kvalitu produkce. Omezený příjem fosforu může být také způsoben stresovými podmínkami (např. sucho, nízké teploty aj.), které výrazně ovlivňují jeho příjem (Richter & Hřivna 2005). V návaznosti s Rodriguez et al. (1996) v nádobových pokusech s pšenicí zjistil, že vyšší obsah fosforu zlepšuje toleranci rostlin ke stresu ze sucha.

### **3.3.5 Nadbytek fosforu**

Výrazný nadbytek fosforu v rostlinách se u nás téměř nevyskytuje, což je zapříčiněno tím, že je půdou velice dobře sorbován a jeho obsah zdaleka nedosahuje kritických hodnot, kdy by přecházel ve vyšších koncentracích do půdního roztoku. V zahraničí, kde je uváděn nadbytek fosforu jako negativní vliv na rostliny, je jeho obsah daleko vyšší. Většinou je způsoben vysokým podílem organického fosforu (fytin), který se do půd dostává ze statkových hnojiv. Pokud byly u nás zaznamenány příznaky poškození rostlin jeho nadbytkem, stalo se tak většinou z důvodu vysokého melioračního hnojení. Vysoká dávka způsobí krátkodobé snížení přijatelnosti některých kovů tím, že se rozpustné fosforečnany vážou na tyto kovy a vytvářejí nerozpustné sloučeniny (Vaněk et al. 2016).

### **3.3.6 Hnojení rostlin fosforem**

Fosfor patří mezi nejvýznamnější stavební živiny ve výživě rostlin. Zásoby přijatelného fosforu v půdách se ale postupně snižují a fosfor se stává limitujícím prvkem výnosu a kvality produkce. V současné době převyšuje bilanční odběr fosforu jeho vstupy. Je to dáno především omezeným hnojením statkovými hnojivy a dalšími organickými a minerálními hnojivy. To má za následek snižování obsahu přístupného fosforu v půdě. S klesajícím hnojením se na všech typech půd zastavil růst obsahu fosforu a vznikl přechod do nižších kategorií zásobenosti. Hnojení by mělo být takové, aby nedocházelo k jeho trvalému deficitu v půdě. Tím by byla snížena půdní úrodnost, která je základním předpokladem pro zajištění stabilních výnosů a kvalitní produkce. Důsledkem hospodaření bez navracení odebraných živin je příjem fosforu ze „staré půdní síly“, což je v rozporu s intenzivní výrobou a účinek „staré půdní síly“ je pouze dočasný (Kunzová 2009). Naopak Withers et al. (2014) uvádí, „krmte plodinu, ne půdu“, důležité je tedy přizpůsobení aplikačních dávek fosforu blíže požadavkům plodin, optimalizace načasování a umístění fosforových hnojiv a snížení celkových ztrát fosforu do životního prostředí.

Hnojení fosforem je možné provádět do zásoby. Jednoleté rostliny se hnojí na podzim. Je zde přípustné celoplošné hnojení. Pokud máme možnost hnojení lokálního, hnojíme na jaře. U víceletých rostlin se musí uvažovat o lokálním hloubkovém hnojení, nejlépe na jaře. Vzhledem k tomu, že je fosfor difúzně téměř nepohyblivý a půdní biotou preferenčně přijímaný, je nutné ho zapravit k rostlinám do optimální hloubky a co nejbližší k nim.

Před aplikací fosforečného hnojiva je nutné mít upravenou půdní reakci. Fosfor se totiž mimořádně snadno váže s ostatními prvky. Vše je vázáno v přímé vazbě na stupeň pH. V půdách kyselých velmi rychle vznikají fosforečnany hliníku a železa. S vápníkem tvoří nejběžnější formy výskytu fosforu v zemské kůře, minerálů skupiny apatitů  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . V případě neupravené půdní reakce dochází k zneprístupnění fosforu vznikem nerozpustných anorganických sloučenin (Kunzová 2009).

Baier (1962) tvrdí, že je třeba volit dávky fosforečných hnojiv na základě výsledků analýzy AZP. V horším případě dle jednotlivých odběrových normativů rostlin. Nesmyslné je použití nižších dávek, než je určeno potřebou. Zájem půdní bioty o tuto živinu, umocněný nepohyblivostí a vazbou v půdě, může způsobit, že se fosfor k rostlinám vůbec nedostane. V případě nutnosti aplikovat menší množství hnojiva, než je určená dávka, je následně doporučeno místo plošné aplikace hnojiva hnojit rostliny lokálně nebo plnou dávkou vyhnojit jen určitou část pozemku.

### **3.3.7 Hnojení pšenice fosforem**

Fosforečná hnojiva je nejvhodnější aplikovat již před setím ozimé pšenice a zapravit je do půdy, nejlépe rovnoměrně v celém orničním profilu. Fosfor je živinou, která je v půdě velmi málo pohyblivá a při vhodných podmínkách přechází velmi snadno do nepřijatelných forem. Z tohoto hlediska je zřejmé, že není vhodné aplikovat P pouze na povrch, což znamená během vegetace, jelikož využití P pšenicí bude velice nízké. Při výběru dávky hnojiv se řídíme půdní zásobou. Pokud je úroveň fosforu na dobré úrovni, není potřeba vysoké dávky hnojiv. Nezbytné je tolerovat půdní vlastnosti, a to zvláště pH. Při nevhodné půdní reakci dochází k vysrážení dodaných vodorozpustných forem, a tím se účinnost hnojení se snižuje. Vodorozpustný fosfor je dodáván amofosem a superfosfáty. Do kyselých půd je příhodnější aplikovat hnojiva typu mletých fosfátů, hyperfosfátů atd. Vhodným způsobem, jak pečovat o půdní úrodnost a přijatelnost fosforu, je nejprve optimalizovat pH půdy, a až následně řešit hnojení (Černý et al. 2014).

### **3.3.8 Postup stanovení dávek fosforečných hnojiv**

Obsah fosforu v půdě zjistíme pomocí agrochemického zkoušení zemědělských půd. Je to základní parametr, který se při AZP zjišťuje pomocí činidla Mehlich III. Stanovením přístupné formy fosforu se získávají informace, dle kterých lze mimo jiné určit některé parametry půdní úrodnosti. Půdní úrodnost může mít i velmi dynamické změny, protože jakákoliv změna dynamiky fosforu předem signalizuje možnou následnou změnu obsahu přístupného fosforu, i když nemusí být ještě u AZP zaznamenána. Pro určování dynamiky byly využity následující ukazatele: mobilní a labilní fosfor, adsorpčně desorpční a kinetické ukazatele. Vypočtené dávky a potřeba P-hnojiv vychází z charakteru skupin půd, z dlouhodobých bilancí živin a z předpokládaných výnosů plodin. Ve výpočtech musíme zohlednit jak chemický rozbor půd, tak skupinu půd, skupinu půdního druhu, aciditu půdy, statkové hnojení, zaorávání různých posklizňových zbytků a zvětrávání půdního substrátu (Kunzová 2009).



### 3.3.9 Používání minerálních a statkových hnojiv

Dávky minerálních i statkových hnojiv jsou stanovovány vzhledem k potřebám jednotlivých plodin na určitých stanovištích. Zpravidla se vychází z potřeby živin, které jsou potřebné pro dosažení reálné úrovně a požadované kvality výnosů. Rozdělení dávek, termín hnojení i způsob aplikace se upřesňují dle aktuálního stavu porostu, podle povětrnostních podmínek a podle zásob dusíku v půdě, které jsou rostliny schopny využít (Vaněk et al. 2016). Hlavní zásady a doporučení pro používání minerálních a statkových hnojiv je:

- nutnost dbát při aplikaci na rovnoměrné dávkování a rozmetání hnojiv;
- aplikace minerálních dusíkatých hnojiv v době možné odběrem rostlinami a
- dodržet limity hnojení.

Od začátku července do začátku období nevhodného ke hnojení, lze v podobě minerálních hnojiv aplikovat pouze do 40 kg N/ha nebo v podobě tekutých statkových hnojiv dávku 80 kg N/ha. Takto je možno hnojit ozimé plodiny, meziploidy (s výjimkou čistých porostů luskovin a jetelovin). Dále v jejich kapalné formě k podpoře rozkladu slámy. To vše s výjimkou půd s promyvným vodním režimem, kde se aplikace minerálních dusíkatých hnojiv přesouvá na jarní vegetační období. Dle Dostál et al. (2004) je k hnojení plodin na trvalých travních porostech a orných půdách doporučeno využít dělených dávek minerálních a statkových hnojiv. Také pro vysokou účinnost je důležitá vyrovnaná výživa živinami a udržování pH půdy.

**Tabulka 4.: Období zákazů hnojení půdy (Dostál et al. 2004)**

Zemědělský pozemek s pěstovanou plodinou nebo připravený pro založení porostu		Období se zákazem hnojení	
Hněj, kompost		Kejda, močůvka, hnojůvka	Minerální dusíkatá hnojiva
Jednoleté plodiny na orné půdě	1. 6. - 31. 7	15. 11. - 31. 1.	1. 11. - 31. 1.
Travní porosty na orné půdě, louky, pastviny	Aplikace není časově omezená	15. 11. - 31. 1.	1. 10. - 28. 2.

#### Fosforečná hnojiva

Fosforečná hnojiva jsou látky, které obsahují tuto živinu přímo ve formě pro rostliny přístupnou, nebo ji poskytují až po svém rozkladu. Hnojiva se dělí dle dostupnosti formy a fosforu. Rozsah je veliký, od lehce rozpustných solí až po látky velmi těžko rozpustné, a to jen za specifických stanovištních podmínek (Baier 1962).

### 3.3.10 Organická hnojiva

Půdy pravidelně hnojené organickými hnojivy vykazují lepší fyzikální vlastnosti, lépe zadržují živiny a přijímají vodu. Jsou odolnější k výkyvům pH a umožňují příhodnější dávkování a využití minerálních hnojiv (Vaněk et al. 2016). Amadou et al. (2021) ve svém článku píše, že kombinace slámy a organických hnojiv při vrácení na pole, zlepšují úrodnost půdy a zvyšují produktivitu. Dodávají vysoký obsah dusíku a vyšší obsah bílkovin.

## Chlévský hnůj

Chlévský hnůj je již po staletí využíván jako základní zdroj rostlinných živin. Dodává do půdy živiny, zlepšuje strukturu půdy, a také zvyšuje půdní vlhkost (Wolf et Snyder 2003). Do této skupiny se řadí organické hmoty a materiály, jejichž společným znakem je biologický původ. Jsou nejen zdrojem živin, ale obzvláště dodavatelem humusotvorných látek (Baier 1962).

Hnůj vzniká uzráním chlévské mrvy, tedy směsi výkalů, steliva i zbytků krmiva. Množství produkce chlévské mrvy a v ní obsažených živin závisí na druhu a stáří zvířat. Také závisí na způsobu krmení zvířat, na druhu a množství steliva. Skutečnost, že je složení hnoje tolik závislé na výživě zvířat, může představovat riziko kontaminace mědí či zinkem. Tuto kontaminaci způsobují výživové doplňky stravy hospodářských zvířat (Petersen et al. 2007). Nejvíce fosforu obsahuje hnůj skotu chovaný na hluboké podestýlce. Obsahuje 0,15 %. Ovčí hnůj v čerstvém stavu obsahuje 0,14 % a koňský 0,11 % fosforu. V močůvce fosfor není obsažen vůbec. Největší obsah fosforu obsahuje kejda drůbeží. V čerstvém stavu je v ní fosfor obsažen v množství 0,28 % (Vaněk et al. 2016).

Faměra (1993) uvádí, že pro dobrou účinnost hnojení je třeba ideální pH půdy, množství půdních zásob. Nezbytné hnojení určujeme pomocí agrochemických rozborů půdy, a také z rozborů rostlin. Fosfor můžeme dodat jak v anorganické, tak v organické formě. Vhodná aplikace hnojiv je na konci léta, většinou na podzim. Nejlépe před zpracováním půdy, kdy lze hnojiva do půdy následně zapravit orbou či podmítkou.

Proces zrání mrvy zahrnuje kvašení, tlení a hnití, při kterém se rozkládají jednotlivé složky a následně se přeměňují na látky s odlišným kvalitativním složením. Jedná se tedy o na sebe navazující biologicko-chemické procesy, které se průběžně prolínají. Největší síla rozkladu organických látek probíhá za přístupu vzduchu, kdy se z uhlíkatých organických látek uvolňuje oxid uhličitý a z dusíkatých organických látek amoniak. Stále jsou užívány technologie nezpevněných stanovišť nebo sklápění návěsů vedle sebe. To způsobuje úbytek organických látek až o 60 %, což přináší i značné finanční ztráty. Naopak při kvalitním skladování, jako je vrstvení do bloků, by ztráty organických látek neměly být vyšší než 40 %. Důležitou zásadou při používání chlévského hnoje je jeho okamžité zaorání, jinak se snižuje jeho hnojivá účinnost, po 6 hodinách až o 16 % a po 4 dnech až o 36 %. Předpisy však ukládají povinnost hnůj zapravit do půdy do 48 hodin. Využití živin z chlévského hnoje je rozprostřeno na delší časové období. Nejvíce živin je využito během prvních třech let po aplikaci, přičemž v lehkých půdách bývá hnůj rozložen během dvou let. Naopak v půdách těžších se jedná o delší dobu. Nejvíce bývá využito draslíku a dusíku. Využití fosforu se jeví jako nejnižší, ale podstatně vyšší než u hnojiv minerálních. P je z organické hmoty postupně uvolňován procesem mineralizace. U chlévského hnoje je v prvním roce po jeho aplikaci rostlinami využito zhruba 15 % dodaného P, ve druhém roce 10 % a v roce třetím 5 % (Vaněk et al. 2016). Balík et al. (2008) díky rozsáhlému množství analýz tvrdí, že naše zemědělství stále ještě využívá fosfor, který byl dodán do půd v období 1965 až 1990, tudíž čerpá z půdních rezerv.

## Čistírenské kaly

Čistírenské kaly vznikají během procesu čištění odpadních vod, ze kterých jsou fyzikálními, biologickými, chemickými či fyzikálně-chemickými procesy oddělovány znečišťující látky (ECO trend 2015). Pod tímto pojmem se označují směsi dvou nebo více

odpadních látek. Nejméně jedna z těchto látek musí být v kapalném skupenství a vytvářet souvislou kapalnou fázi. Alespoň jedna další látka musí být přítomna v tuhém skupenství a musí být dispergována v kapalně fázi. Kal je nevyhnutelným výsledkem, či odpadem při čištění odpadních vod. Při čištění odpadních vod se odstraňují nežádoucí složky z vody a koncentrují se do kalu (Ministerstvo životního prostředí 2023)

Dle ECO trend (2015) kaly obsahují škodliviny, kterými jsou těžké kovy či patogenní organismy. Zároveň jsou však bohaté na živiny, převážně dusík a fosfor a také cennou organickou hmotu. Právě díky obsahu organické hmoty a živin je vhodné použít tento typ odpadu jako hnojivo nebo přípravek zlepšující půdní vlastnosti. Největší množství tohoto odpadu v rámci ČR je využito v kraji Vysočina, následně ve Středočeském kraji, a i v kraji Olomouckém. Nejméně kalů je využito v Praze či Královéhradeckém kraji. Karlovarský kraj, prozatím použití kalů na zemědělské půdě nezaznamenal.

Tlak vyvíjený na kvalitu povrchových vod vede ke zvýšené péči o odpadní vody, což současně napomáhá k narůstající produkci kalů. Likvidaci lze provést skládkováním, spalováním a také aplikací na zemědělskou půdu. Ve vyspělých státech Evropské unie je zhruba 40 % využíváno v zemědělství z celkové produkce čistírenských kalů. Při aplikaci je nutné zvážit jejich kladné i záporné vlastnosti. Jako pozitivum lze jmenovat obsah živin a organických látek. K negativním vlastnostem patří potenciální přítomnost rizikových prvků či patogenů (Balík et al. 1999).

Fijakowski et al. (2017) uvádí, že využití kalů jako přívod živin a organické hmoty do půdy je velmi udržitelný způsob využití těchto odpadních látek. Představuje však i riziko z hlediska obsahu kontaminantů, jako jsou těžké kovy, organické sloučeniny, patogeny, farmaceutika, kosmetické produkty a nanočástice.

Cílem úpravy kalů je zabránit nepříznivým dopadům na životní prostředí a lidské zdraví. Koncentrace prospěšných i znečišťujících složek v kalu (a zdravotní rizika s nimi spojená) závisí na počáteční kvalitě odpadní vody a na úrovni technologie čištění, která zaručí dosažení kvalitativních požadavků na vyčištěnou odpadní vodu. Ne všechny rizikové prvky a další rezidua je možno dostatečně v rámci dostupných technologií pro čištění vody odstranit. Důležitým opatřením je, pokud možno zamezit vnosu rizikových prvků a dalších reziduí do odpadních vod, aby tyto dále nezatěžovaly kal i vyčištěnou vodu. Dojde tak k menšímu zatížení životního prostředí (vod) a dále bude možno využít kal jako organické hnojivo, které snižuje náchylnost půd k erozi a zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu. Produkci kalů nelze zabránit, pouze lze výběrem vhodné technologie zmenšit jejich produkované množství. Požadavky na zpracování kalů rostou a budou komplexnější v důsledku rostoucích standardů pro životní prostředí. Ukládání kalů na skládky je v ČR zakázáno (Ministerstvo životního prostředí 2023).

Požadavky na zlepšení kvality povrchových vod bezprostředně vedly k zvýšení počtu kapacit čistírenských stanic odpadních vod a nárůstu produkce kalů. Významným kladem kalů je vysoký obsah organických látek a živin, a to především fosforu a dusíku. Obsah živin úzce souvisí s původem kalu a způsobem jeho ošetření. Kaly z čistíren odpadních vod vykazují vysoký a kolísavý obsah vody (okolo 70 %) a z toho důvodu je nutné uvádět obsah živin v sušině. Upravenými kaly je do půdy dodáváno velké množství poměrně dobře a rychle rozložitelných organických látek, a proto tyto kaly příznivě ovlivňují biologickou činnost půd a mineralizací jsou uvolňovány živiny jako dusík a fosfor, takže částečně mohou nahradit funkci

klasických organických hnojiv, oproti kterým je v kalech nižší obsah draslíku (Vaněk et al. 2016).

Při použití nejvyšší povolené dávky upraveného čistírenského kalu, tedy 5 t sušiny/ha za rok, je do půdy dodáno přibližně 60 kg P, 160 kg N, 15 kg K a 125 kg Ca, které již prvním rokem z větší části přejdou do forem přijatelných pro rostliny. S ohledem na obsah rizikových prvků v kalech, je nutné sledovat jejich obsah a následně ke hnojení použít pouze takové kaly, jejichž složení je vyhovující. Znečištění rizikovými prvky se díky soustavnému sledování kvality odpadních vod významně snížilo. Však i přes tuto kontrolu se mohou stát značným rizikem kontaminace půdy a následně i kvality rostlinné produkce. Z tohoto důvodu jsou pro čistírenské kaly používané ke hnojení zemědělských půd stanoveny limitní hodnoty přípustných obsahů rizikových prvků (Vaněk et al. 2016).

Anorganické kontaminanty nejsou biologicky rozložitelné. Proto se mohou hromadit v půdě, ukládat se v životním prostředí a vstupovat do potravního řetězce. Nejvýznamnější jsou těžké kovy. V tomto ohledu se sledují Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Cd, Pb, Sn, Mo, V, přestože z hlediska toxicity jsou stejně škodlivé metaloidy jako As, Se, popř. nekovy a lehké kovy jako Al. Proto se stále častěji používá termín kovové stopové prvky (Fijalkowski et al. 2017).

Anorganické látky jsou sledovány dlouhodobě a představují mnohem menší riziko kontaminace než toxické organické polutanty neboli organické kontaminanty. Ty jsou nejčastěji zjištěny v komunálních čistírenských kalech, a patří mezi ně absorbovatelné organické halogeny, lineární alkylbenzensulfonáty, nonylfenoly a nonylfenoethoxyláty, diethylhexylftalát, polyaromatické uhlovodíky, polychlorované bifenyly, polychlorované dibenzo-pdioxiny a furany (Kapanen et al. 2013).

Článek (Čistírenské kaly 2023) uvádí, že kaly představují přibližně 1–2 % objemu znečištěných vod, je v nich však zkoncentrováno 50–80 % původního znečištění. To je způsobeno především patogenními mikroorganismy a obsahem toxických chemických látek a těžkých kovů. Počet a druh patogenů závisí na místních geografických, klimatických a demografických faktorech. Hlavním zdrojem patogenních mikroorganismů jsou exkrementy infikovaných lidí a zvířat. Mezi patogenní organismy, které se mohou vyskytnout v odpadních vodách, patří zejména viry (hepatitida A), bakterie (*Salmonella*, *Escherichia coli*), protozoa a parazitická červa. Legislativně je problematika nakládání s kaly z ČOV řešena zákonem č. 541/2020 Sb., o odpadech a vyhláškou č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (Ministerstvo životního prostředí 2023).

Monitoring kalů čistíren odpadních vod je prováděn na základě zákona č. 147/2002 Sb., o Ústředním kontrolním a zkušebním ústavu zemědělském, ve znění pozdějších předpisů. Zaměřuje se především na čistírny odpadních vod, jako jednu z možností vstupů do půdy, u kterých se předpokládá, že jistá část jejich produkce je v konečné fázi směřována na zemědělskou půdu (Prášková 2020).

Havelka (2019) uvádí, že dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, lze na půdu používat pouze upravené kaly s ohledem na výživové potřeby rostlin. V souladu s programem použití kalů způsobem, aby nebyla zhoršována kvalita půdy, povrchových i podzemních vod. Upraveným kalem se rozumí takový kal, který byl podroben biologické, tepelné či chemické úpravě, dlouhodobému skladování či jinému procesu, při kterém se výrazně sníží obsah patogenních organismů, a tím i zdravotní riziko spojené s jeho aplikací. Kaly lze termicky

zpracovávat (pyrolýza). Představují zajímavý surovinový zdroj, zejména pro obsah fosforu. Fosfor lze získat také formou přímé separace z kalové vody, tato metoda je např. v Německu již povinná.

### 3.3.11 Minerální fosforečná hnojiva

Hlavní surovinou minerálních fosforečných hnojiv jsou především surové fosfáty z přírodních nalezišť. Dále to jsou nerosty obsahující fosfor a další fosforečné sloučeniny. Fosfáty, které vznikly sopečným původem, nazýváme apatity a fosfority. Fosfority jsou různě zbarvené amorfní sedimenty. Nejrozšířenější apatit je kolský z Ruska. Obsahuje 17,5 % fosforu a chemicky je tvořen fluorapatitem. Fosforitová naleziště jsou především v Africe. Maroku, Alžírsku, Tunisu a podobně. Obsah fosforu se pohybuje v rozmezí od 12,5 % do 15,5 %. Jsou to organogenní kryptokrystalinické fosfority. Po chemické stránce jsou tvořeny fluoroapatitem, chlorapatitem, hydroxylapatity a karbonátapatity. Fosforečná hnojiva vznikají i při výrobě železa z železné rudy. Zde přítomný fosfor se musí při tavení odstranit. Vzniká tzv. Thomasova moučka (Baier, 1962). Jednotlivými kroky úprav fosforečných hnojiv jsou: mletí, promývání, síťování, magnetické oddělení oxidů železa, flotace pro oddělení křemene a kalcinace pro oddělení organických nečistot (Büchner 1991).

Výroba fosforečných hnojiv se děje více způsoby. Principem chemického zpřístupnění fosforu z vápenatých fosfátů při výrobě superfosfátů je to, že se část vápníku nahradí vodíkem. Mechanickým způsobem získáváme mleté fosfáty, např. hyperfosfát. Tavením s přísadami (termickým způsobem) jsou získávány termofosfáty. Mletím Thomasovy strusky se získává hnojivo Thomasova moučka (Baier 1962).

Hlavní výrobci těchto hnojiv jsou USA, Čína, Afrika a Střední východ. Mezi producenty je zařazených také několik rozvojových zemí, pro které je fosfátový průmysl velice důležitý z ekonomického hlediska (Isherwood 1998).

Hnojiva s lehce rozpustnými sloučeninami fosforu jsou hnojiva s lehce rozpustnými sloučeninami fosforu se vyznačující se tím, že převážný podíl fosforu je ve formě vodorozpustné. Účinek těchto hnojiv, dodaných do půdy s neutrální až slabě kyselou reakcí, je poměrně rychlý. Ale i zde dochází časem k tzv. retrogradaci vodorozpustné formy. Je zesílená kyselou i alkalickou půdní reakcí. Přes různé mezistupně amorfních forem se v kyselé půdní reakci tvoří těžko rozpustné Fe – a Al – fosfáty a obdobně při neutrální až alkalické reakci Ca-fosfáty. Pozdější remobilizace fosforu je možná především změnou půdní reakce. Do této skupiny hnojiv se řadí různé druhy superfosfátů (Baier 1962). Základní surovinou pro výrobu superfosfátu je kyselina fosforečná. Nejrozšířenějším fosforečným hnojivem je trojitý superfosfát, který tvoří přibližně 20 % celosvětové spotřeby (Jäger & Hegner 1987).

#### Superfosfát jednoduchý

Jednoduchý superfosfát je první průmyslově vyráběné hnojivo a do konce šedesátých let byl na předním postavení mezi nabízenými hnojivy světového trhu (Richter & Hlušek 1996). Základní složkou je  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ . Aplikace tohoto hnojiva je vhodná pro půdy od slabě kyselé reakce. Na kyselých půdách se dihydrogenfosforečnanový iont váže na hliník a železo, když není sorpční komplex nasycen vápníkem. Proto aplikace tohoto hnojiva není doporučována na kyselých půdách. Jednoduchý superfosfát je ve dvou formách. Práškový

superfosfát obsahuje 8,3 % fosforu (18 až 19 %  $P_2O_5$ ). Vlastnostmi je to šedohnědý kyprý prášek, který je mírně vlhký, ale nemazlavý.

Granulovaný superfosfát obsahuje 19 %  $P_2O_5$ . Jsou to šedé až šedohnědé granule o velikosti 1-4 mm. Granulovaná forma je ekonomicky výhodnější, hygieničtější a má větší hnojivou účinnost.

#### Superfosfát dvojitý

Základní složkou je  $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ . Obsahuje 14,4 % P (33 %  $P_2O_5$ ). Dodává se ve formě šedých až šedohnědých granulí. Je vhodnější na kyselé půdy než superfosfát jednoduchý a je vhodný i na neutrální půdy.

#### Superfosfát trojitý

Základní složkou je  $Ca(H_2PO_4)_2$ . Obsahuje 19,8 % P (45 %  $P_2O_5$ ). Dodává se ve formě šedých až šedohnědých granulí. Nehodí se pro půdy bohatě zásobené vápníkem s vyšším obsahem železa a vápníku, a pro půdy silně kyselé (Kunzová 2009). Trojitý superfosfát má několik agronomických výhod, díky nimž je po mnoho let tak oblíbeným zdrojem P. Má nejvyšší obsah P v hnojivech bez N. Více než 90 % celkového P je rozpustný ve vodě, takže je rychle dostupný pro příjem rostlinami. Hnojivo také obsahuje 15 % vápníku (IPNI 2020).

Superfosfáty lze univerzálně používat ke všem plodinám nejen při předset'ové přípravě, ale také při předzásobném hnojení či hnojením do zásoby. Na půdách chudých na fosfor se osvědčuje lokální aplikace hnojiva do blízkosti osiva nebo plošná aplikace startovací dávky. Půdy dobře zásobené fosforem nereagují tak významným způsobem na hnojení superfosfáty. Na půdách s méně příznivými poměry pro trvalejší účinek vodorozpustné formy fosforu dodávané v superfosfátech, je nutné kombinovat hnojení superfosfátem se zapravením organických hnojiv do půdy orbou. Toto zapravení rovněž chrání vodorozpustnou formu fosforu před rychlou retro gradací a přispívá i k rozšíření organických vazeb fosforu, které se po mineralizaci stávají pozvolným trvalejším zdrojem výživy rostlin fosforem. Superfosfát přidaný k organickým hnojivům rovněž stimuluje humusotvorné pochody. Práškový superfosfát je také vhodný k obohacování močůvky fosforem, kde snadno přechází do roztoku, vyrovnává poměr živin a zabraňuje ztrátám amoniaku. Přidává se 1 až 2 kg na 100 l močůvky superfosfátů (Baier 1962).

Hnojiva se středně rozpustnými sloučeninami fosforu jsou hnojiva s převážným podílem přítomného fosforu ve formách rozpustných buď ve 2 % citronanu amonném, nebo ve 2 % kyselině citrónové. Tato hnojiva nejsou ve vodě rozpustná, proto musí být jejich fosfor v půdě převeden do přístupné formy. To se nejčastěji děje pozvolna pomocí činnosti kyselin, mikroorganismů a kořenových výměšků. Sortiment hnojiv je zde velmi malý. Jedná se o Thomasovu moučku, termofosfáty a dikalciumfosfáty. Poslední dvě jmenovaná hnojiva se však příliš často nevyužívají.

#### Thomasova moučka

Thomasova moučka obsahuje kolem 7 % fosforu, který je z 80 % rozpustný ve 2 % kyselině citrónové. Dále obsahuje 32-35 % vápníku, do 2,5 % hořčíku a 5-6 % křemíku. Dodává se ve formě těžkého, jemně mletého prášku světle šedé nebo tmavošedé barvy (Baier 1962).

Thomasova moučka je jediné fosforečné hnojivo, které se nezískává zpracováním přírodních fosfátů (Richter & Hlušek 1996). Získává se mletím strusky, která vzniká jako vedlejší produkt při odstraňování fosforu ze železných rud při výrobě oceli konventorovým či talbotovým způsobem (Baier 1962). Fosfor má v moučce formu fosforečnanů křemičitano-vápenatých, protože se váže na oxid vápenatý, který je při tavení železných rud přidáván do vsázky (Richter & Hlušek 1996). Hnojivý účinek je větší při velmi jemném namletí moučky. Moučka působí v půdě pozvolna. Obsahuje rovněž vysoký obsah vápníku a působí alkalicky.

Nejlepší účinky má na lehčích a kyselých půdách v našich bramborářských a horských oblastech. Přednostně ji aplikujeme k plodinám s delší vegetační dobou. Moučku je vhodné zapravit předset'ovou přípravou nebo orbou. Orbou dosáhneme hlubší zapravení hnojiva a dosáhneme tak dosycení i spodnějších vrstev půdy fosforem. Toto hnojivo má mimořádně příznivý vliv na půdní úrodnost, kdy otupuje kyselé půdní reakce, zlepšuje půdní strukturu a stimuluje biologickou činnost půdy (Baier 1962). V současné době se Thomasova moučka prakticky nepoužívá z důvodu vysokého výskytu rizikových prvků.

Hnojiva s těžko rozpustnými sloučeninami fosforu jsou ve formě fluorapatitu či jiných apatitů je pro rostliny bez rozrušení vazeb půdními faktory nedostupný. Pro dobrý účinek se k hnojení používají především měkké surové fosfáty, které jsou upraveny jemným mletím.

Podle rozpustnosti v kyselině mravenčí je zařazujeme do tří skupin:

- s vysokým podílem fosforu rozpustného v kyselině mravenčí (hyperfosfát)
- se středním podílem rozpustného fosforu
- s nízkým podílem rozpustného fosforu

Na působení a využití fosforu z těchto hnojiv nemá vliv pouze rozpustnost a jemnost jejich mletí. Ale vliv mají také půdní podmínky. K nejintenzivnější mobilizaci dochází při nízkých hodnotách půdní reakce (pod pH 6 až 6,5), dostatečné vlhkosti půdy, vyšších teplotách a dostatku organické hmoty, která stimuluje biologickou aktivitu půdy.

Fosfor je z těchto hnojiv uvolňován postupně a v závislosti na výše uvedených podmínkách. Hnojiva jsou aplikována především ve vysokých dávkách jednorázově s cílem využití jejich melioračního účinku ke zvýšení půdní úrodnosti.

### Hyperfosfát

Základní složkou je  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Obsahuje kolem 13 % fosforu, a nejméně 2/3 jsou rozpustné ve 2 % kyselině mravenčí. Dále obsahuje kolem 34 % Ca přítomného především v apatitu, 0,6 % Mg a z mikroelementů B, Cu, Mn, Zn. Vlastnostmi je to jemně šedá nebo šedohnědá hmota bez zápachu, velmi sypká a prašná. Granulovaná forma tohoto hnojiva se nazývá hyperkorn.

Hyperfosfáty používáme na kyselé půdy s hodnotou pH pod 6,5 především ve vlhčích oblastech. Aplikace je možná na jaře i na podzim. Výhodné je předzásobením nebo melioračním hnojením vyššími dávkami spojit se zapravením orbou společně s organickými hnojivy. Vhodné je rozmetení již na strniště. Hyperfosfáty také využíváme k obohacování hnoje nebo kejdy, kdy se přidává 30 až 40 kg hyperfosfátu na 1 t hnoje nebo asi 0,5 kg na ustájený kus skotu na den (Baier 1962).

Vícesložková minerální hnojiva obsahující fosfor lze dále dělit na vícesložková hnojiva:

- **směsná:** jsou vyráběna pouhým smícháním jednotlivých jednosložkových hnojiv v požadovaném poměru živin. Není zde využito žádných chemických reakcí.
- **kombinovaná:** během výroby jednotlivé složky hnojiva spolu chemicky reagují. Při výrobě kombinovaných hnojiv je technologicky výhodné použít suroviny s vysokou koncentrací základních složek a minimem znečišťujících příměsí.

Základními surovinami pro výrobu kombinovaných hnojiv je kapalný nebo plynný čpavek, kyselina dusičná s koncentrací 52-7 %, fosfáty nebo kyselina fosforečná, chlorid nebo síran draselný. Dalšími surovinami může být např. kyselina sírová, síran amonný, oxid uhličitý, dusičnan amonný, případně fosforečnany amonné. Základní krokem při výrobě kombinovaných fosforečných hnojiv je rozklad fosfátů v minimálně pětiprocentním přebytku kyseliny dusičné s koncentrací nad 53 % (Richter 2007).

#### NPK 15-15-15

Obsahuje 15 % N, 15 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a 15 % K<sub>2</sub>O, 2 % MgO a 12 % síry jako SO<sub>3</sub>. Dusík, fosfor a draslík je pro rostliny v lehce přijatelných formách. 40 % dusíku je v ledkové formě a draslík je ve vodorozpustné chloridové formě. Živiny jsou v hnojivu ve formě vápenatých, amonných a draselných solí kyseliny fosforečné, dusičné a chlorovodíkové. NPK je dodáváno ve formě šedohnědých granulí o velikosti 2 až 5 mm. Hnojivo je určeno k základnímu hnojení (na jaře před setím nebo výsadbou, resp. před zahájením vegetace) a k přihnojování během vegetace, zejména u půd se střední a vysokou zásobou fosforu a draslíku (Hnojivo ES 2012).

#### Amofos

Obsahuje 12 % N a 52 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Hnojivo se používá k podzimnímu předset'ovému hnojení nebo k regeneračnímu hnojení ozimů během vegetace. Možné je také využití k základnímu jarnímu hnojení, ovšem s nutností dodatečného dusíkatého přihnojení. Kvůli zvrhávání fosforu se nedoporučuje aplikace amofosu společně s hořečnatými a vápenatými hnojivy (Amofos 2018).

### **3.4 Principy stanovení přijatelného obsahu fosforu v půdě**

Pro stanovení přijatelného obsahu fosforu v půdě se využívá mnoho metod. Podle (Zbiral & Němec 2000) mezi nejpoužívanější metody patří Mehlich 3, Mehlich 2, Mehlich 1, CAL, Egnerova metoda, Olsenova metoda, Bray and Kurtz P metoda.

#### **3.4.1 Mehlich 3**

Činidlo Mehlich je výluhem směsi kyselin a dalších chemických sloučenin a je pojmenováno dle autora, postupně popisujícího metody Mehlich 1, Mehlich 2 a Mehlich 3. Poslední zmíněný v pořadí vyvinul Mehlich v roce 1984 jako vylepšení metody Mehlich 2. Jedná se o víceprvkový extrakt pro P, K, Ca, Mn, Cu, Fe a Zn, vhodný pro širokou škálu půd, kyselých i zásaditých.

Mehlich 3 je směs kyseliny octové, dusičnanu amonného, fluoridu amonného, kyseliny dusičné a EDTA. Kyselina octová v extrakčním činidle mimo jiné přispívá k uvolňování



dostupného P ve většině půd. Pro predikci reakce plodin na P na neutrálních a alkalických půdách je tato metoda účinnější než půdní test Mehlich 1, protože kyselost extraktantu je méně neutralizována půdními uhličitany. Za obecně optimální hodnotu Mehlich 3 pro růst rostlin a výnosy plodin je považováno 45-50 mg P/kg půdy (Wuenschel et al. 2016).

### **3.4.2 Vodný výluh**

Principem extrakce demineralizovanou vodou je převedení snadno rozpustného P z půdních částic do roztoku a ustanovení rovnovážné koncentrace P v systému roztok–půda (Bartels & Bigam 1996). Jednoduchost a rychlost stanovení patří mezi nesporné výhody této metody, díky kterým se zároveň snižuje riziko vnesení chyb (Fuhrman et al. 2005). Další výhodou je extrakce P při hodnotách pH blízkých půdnímu roztoku oproti jiným testům používajícím kyselé nebo alkalické roztoky.

(Fuhrman et al. 2005) zároveň poukazují na skutečnost, že použitý poměr půda ku roztoku a čas extrakce se v mnoha studiích liší a neexistuje jednotná metodika. Ve své porovnávací práci ukázali, že extrakční poměr půda: voda 1:10 a čas extrakce 10 minut jsou pro toto stanovení dostatečné a získané koncentrace silně korelují s hodnotou P získanou podle metody Mehlich 3.

## 4 Metodika

Experiment byl založen na pokusných stanicích ČZU v Praze a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Jedná se o stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami (Humpolec, Hněvčeves a Suchdol). Půdně-klimatické charakteristiky jsou uvedeny v tabulce č.5. Na parcelkách byly pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen (odrůdy jsou uvedeny v tabulce č.6).

**Tabulka 5: Základní charakteristika pokusných stanovišť**

Parametr	Humpolec	Suchdol	Hněvčeves
GPS souřadnice	49°33'16"N, 15°21'2"E	50°7'40"N, 14°22'33"E	50°18'46"N, 15°43'3"E
Nadmořská výška (m n. m.)	525	286	265
Prům. roční teplota (°C)	7,0	9,1	8,2
Prům. roční srážky (mm)	665	495	573
Půdní typ	Kambizem	Černozem	Hnědozem
Půdní druh	hlinito-písčitá	hlinitá	jílovitá-hlinitá
Podloží	Parula	spraš	
pH (CaCl <sub>2</sub> ) <sup>1)</sup>	5,1	7,5	5,9
P (mg.kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	77 (±10)	74 (±9)	87 (±11)
K (mg.kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	238 (±47)	209 (±18)	214 (±29)
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	112 (±14)	209 (±16)	240 (±24)
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	1625 (±187)	7803 (±1760)	2156 (±251)

<sup>1)</sup> Stanoveny 0.01 mol/l CaCl<sub>2</sub>, 1:10 w/v

<sup>2)</sup> Průměrné základní hodnoty stanovené metodou Mehlich 3 (rok 1996)

**Tabulka 6: Přehled odrůd pěstovaných v dlouhodobých pokusech**

Rok	Humpolec a Suchdol			Hněvčeves		
	Brambory	Pšenice	Ječmen	Brambory	Pšenice	Ječmen
1997	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1998	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1999	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
2000	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2001	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2002	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2003	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2004	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2005	Kordoba	Alana	Calgary	Kordoba	Alana	Akcent

## Pokračování – Přehled odrůd pěstovaných v dlouhodobých pokusech

Rok	Humpolec a Suchdol			Hněvčeves		
	Brambory	Pšenice	Ječmen	Brambory	Pšenice	Ječmen
2006	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2007	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2008	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2009	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2010	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2011	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2012	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2013	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2014	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2015	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2016	Ditta	RGT Reform	Xanadu	Ditta	RGT Reform	Xanadu
2017	Antonia	RGT Reform	Xanadu	Antonia	RGT Reform	Xanadu
2018	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2019	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2020	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin

Organickými hnojivy je hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto je u brambor sledováno přímé působení aplikace organických hnojiv, u ozimé pšenice a jarního ječmene působení následné. Dávky fosforu v hnojivech u jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce č. 7. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Trója. Živiny z průmyslových hnojiv jsou dodávány v LAV (27,5 %), trojitým superfosfátu (21 % P) a draselné soli (50 % K).

Celý systém byl založen na jednotné dávce dusíku tak, aby celková dávka N za 3 roky (brambory + pšenice ozimá + ječmen jarní) činila 330 kg N/ha. To platí pro organická i minerální hnojiva, popřípadě jejich kombinaci.

**Tabulka 7: Průměrné dávky aplikovaných živin v kg/ha v rámci osevního postupu**

Varianta	Brambory	Ozimá pšenice	Jarní ječmen
kontrola	0	0	0
kal 1	330 kg N; 240 kg P	0	0
hnůj 1	330 kg N; 70 kg P	0	0
NPK <sup>1)</sup>	120 kg N 30 kg P 100 kg K	140 kg N 30 kg P 100 kg K	70 kg N 30 kg P 100 kg K

<sup>1)</sup> Ve variantě NPK byly všechny živiny dodány v minerální formě

Odběr vzorků je prováděn každoročně. Na podzim po sklizni obilnin a brambor byl vždy proveden odběr ornice (0-30 cm). Ta byla usušena a přeseita přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu) a půdy odebrané po sklizni pšenice ozimé z každého ukončeného cyklu osevního postupu, tj. z let 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017, 2020.

## **4.1 Analytická stanovení**

### **4.1.1 Extrakce fosforu demineralizovanou vodou**

Extrakt byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). Ke 2 g vzorku bylo doplněno 20 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 2 hodiny a následně odstředěny při 9500 otáčkách za minutu. Vzniklé extrakt byly analyzovány na obsah fosforu optickým emisním spektrometrem s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

### **4.1.2 Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3**

Ke stanovení obsahu přístupného fosforu byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (0,2 mol/l),  $\text{NH}_4\text{F}$  ( $c=0,015$  mol/l),  $\text{HNO}_3$  ( $c=0,013$  mol/l),  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ( $c=0,25$  mol/l) a EDTA ( $c=0,001$  mol/l). Poměr zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (10g zeminy, 100 ml vyluhovadla). Třepání na třepáče VWR®Advanced 15000 Orbital Shaker probíhalo po dobu 10 min. Získaný roztok byl filtrován (filtrační papíry č. 388). Pro vyloučení chyby měření byly extrakt zhotoveny ve dvou opakováních. Obsahy fosforu v extraktech byly měřeny ICP OES.

### **4.1.3 Hodnocení výnosů ozimé pšenice**

Po každé sklizni pokusů jsou vždy zaznamenány hektarové výnosy pěstovaných plodin. Pro účely této práce byl u sledovaných variant hodnocen vývoj výnosů pšenice ozimé od roku 1996 do roku 2020.

### **4.1.4 Obsah fosforu v zrně a slámě pšenice a jeho odběr**

Na všech stanovištích byly každoročně monitorovány výnosy zrna pšenice ozimé. Po sklizni byl vždy měřen obsah P v zrně ozimé pšenice a ve slámě. Analýza byla provedena prostřednictvím suchého rozkladu. Na základě obsahu P v rostlinách a výnosu byl vypočten odběr P sklizní. Porovnáním vstupů P (vypočteno z výsledků rozborů analyzovaných hnojiv) a odběru P bylo možno vypočítat jednoduchou bilanci fosforu.

## **4.2 Statistické vyhodnocení**

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky, časové řady a výpočty bilancí fosforu v programu Microsoft Excel (Excel 2019).

## 5 Výsledky

Tato část diplomové práce je zaměřena na hodnocení výsledků z rozborů půd dosažených výzkumem dlouhodobého stacionárního experimentu, který je zaměřený na dlouhodobé ošetření různými systémy hnojení v 3honném osevním sledu (pšenice-ječmen-brambory). Výsledky obsahu okamžitě přístupného fosforu byly stanoveny metodou vodného výluhu ( $P_{H_2O}$ ), pro vyjádření přístupného fosforu pro rostliny a metodou Mehlich 3 (PM3) pro potencionálně přístupný fosfor rostlinami. Dále je v této kapitole hodnocení výsledků výnosů zrna a slámy u ozimé pšenice a odběr fosforu zrnem a slámou. Dále byla vypočtena jednoduchá bilance fosforu na základě vstupů P hnojivy a výstupů prostřednictvím odběrů fosforu zrnem a slámou.

### 5.1 Výsledky rozborů půd

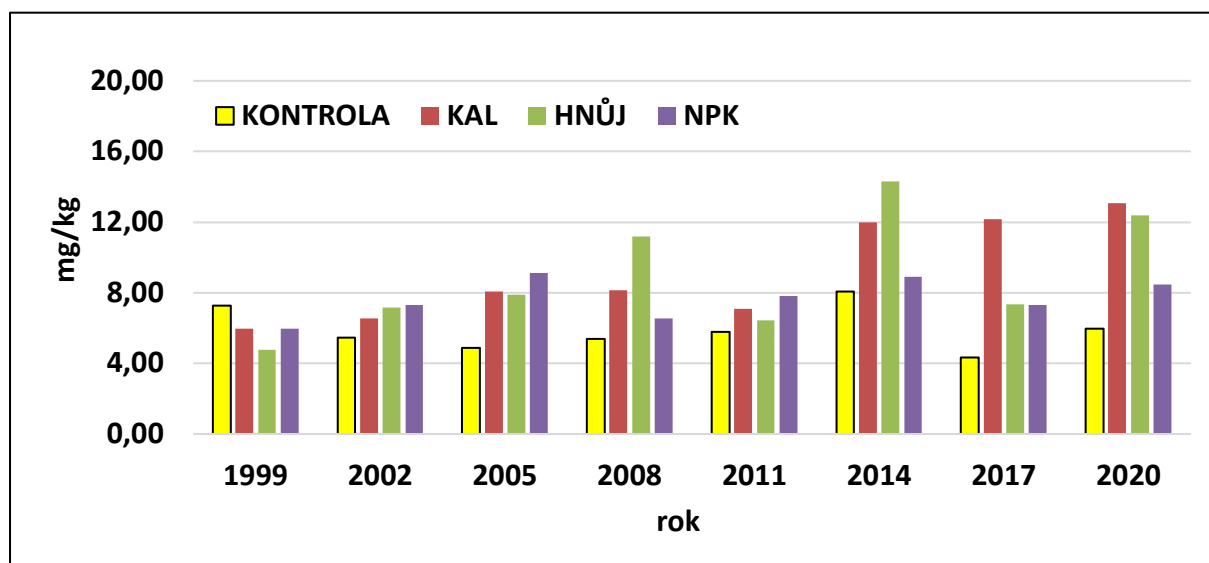
V následující kapitole jsou interpretovány výsledky obsahů okamžitě přístupného fosforu v půdě metodou vodného výluhu a obsah potencionálně přístupného fosforu metodou Mehlich 3.

#### 5.1.1 Obsah okamžitě přístupného fosforu v půdě

V grafu č. 1 pozorujeme ve sloupcích hodnoty obsahu okamžitého přístupného fosforu v půdě metodou vodného výluhu na stanovišti v Humpolci, kde před založením pokusu (1996) byly naměřeny průměrné hodnoty  $P_{H_2O}$  5,68 ( $\pm$  1,55) mg/kg. Půdním druhem a typem zde byla hlinito-písčítá kambizem.

Dlouhodobě nehnojená kontrola v celém sledovaném období v Humpolci vykazuje nejnižší hodnoty přístupného fosforu v půdě. Pouze po ukončení prvního pěstebního sledu od založení pokusu (1999), kontrola vykazuje vyšší hodnoty přístupného fosforu než ostatní varianty. V průběhu sledovaného období změn přístupného fosforu v půdě byly zaznamenány 3 za sebou jdoucí ukončené pěstební sledy (1999; 2002; 2005), kde hnojení minerálním hnojivem NPK vykazovalo nejvyšší hodnoty  $P_{H_2O}$  (5,98 - 9,12 mg/kg) oproti hnojení organickými hnojivy. Tento efekt se projevil také v roce 2011. Aplikace organických hnojiv v ostatních letech (2008; 2014; 2017 a 2020) významně zvýšila obsah okamžitě přístupného fosforu v půdě, přičemž aplikace hnoje zvyšovala jeho obsah nejvíce. Po aplikaci hnoje došlo v celém sledovacím období, vyjma roku 1999, k navýšení přístupného fosforu oproti nehnojené kontrole. Nejvyšší obsahy  $P_{H_2O}$  byly naměřeny v roce 2014 a to 14,3 mg/kg oproti kontrole (8,08 mg/kg). Stejný efekt se také projevil v roce 2008, kde koncentrace  $P_{H_2O}$  v půdě byla 11,20 mg/kg oproti kontrole s nejnižším obsahem  $P_{H_2O}$  v půdě, 5,40 mg/kg. Podobně se obsah přijatelného fosforu v půdě choval po aplikaci čistírenského kalu. Pozitivní efekt čistírenského kalu kopíroval pozitivní vliv aplikace hnoje na stanovišti. V letech 2017 a 2020 byly po aplikaci kalu naměřeny nejvyšší hodnoty oproti všem sledovaným variantám ošetření. Aplikace kalů v roce 2017, takřka dvojnásobně zvýšila obsah  $P_{H_2O}$  oproti aplikaci hnoje a NPK. O 3 roky později v roce 2020, obsah  $P_{H_2O}$  v půdě, po aplikaci kalů, vykazoval stále nejvyšší koncentraci (13,08 mg/kg), podobně tak i aplikace hnoje (12,4 mg/kg) oproti aplikaci NPK (8,46 mg/kg) a nehnojené kontrole (5,97 mg/kg).

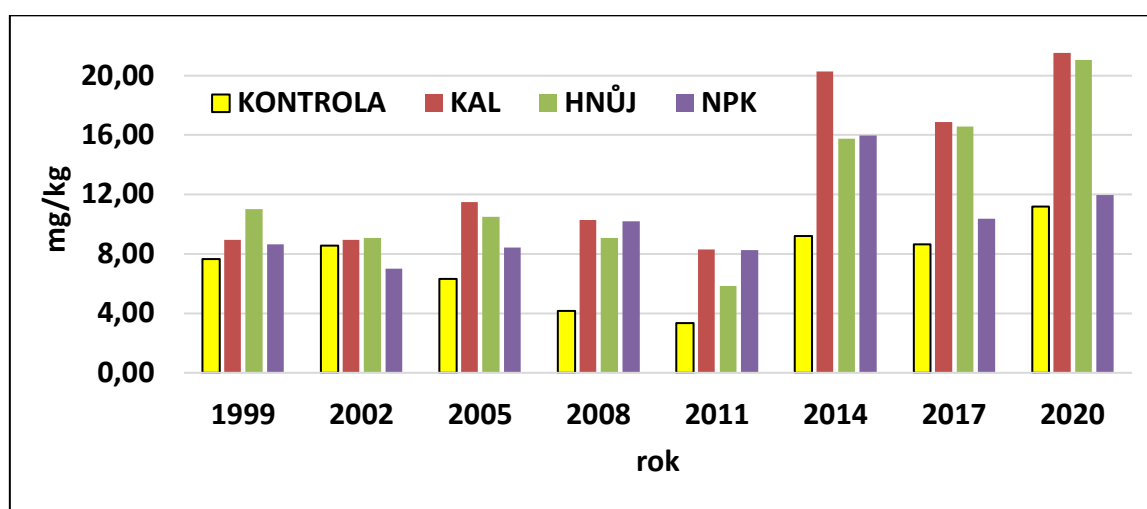
**Graf 1: Obsah okamžitě přístupného fosforu ( $P_{H_2O}$ ) v půdě při různých systémech hnojení na stanovišti Humpolec (1999-2020)**



V grafu č. 2 jsou zaznamenány hodnoty obsahu okamžitého přístupného fosforu v půdě metodou vodného výluhu na stanovišti v Hněvčevsi, kde před založením pokusu (1996) byly naměřeny hodnoty od 6,05 mg/kg do 11,10 mg/kg  $P_{H_2O}$ . Půdní typ a půdní druh zde byla hnědozem, jílovito-hlinitá

Nejnižší obsah  $P_{H_2O}$  bylo naměřeno na stanovištích bez aplikace minerálních a organických hnojiv, tj. nehnojené kontrole, a to v celém sledovaném období, vyjma ročníku 2002, kdy obsah  $P_{H_2O}$  v půdě byl takřka srovnatelný i po aplikaci hnojiv. Aplikace minerálního hnojiva NPK poměrně zvýšila obsah okamžitě přístupného fosforu v letech 2008 (10,2 mg/kg) a 2011 (8,26 mg/kg) oproti nehnojené kontrole (4,18 mg/kg 2008 a 3,33 mg/kg 2011). Nejnižší koncentrace  $P_{H_2O}$  v půdě po stejném ošetření byla naměřena v roce 2002 oproti všem ostatním variantám ošetření. Naopak nejvyšší obsah  $P_{H_2O}$  bylo zaznamenáno v roce 2014, který nepatrně převyšuje obsah  $P_{H_2O}$  po aplikaci hnoje. Organická hnojiva, tj. hnůj a čistírenské kaly obecně významně zvýšila obsah okamžitě přijatelného fosforu pro rostliny. Hnůj v půdě významně zvýšil obsah  $P_{H_2O}$  v porovnání s aplikací NPK v letech 1999, 2002, 2005, 2017 a téměř dvojnásobně zvýšil obsah v roce 2020. Taktéž i čistírenský kal vykazoval vyšší hodnoty oproti NPK. Nejvyšší hodnoty okamžitě přístupného fosforu v půdě byly na stanovišti Hněvčevs naměřeny v půdách po aplikaci čistírenského kalu, a to beze změny od roku 2005 až do roku 2020, avšak zcela nejvyšší koncentrace byly naměřeny v roce 2014 (20,2 mg/kg) a v roce 2020 (21,5 mg/kg). V těchto letech měla na obsah  $P_{H_2O}$  v půdě významný pozitivní vliv také aplikace hnoje v porovnání s nehnojenou kontrolou a NPK.

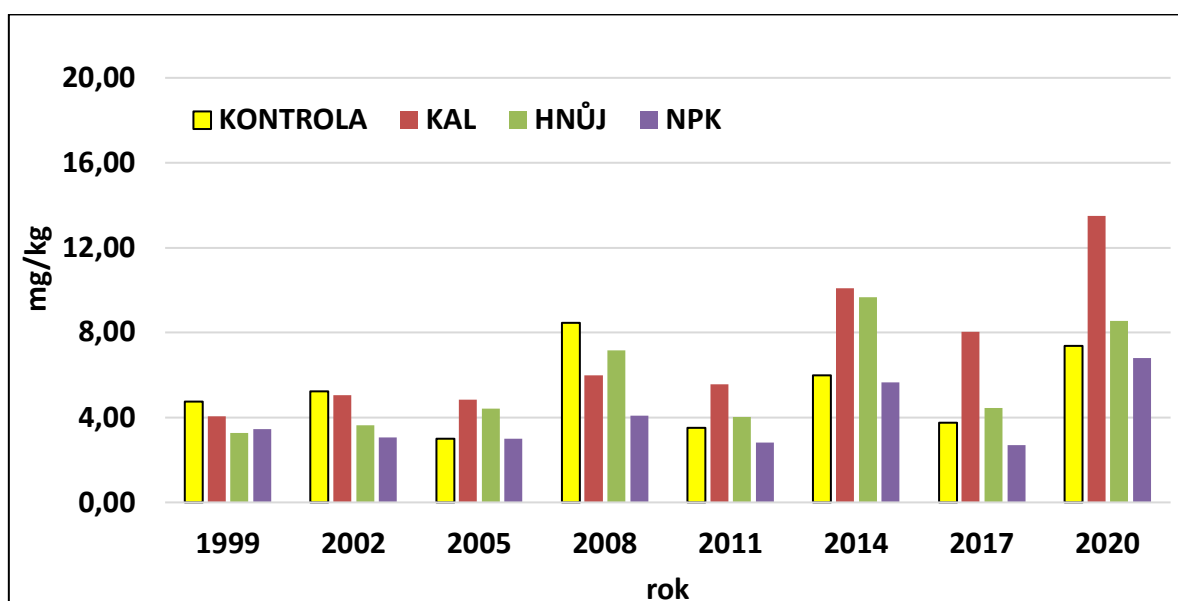
**Graf 2: Obsah okamžitě přístupného fosforu ( $P_{H2O}$ ) v půdě na stanovišti Hněvčeves**



Graf č. 3 vyjadřuje obsahy  $P_{H2O}$  na stanovišti Suchdol ve sledovaném období od roku 1999 až 2020. Před založením dlouhodobého pokusu byly na stanovišti naměřeny průměrné hodnoty  $P_{H2O}$  od 2,45 mg/kg do 6,32 mg/kg. Stanoviště Suchdol disponuje hlinitou černozemí.

Nehnojená kontrola nebyla ve všech letech chudá na obsah  $P_{H2O}$  jako na stanovišti Humpolec a Hněvčeves. Na stanovišti v Suchdolu byl obsah  $P_{H2O}$  nejvyšší v letech 1999, 2002, 2008. Po minerálním hnojení NPK dokonce nedošlo k navýšení koncentrace  $P_{H2O}$  v porovnání s nehnojenou kontrolou v celém sledovaném období. V roce 2008 byla zaznamenána dvojnásobně nižší koncentrace  $P_{H2O}$  v půdě po aplikaci NPK než u nehnojené kontroly. Toto se bezmála opakovalo i v roce 2002. Naopak nejvyšší hodnoty okamžitě přístupného fosforu v půdě byly zaznamenány po aplikaci organických hnojiv, zejména v roce 2005, 2014, 2017 a 2020. Hněj podle těchto výsledků patří mezi hnojiva významně zvyšující obsah  $P_{H2O}$  v půdě oproti NPK a kontrole. Obsah  $P_{H2O}$  v půdě byl však nejvíce ovlivněn zapravením čistírenských kalů, tento jev se opakoval celkem 5x (2005, 2011, 2014, 2017 a 2020).

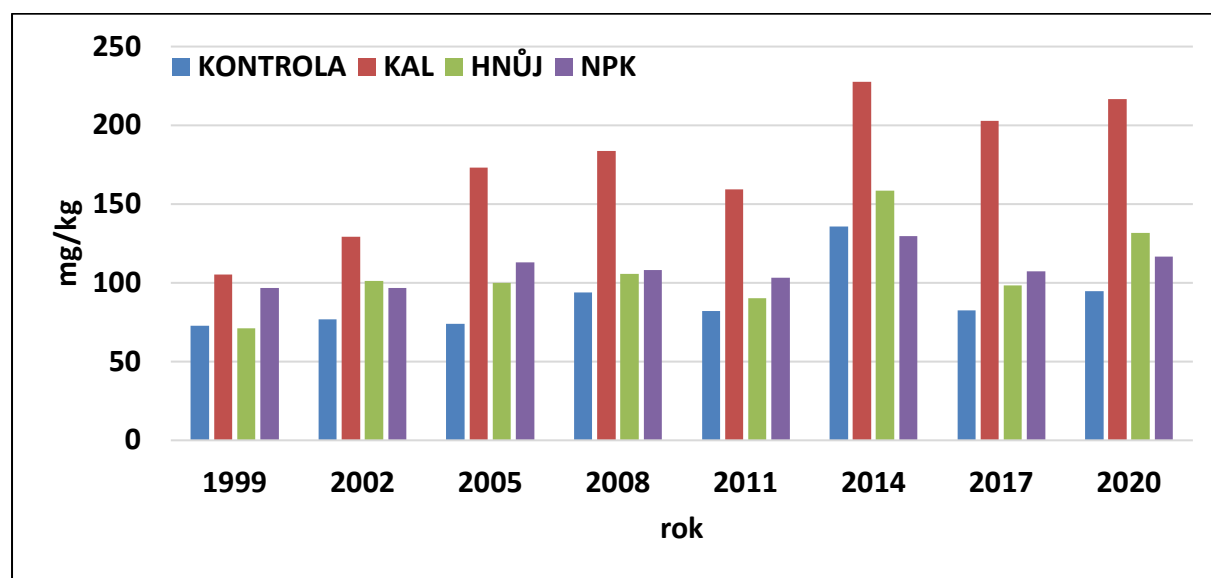
**Graf 3: Obsah okamžitě přístupného fosforu ( $P_{H2O}$ ) v půdě na stanovišti Suchdol**



### 5.1.2 Obsah potencionálně přístupného fosforu v půdě

V grafu č. 4 jsou ve sloupcích znázorněny hodnoty obsahu potencionálně přístupného fosforu v půdě v Humpolci, stanovené metodou Mehlich 3 ( $P_{M3}$ ). Před založením pokusu v roce 1996 byly naměřeny hodnoty v rozmezí od 60 mg/kg do 89 mg/kg P. Obsah P v půdě na nehnojené kontrole byl vždy nižší než po aplikaci organických a minerálních hnojiv, kromě roku 2014, kdy hnojení NPK nepomohlo k navýšení  $P_{M3}$ . V průběhu sledování byl obsah  $P_{M3}$  na kontrole v rozsahu od 82 mg/kg do 136 mg/kg. Hnojení minerálními hnojivy NPK zvyšovalo obsah  $P_{M3}$  oproti nehnojené kontrole (v průměru o 20 mg/kg), avšak nejméně v porovnání s čistírenskými kaly a v některých letech i s hnojem. V letech 1999, 2005, 2008, 2011 a 2017 byly zaznamenány dokonce vyšší obsahy  $P_{M3}$  po hnojení NPK ve srovnání s hnojením hnojem (v průměru o 10 mg/kg). Čistírenský kal významně pozitivně ovlivňoval obsah  $P_{M3}$  v porovnání s ostatními variantami. Po jeho působení v půdě lze do roku 2008 pozorovat postupný nárůst potencionálně přístupného obsahu fosforu v půdě a v následujících letech s drobnou kolísavou tendencí. Čistírenský kal v půdě často o více než 1/3 zvyšoval obsah  $P_{M3}$  oproti hnoji a bezmála o 1/2 zvyšoval  $P_{M3}$  oproti NPK, konkrétně v letech 2014, 2017 a 2020. Zatímco obsahy  $P_{M3}$  po aplikaci NPK byly naměřeny v rozsahu 97-130 mg/kg, po aplikaci hnoje v rozsahu 71-158 mg/kg, tak po aplikaci čistírenských kalů byly naměřeny hodnoty v rozsahu od 105 do 228 mg/kg, což je v porovnání s ostatními variantami nejvyšší obsah potencionálně přístupného fosforu.

Graf 4: Obsah potenciálně přístupného fosforu ( $P_{M3}$ ) v půdě na stanovišti Humpolec



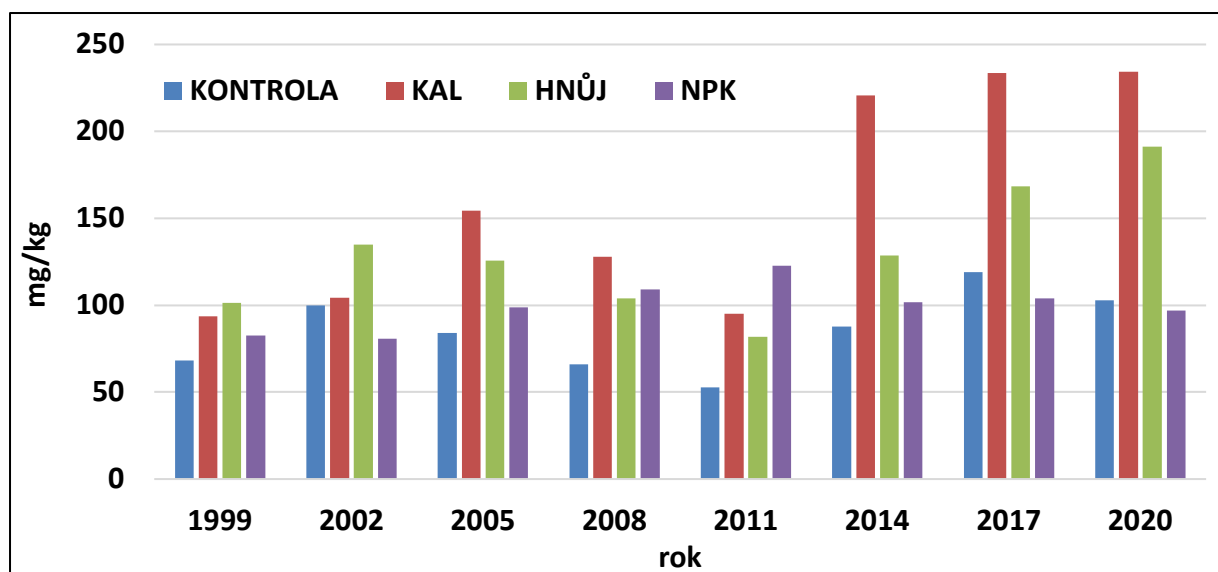
V grafu č. 5 jsou znázorněny hodnoty obsahu potencionálně přístupného fosforu v půdě na stanovišti v Hněvčevsi, kde byla před založením pokusu v roce 1996 naměřena zásoba od 70 mg/kg do 105 mg/kg  $P_{M3}$ .

Na stanovišti v Hněvčevsi nejpříznivěji působila organická hnojiva, zejména čistírenské kaly. Jednorázová dávka P v kalech činila 240 kg za celý sled plodin a nejvíce zvýšila obsah  $P_{M3}$  v půdě, což bylo celkem 5x potvrzeno z 8 let sledování. K významně nejvyššímu nárůstu však došlo v letech 2014, 2017 a 2020, kdy hnojení kaly zvýšilo obsah  $P_{M3}$  v půdě o více než 1/2 (v průměru o 129 mg/kg) oproti hnojení NPK. K nepatrnému pozitivnímu efektu hnojení



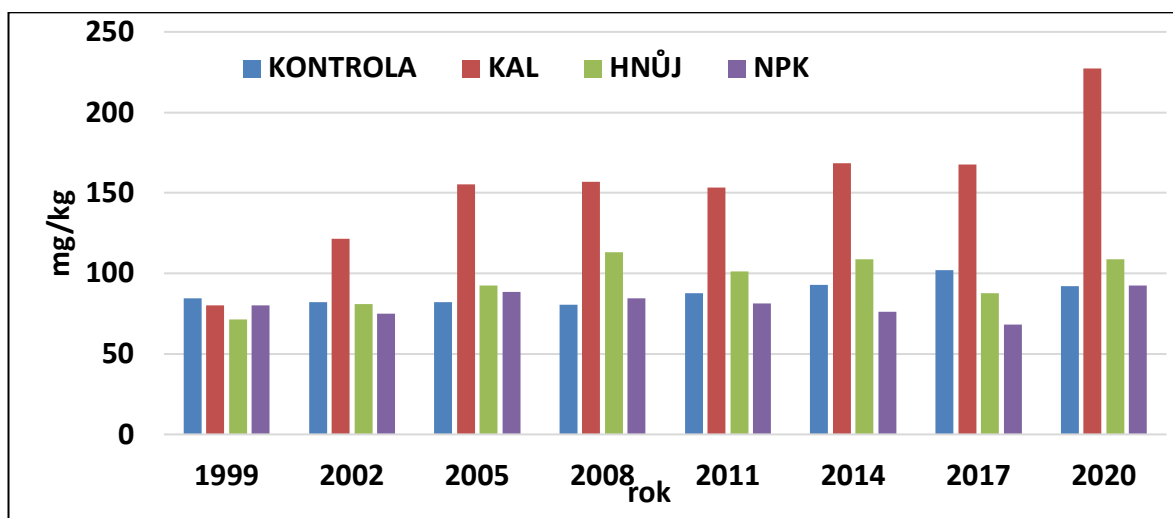
minerálním NPK došlo pouze v roce 2008 v porovnání s hnojením hnojem a v roce 2011 v porovnání s hnojem a s čistírenskými kaly. Hnojení hnojem významně zvýšilo obsah  $P_{M3}$  v půdě, a to nejvíce v letech 1999 a 2002 v porovnání s ostatními variantami. V roce 1999 poskytl hnůj nejvyšší nárůst  $P_{M3}$  v půdě o 33 mg/kg a v roce 2002 o 35 mg/kg ve srovnání s nehnojenou kontrolou. Nejvíce však hnůj zvýšil obsah  $P_{M3}$  v půdě v roce 2020, a to až o 88 mg/kg ve srovnání s kontrolní variantou. Tento pozitivní efekt se opakoval v roce 2014 a 2017. Nehnojená kontrolní varianta vykazovala nejnižší obsahy  $P_{M3}$  v půdě, kromě roku 2002, 2017 a 2020, kdy nejnižší hodnoty byly zaznamenány po aplikaci minerálního NPK.

**Graf 5: Obsah potenciálně přístupného fosforu ( $P_{M3}$ ) v půdě na stanovišti Hněvčeves**



V grafu č. 6 jsou znázorněny hodnoty obsahu potencionálně přístupného fosforu v půdě na stanovišti v Suchdole, kde v roce založení pokusu (1996) byly naměřeny zásoby  $P_{M3}$  v půdě v rozmezí od 59 mg/kg do 86 mg/kg. Nejnižší naměřené hodnoty obsahu  $P_{M3}$  v půdě se dostavily po aplikaci granulovaného minerálního NPK, který je v průběhu 3 honného osevního sledu ke každé plodině aplikován po 30 kg P v celkové dávce 90 kg P. Graf č. 6 v 6-ti případech ukazuje nižší obsah  $P_{M3}$  v půdě, než je nehnojená kontrolní varianta, současně jsou to nejnižší naměřené hodnoty z celého stanoviště v Suchdolu. Vyšší obsahy  $P_{M3}$  v půdě byly zaznamenány po aplikaci hnoje, kromě roků 1999 a 2017, hnůj vždy zvýšil obsah  $P_{M3}$  v půdě v porovnání s nehnojenou kontrolou, nejvíce však v roce 2008 a to o 33 mg/kg. Jednoznačně nejvýznamnější vliv na obsah  $P_{M3}$  v půdě ze sledovaných hnojiv měla aplikace čistírenských kalů, které svým vysokým přísunem P zvýšily obsah  $P_{M3}$  v půdě v celém sledovaném období. K tomuto efektu nedošlo vůbec pouze v roce 1999. Obsah  $P_{M3}$  v půdě po aplikaci čistírenských kalů se pohyboval v rozmezí 121-168 mg/kg v porovnání s nehnojenou kontrolou, tj. 82-102 mg/kg. Po aplikaci čistírenských kalů byla v roce 2020 naměřena nejvyšší hodnota, která dosahovala 227 mg/kg. Čistírenské kaly spolu hnojem obecně významně zvýšily obsah  $P_{M3}$  v půdě na stanovišti Suchdol.

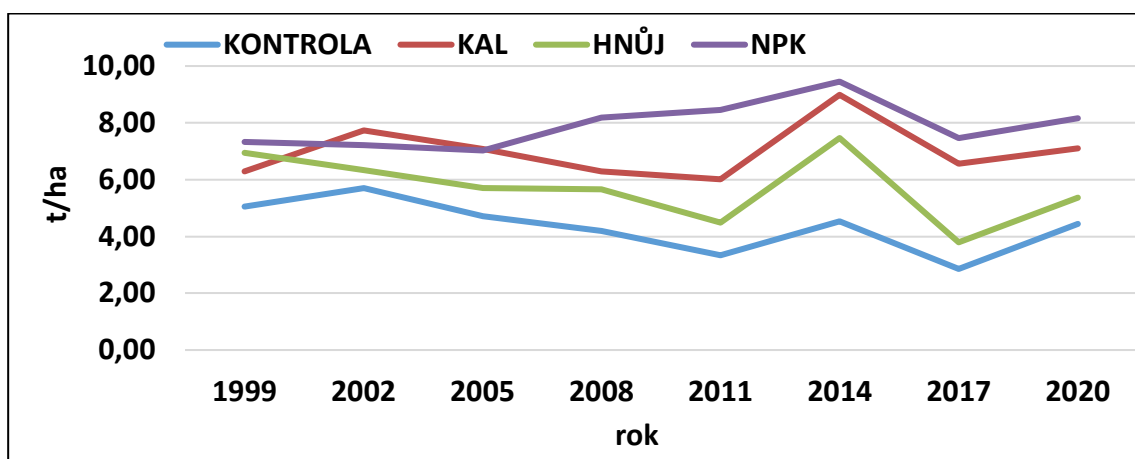
**Graf 6: Obsah potenciálně přístupného fosforu ( $P_{M3}$ ) v půdě na stanovišti Suchdol**



## 5.2 Výnosy zrna a slámy

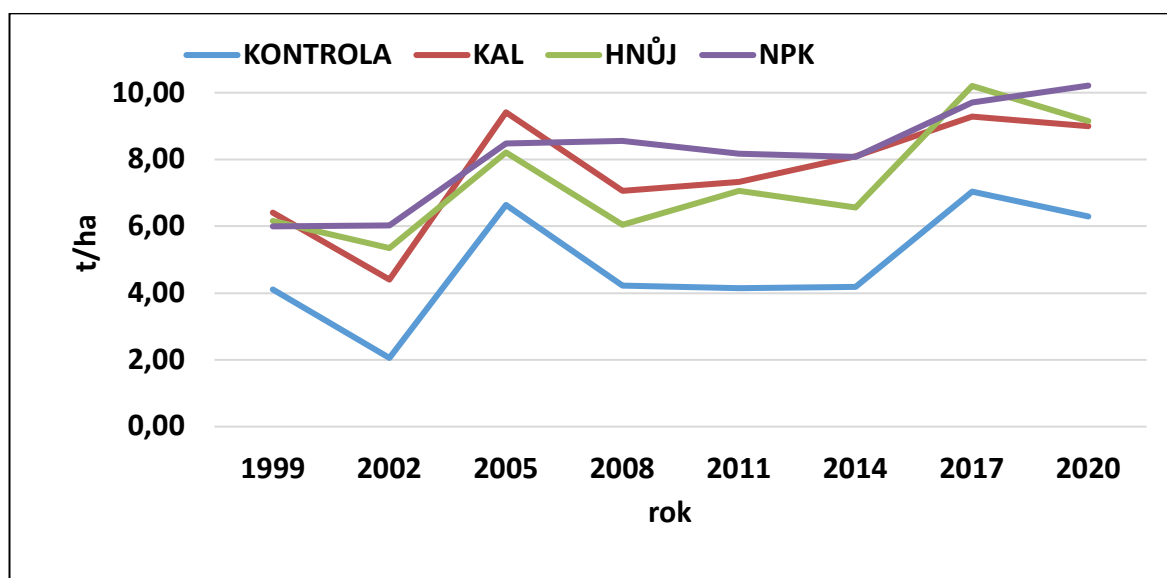
V následujícím grafu (graf č. 7) jsou zobrazeny celkové výnosy zrna pšenice ozimé pěstované v různých systémech hnojení ve sledovaném období 1999-2020 na stanovišti Humpolec. Z grafu je patrné, že výnosy na kontrolní nehnojené variantě jsou vždy nižší než u ostatních variant. Nejvyšší výnosy zrna pšenice byly sklizeny na variantě po aplikaci minerálního NPK v celém sledovaném období, vyjma ročníku 2002, kdy hnojení čistírenského kalu zvýšilo výnos o 0,6 t/ha oproti NPK. Aplikace NPK měla nevyšší vliv na výnos zejména v letech 2008, 2011 a 2014, kdy rozdíl výnosu tvořil v průměru 8,69 t/ha oproti nehnojené kontrolní variantě. Po aplikaci hnoje byl naměřen nejnižší výnos zrna v celém sledovaném období 3,79-6,94 t/ha. Aplikace čistírenských kalů významně zlepšila výnosovou tvorbu v celém sledovaném období, kdy rozmezí činilo 6,01-7,73 t/ha. Pro porovnání aplikace NPK vykazovala výnos zrna v rozsahu 7,03-9,45 t/ha, což je ze všech použitých hnojiv nejvíce. Ročník 2014 vykazoval u všech variant hnojení ojedinělé a výrazné zvýšení výnosů zrna, pravděpodobně díky příznivému průběhu počasí. Velký podíl na rozmanitosti výnosů měl patrně vliv povětrnostních podmínek, především množství srážek, během jednotlivých pokusů.

**Graf 7: Výnos zrna pšenice ozimé na stanovišti Humpolec**



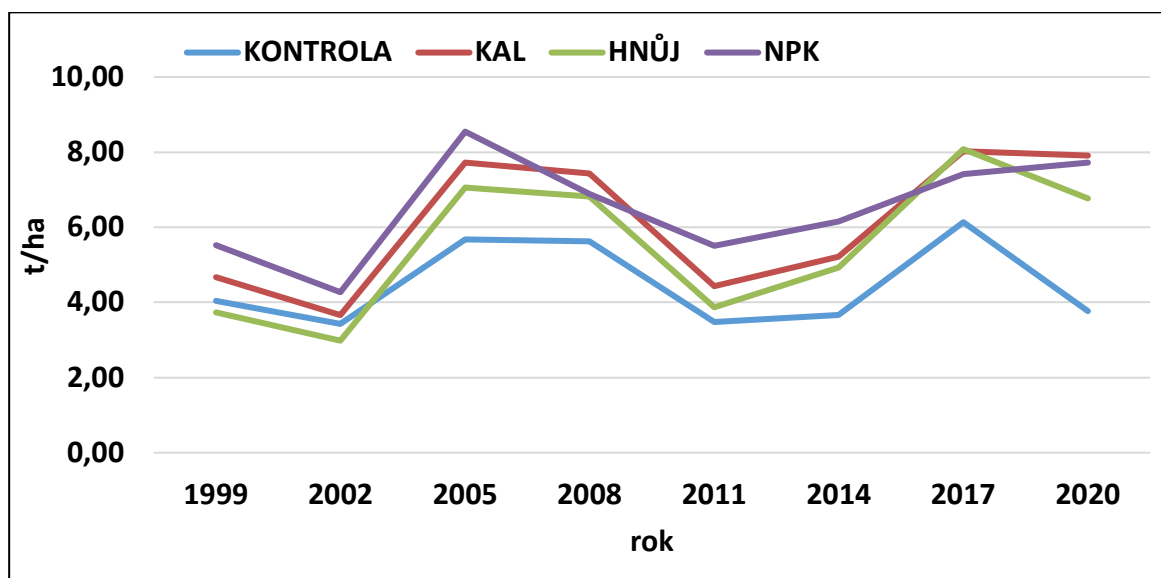
Graf č. 8 zobrazuje vliv různých systémů hnojení na celkový výnos zrna pšenice ozimé v letech 1999-2020 na stanovišti Hněvčeves. Z grafu vyplývá, že výnosy na kontrolní nehnojené variantě jsou rovněž vždy nižší než u ostatních variant. Z grafu je dále patrné, že největší výnos zrna po aplikaci čistírenského kalu (9,42 t/ha) byl dosažen v roce 2005. Tento rok byl mimo jiné velmi příznivý na výnos zrna pšenice u všech variant. Stabilně nejvyšších výnosů zrna bylo dosahováno nejčastěji po aplikaci NPK. Absolutně nejvyšší naměřená hodnota výnosu zrna však byla zaznamenána v roce 2017 u odrůdy RGT Reform při hnojení hnojem (10,2 t/ha), což je v porovnání s nehnojenou kontrolou o přesně o 3 t/ha více. V celém sledovaném období, kromě roku 2005 a 2017 je patrné, že nejvyšší výnosy zrna pšenice opět poskytly rostliny pěstované v půdách po aplikaci minerálního NPK. Vyšší výnosy také poskytly půdy vyhnojené čistírenskými kaly a nejmenší vliv z použitých hnojiv měla aplikace hnoje. Variabilitu výsledků opět ovlivnily povětrnostní podmínky a různé odrůdy pšenice.

**Graf 8: Výnos zrna pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves**



V následujícím grafu (graf č. 9) jsou znázorněny celkové výnosy zrna z různých variant hnojení mezi roky 1999-2020 na stanovišti Suchdol. Z grafu je zřejmé, že výnosy na kontrolní nehnojené variantě jsou téměř vždy nižší než u ostatních variant, s výjimkou roku 2002, kdy byl nejnižší výnos zaznamenán u hnojení hnojem (2,98 t/ha). Nejvyšší výnos byl zaznamenán v roce 2005 u odrůdy Alana při hnojení NPK. Celkově nejvyšších hodnot u výnosů bylo dosahováno opět většinou při hnojení NPK, kromě roku 2008, kdy převyšovalo hnojení kaly a v roce 2017, kdy jej převyšovalo opět hnojení kaly a hnojem. Graf dále znázorňuje ve většině sledovaných let patrnou dominanci výnosů na půdách hnojených NPK. Podobné výnosy zrna také poskytovaly rostliny na půdách hnojených čistírenskými kaly. Podobný efekt poskytovaly půdy hnojené hnojem v porovnání s nehnojenou kontrolní variantou. Variabilitu výsledků ovlivňují rovněž podmínky jako u předchozích stanovišť, tj. vliv počasí a použité odrůdy pšenice.

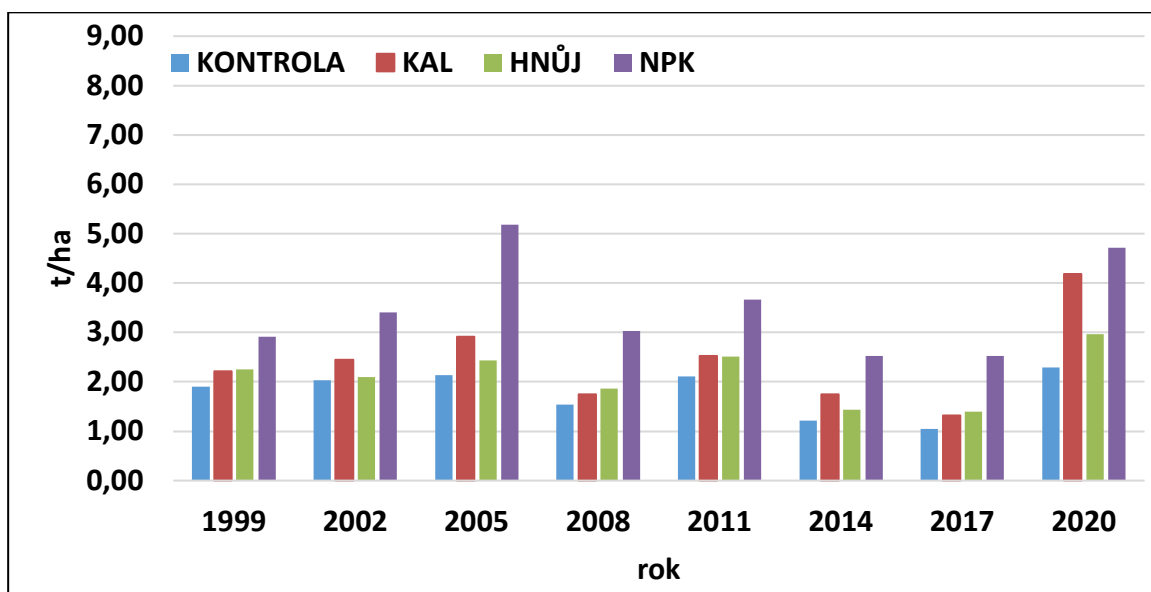
**Graf 9: Výnos zrna pšenice ozimé na stanovišti Suchdol**



Při porovnání grafů č. 7, č. 8 a č. 9 lze shrnout, že nejvyšších výnosů zrna pšenice ozimé bylo vždy dosahováno hnojením minerálním hnojivem NPK. Na stanovišti Humpolec byl nejvyšší výnos zaznamenán v roce 2014 u odrůdy Alana při hnojení NPK, na stanovišti Hněvčeves byl nejvyšší výnos v roce 2017 s odrůdou RGT Reform při hnojení kaly a na stanovišti v Suchdole byl nejvyšší výnos zaznamenán v roce 2005 u odrůdy Alana, a to opět při hnojení NPK. Na variantách, které od založení pokusu nebyly nikdy hnojené se prokazatelně vyskytují nejnižší výnosy zrna.

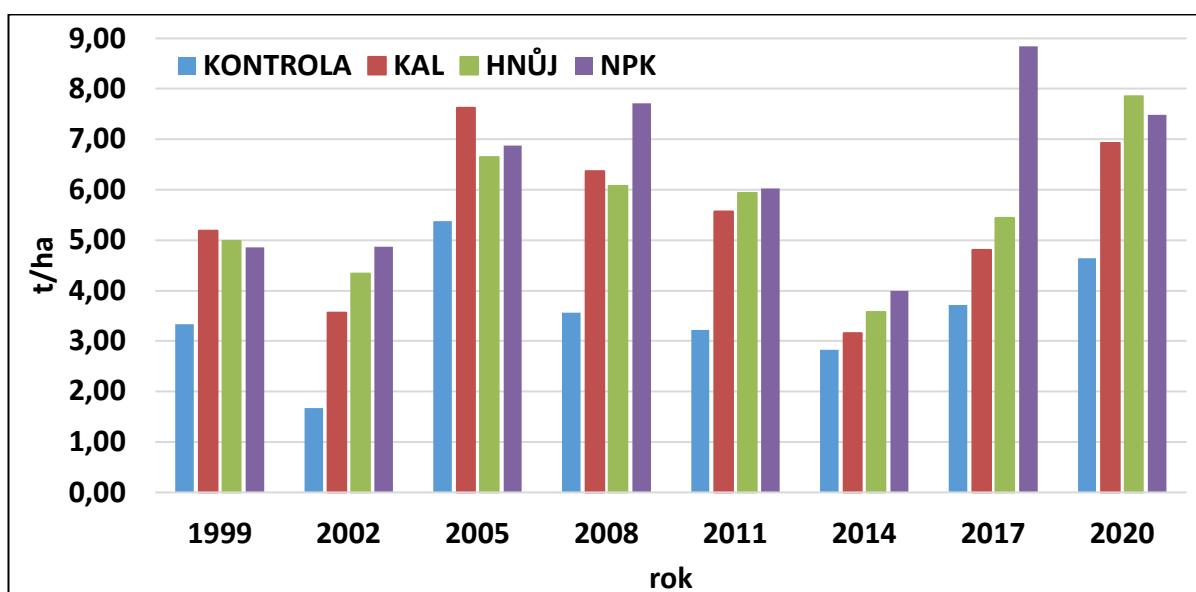
V grafu 10 jsou znázorněny výnosy slámy v určitých letech od roku 1999 do roku 2020 na stanovišti Humpolec. V grafu lze pozorovat kolísavý trend jednotlivých hodnot. Nejvyšších hodnot výnosů slámy bylo dosahováno při hnojení NPK, zejména v letech 2005 s výnosem 5,18 t/ha a v roce 2020 s výnosem 4,72 t/ha. Naopak nejnižší hodnoty výnosů slámy při hnojení NPK byly zaznamenány v roce 2014 (u odrůdy Alana s hodnotou 2,52 t/ha) a v roce 2017 (u odrůdy RGT Reform s hodnotou 2,53 t/ha). Aplikace organických hnojiv také zvyšovaly výnos slámy oproti nehnojené kontrolní variantě. Z organických hnojiv měl čistírenský kal největší vliv na výnos slámy až 4 t/ha v roce 2020, což je o 2 t/ha více než kontrolní varianta. Aplikace čistírenských kalů měla opakovaně vyšší výnosy slámy oproti hnoji. Výkyvy výnosů byly ovlivněny zpravidla změnou počasí a jednotlivými odrůdami pšenice. Nejnižší hodnoty v grafu dosahoval výnos nehnojené kontroly v roce 2017, a to 1,5 t/ha.

**Graf 10: Výnos slámy pšenice ozimé na stanovišti Humpolec**



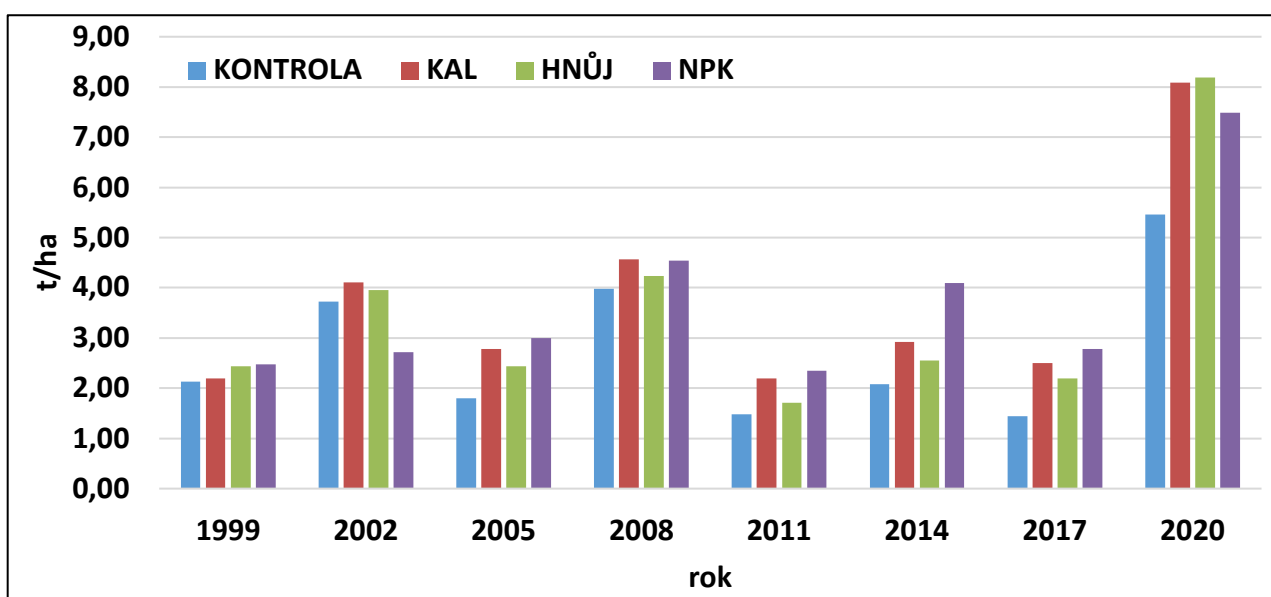
V následujícím grafu (graf č.11) jsou zobrazeny výnosy slámy mezi roky 1999-2020 na stanovišti Hněvčeves. V grafu lze pozorovat rovněž kolísavý trend jednotlivých hodnot. Nejvyšších hodnot výnosů slámy bylo dosahováno převážně u NPK, v ojedinělých případech byly nejvyšší hodnoty pozorovány po hnojení kaly (roky 1999 a 2005) a v jednom případě převládaly hodnoty u hnojení hnojem (v roce 2020). Nejvyšší naměřené výnosy slámy u variant s NPK byly 7,71 t/ha v roce 2008 a 8,85 t/ha v roce 2017 u odrůdy RGT Reform. Aplikace organických hnojiv zde opět zvýšila výnos slámy, zejména hnůj (2011-2020), kde měl nepatrně vyšší efekt než aplikace čistírenských kalů. Nejnižší výnosy lze opět pozorovat u nehnojené kontroly v celém sledovaném období a zcela nejnižší naměřený výnos tvořil 1,67 t/ha v roce 2002 u odrůdy Alana. V tomto případě lze rovněž potvrdit, že výnosy slámy jsou rovněž většinou největší při hnojení NPK.

**Graf 11: Výnos slámy pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves**



V následujícím grafu (graf č. 12) jsou zaznamenány výnosy slámy v určitých letech od roku 1999 do roku 2020 na stanovišti Suchdol. V grafu lze pozorovat rozmanitější trend, než byl pozorován u předchozích stanovišť, neboť jednotlivé typy hnojení se střídají na nejvyšších hodnotách. Aplikace minerálního NPK významně zvyšuje výnos pšeničné slámy pouze v letech 2011, 2014 a 2017 v porovnání s ostatními způsoby hnojení. V letech 1999, 2005, 2008, dosáhlo hnojení NPK výnosy srovnatelně vysoké jako po aplikaci hnoje. Nejvyšší výnos slámy byl pozorován po aplikaci organických hnojiv, přičemž rozdíly ve výnosech slámy mezi hnojivy byly nepatrné, avšak v porovnání s nehnojenou kontrolou byly vysoké. Absolutně nejvyšší výnosy byly dosaženy v roce 2020 (přes 8 t/ha). Z grafu je patrné, že v roce 2002 nehnojená kontrola dosahovala vyššího výnosu než při hnojení NPK. Tato skutečnost na předchozích stanovištích nenastala.

**Graf 12: Výnos slámy pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves**



Při porovnání grafů č. 10, č. 11 a č. 12 je patrné, že nejvyšší výnosy slámy byly dosahovány v Humpolci a Hněvčevsi převážně u NPK. V Suchdole bylo zaznamenáno zjevné kolísání v hodnotách nejvyšších výnosů slámy mezi hnojením NPK, kaly a hnojem. Obecně nejnižší výnosy v t/ha byly zaznamenány na stanovišti v Humpolci, kdy maximální hodnota dosahovala pouze 5,18 t/ha. Oproti tomu na stanovišti Hněvčeves a Suchdol dosahovaly nejvyšší výnosy slámy, a to více než 8 t/ha.

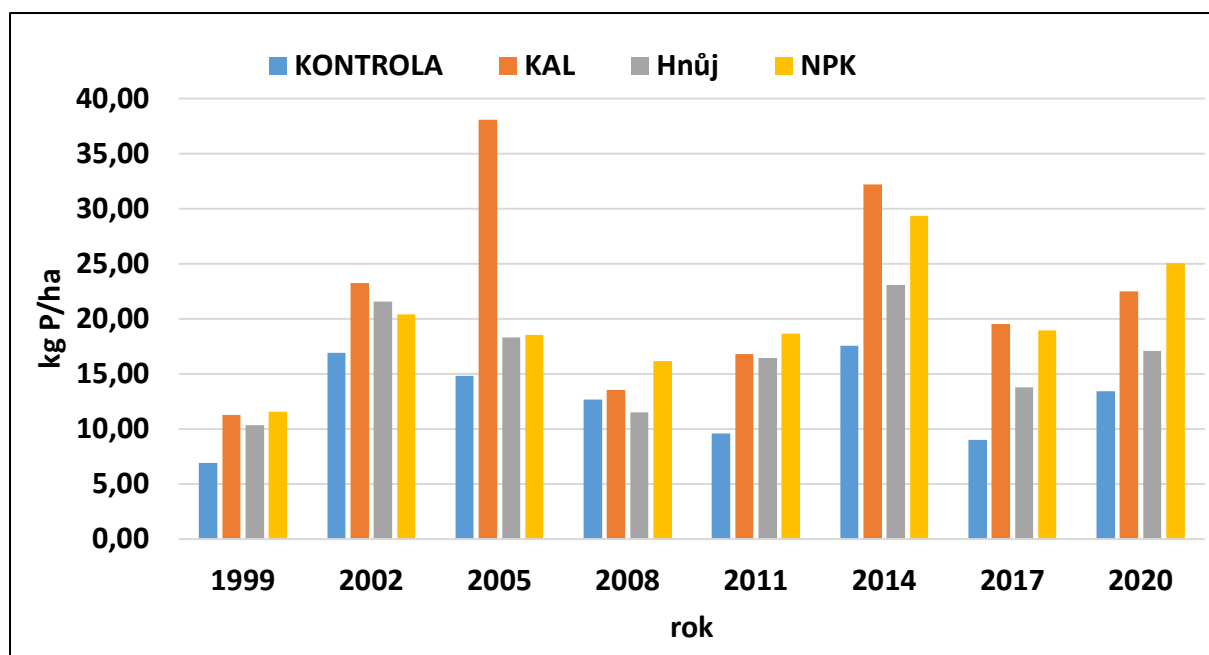
### 5.3 Odběr fosforu zrnem a slámou

V grafu č. 13 je znázorněn odběr fosforu (v kg/ha) zrnem na stanovišti Humpolec v rozmezí vybraných let od roku 1999 do roku 2020. Vždy po sklizni byl naměřen obsah P v zrně ozimé pšenice a spolu s výnosem byl využit pro výpočet odběru P.

Nejvyšší odběr fosforu byl zaznamenán při hnojení čistírenskými kaly, a to celkem v pěti případech (v průměru 25 kg P/ha), nejvíce však v roce 2005, kdy odběr P zrnem činil 38,10 kg P/ha, tj o 23,18 kg P více než nehnojená varianta. Hnojení hnojem a NPK zvýšilo v tomto roce odběr P pouze o 3 kg/ha. V ostatních letech nedocházelo k překročení hladiny

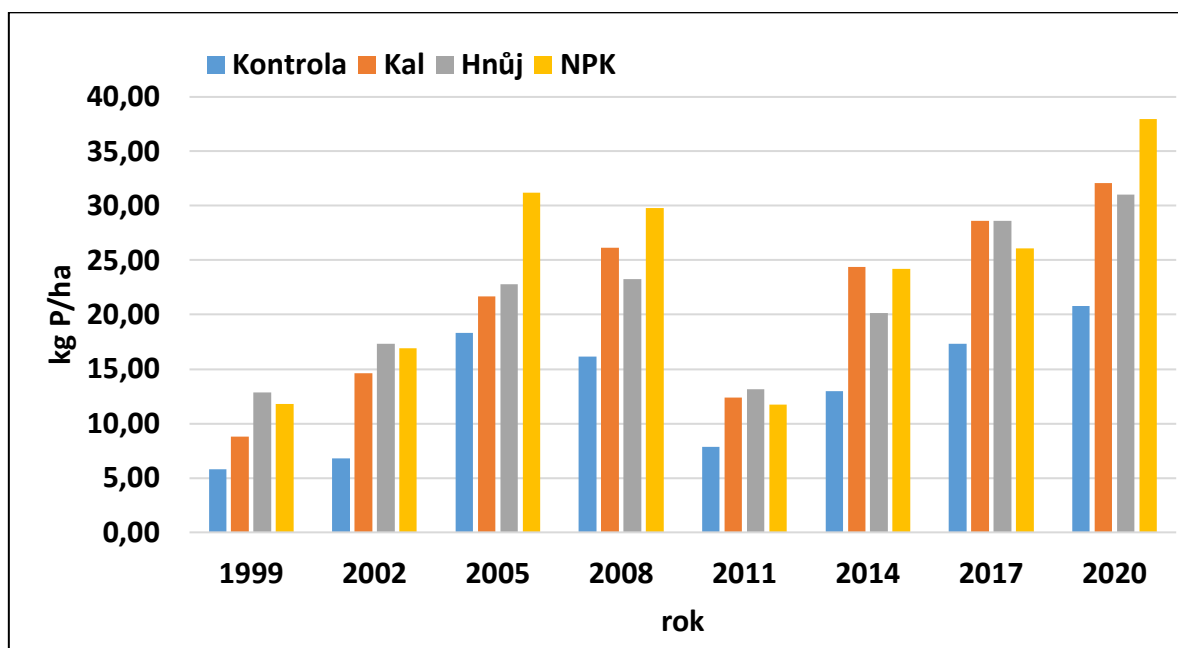
odběru P zrnem 25 kg/ha, ve většině roků ani hladiny odběru 20 kg P/ha. V letech 2008, 2011 a 2020, byly dosaženy nejvyšší hodnoty při hnojení minerálními hnojivy NPK. Varianta NPK opakovaně umožňovala rostlinám odebrat z půdy více P než nehnojená kontrola nebo po hnojení hnojem. Z grafu č. 13 je patrné, že na dlouhodobě nehnojené kontrole docházelo k nejnižšímu odběru P zrnem. Výjimka nastala pouze v roce 2008, kde na nehnojené kontrole došlo k vyššímu odběru P zrnem než u půdy hnojené hnojem. Zcela nejnižší odběr P byl u nehnojené kontrolní varianty v letech 1999 a 2017, kdy byl naměřen odběr P v průměru 7,9 kg/ha. Obecně tyto ročníky byly z hlediska odběru P zrnem slabší.

**Graf 12: Odběr fosforu zrnem pšenice ozimé na stanovišti Humpolec**



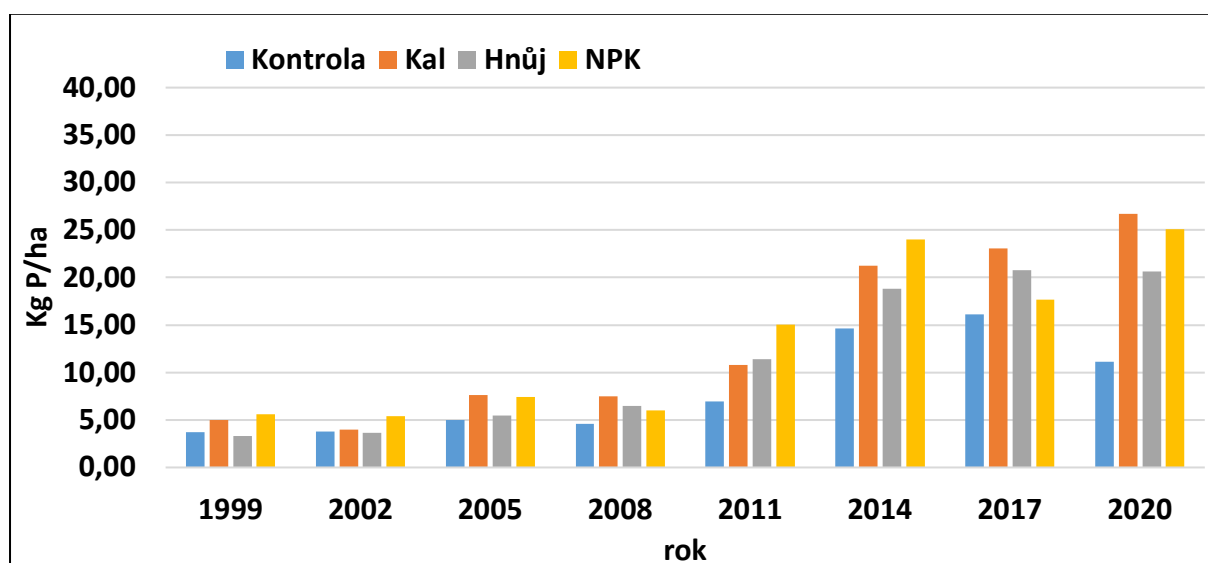
V následujícím grafu (graf č. 14) je znázorněn odběr fosforu zrnem (v kg/ha) pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves ve vybraných letech od roku 1999 do roku 2020. Na nehnojených půdách v Hněvčevsi jsou také pozorovány nejnižší odběry P zrnem pšenice, a to bez výjimky v celém sledovaném období. Aplikace organických hnojiv významně zvyšovala odběr P zrnem po celou dobu měření v porovnání s nehnojenou kontrolou. V letech 1999, 2002 a 2011 dominoval odběr P po aplikaci hnoje s tím, že čistírenské kaly kopírovaly trend zvyšování odběru P. Nejvyšší odběry fosforu byly zaznamenány po aplikaci minerálního NPK, kdy v roce 2005 byl naměřen o 13 kg P/ha vyšší odběr v porovnání s kontrolní nehnojenou variantou. Tento efekt se opakoval v roce 2008, a to o 13,8 kg P/ha a v roce 2020 dokonce o 17,18 kg P/ha. Zároveň v roce 2020 bylo po aplikaci NPK dosaženo nejvyššího odběru P zrnem 38,0 kg P/ha. Organická hnojiva obecně na stanovišti Hněvčeves nedosahovala takto vysokých odběrů P zrnem pšenice.

**Graf 13: Odběr fosforu zrnem pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves**



V následujícím grafu (graf č. 15) je znázorněn odběr fosforu zrnem na stanovišti Suchdol ve vybraných letech od roku 1999 do roku 2020. Odběry P zrnem pšenice na stanovišti Suchdol od roku 1999 do roku 2008 byly u všech systémů hnojení velmi nízké v porovnání se stanovišti v Humpolci a v Hněvčevsi. Odběr P zrnem v těchto letech nepřesáhl 7,6 kg/ha, přičemž se na nejvyšších odběrech P podílela aplikace čistírenských kalů a minerálního NPK. Tato hnojiva nejvíce zvýšila odběr P zrnem také v následujících letech měření, a to v roce 2014 a 2020. V roce 2014 rostliny zrnem odebraly 21,2 kg/ha po aplikaci čistírenských kalů a 24 kg P/ha po hnojení NPK, zatímco nehnojená kontrola dosahovala odběru P ve výši 14,6 kg/ha. Tento efekt nastal i v roce 2020, kdy hnojení NPK zvýšilo odběr na 25,1 kg/ha a hnojení kaly na 26,7 kg/ha, což je o více než ½ vyšší odběr P než na nehnojené variantě (11,14 kg P/ha).

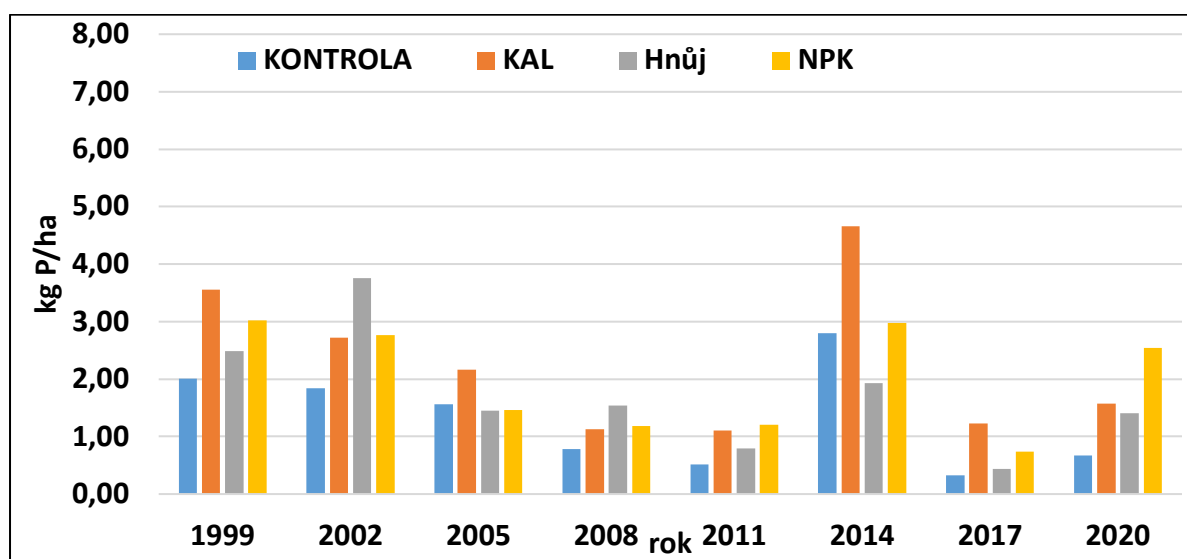
**Graf 14: Odběr fosforu zrnem pšenice ozimé na stanovišti Suchdol**





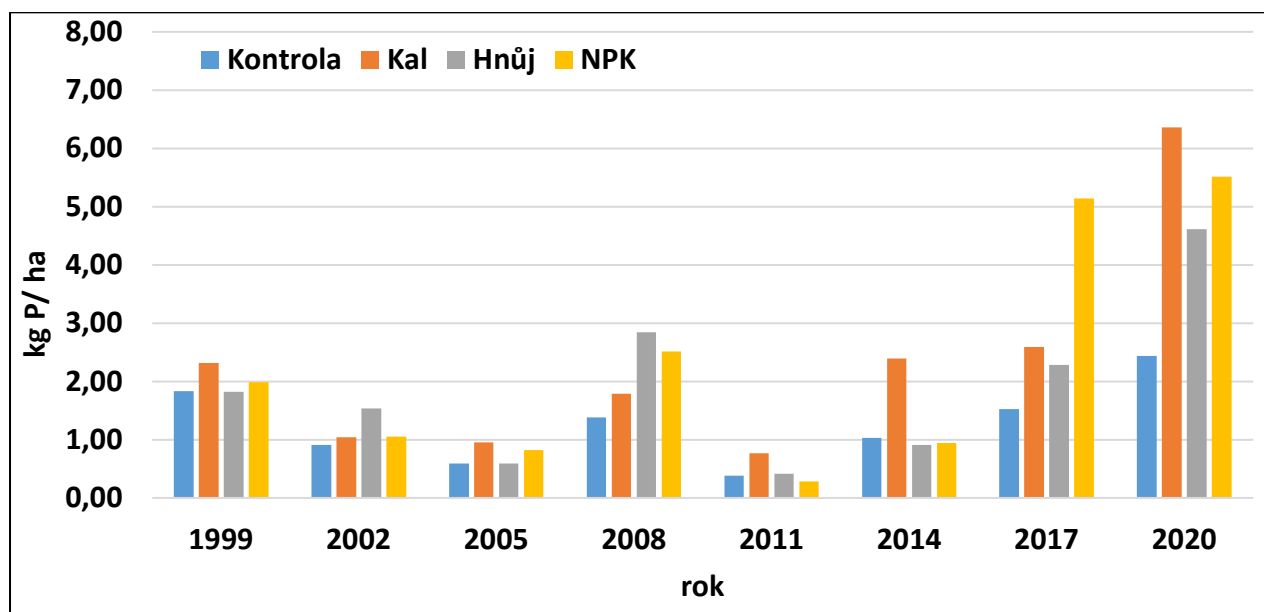
V následujících grafech (č. 16, 17 a 18) jsou znázorněny vlivy různých systémů hnojení na odběry P slámou pšenice ozimé ve sledovaném období od roku 1999 do roku 2020. Nejvyšší odběr fosforu slámou na stanovišti Humpolec byl zaznamenán při hnojení čistírenskými kaly, potvrzeno celkem ve čtyřech letech (1999, 2005, 2014 a 2017), nejvíce však v roce 2014, kdy byla naměřena hodnota 4,65 kg P/ha (graf č. 16). V tomto roce došlo k vyššímu odběru P na nehnojené kontrolní variantě (2,80 kg P/ha) než po aplikaci hnoje (1,93 kg P/ha). Aplikace hnoje nejvíce zvýšila odběr P v letech 2002 (3,75 kg P/ha), 2008 (1,54 kg P/ha). Bez těchto dvou let došlo v ostatních sledovaných letech k nejvyššímu odběru P po aplikaci NPK oproti hnoji. Nejnižší odběry P slámou byly na variantách, na kterých nebylo aplikováno žádné hnojivo (kontrola). Ve většině let došlo k odběru P do 1 kg/ha.

**Graf 15: Odběr fosforu slámou pšenice ozimé na stanovišti Humpolec**



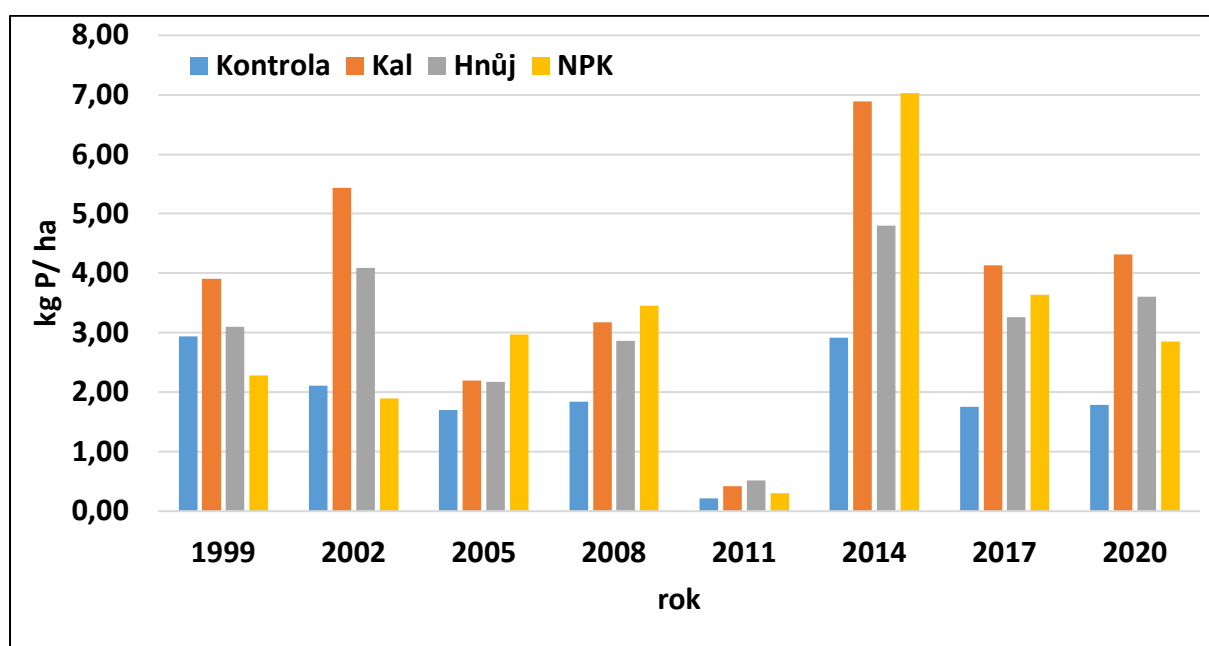
V následujícím grafu (graf č. 17) je znázorněn vliv různých systémů hnojení na odběr fosforu slámou pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves v rozmezí vybraných let od roku 1999 do roku 2020. Aplikace hnoje vykazovala nejvyšší odběr P slámou pouze v letech 2002 a 2008. V ostatních letech po aplikaci hnoje došlo ke zvýšení odběru P slámou oproti nehnojené variantě, ale vždy k nižším hodnotám v porovnání s ostatními hnojivy. Čistírenské kaly často zvyšovaly odběr P slámou ve srovnání s aplikací hnoje. V letech 1999, 2014 a 2020, bylo dosaženo nejvyššího odběru P. Zatímco se odběr fosforu po aplikaci kalů pohyboval okolo 2 kg/ha, v roce 2020 došlo k nárůstu odběru až na 6,36 kg P/ha. Ročník 2020 byl obecně příznivý na odběr P u všech variant. Aplikace minerálního NPK dosáhla v tomto roce odběru 5,52 kg P/ha, podobně tak i v roce 2017, kde rostliny odebraly 5,15 kg P/ha. Pro srovnání v roce 2017 rostliny prostřednictvím slámy odebraly 2,59 kg P/ha po aplikaci čistírenských kalů a na nehnojené kontrole bylo dosaženo odběru 1,53 kg P/ha. Po hnojení NPK byly zaznamenány také velmi nízké hodnoty (roky 2002, 2005 a 2014), zejména v roce 2011, kdy odběr po hnojení NPK byl z celého monitoringu nejnižší (0,28 kg P/ha). Zmíněné roky však nebyly příznivé na odběr P slámou pro žádný systém hnojení.

**Graf 17: Odběr fosforu slámou pšenice ozimé na stanovišti Hněvčeves**



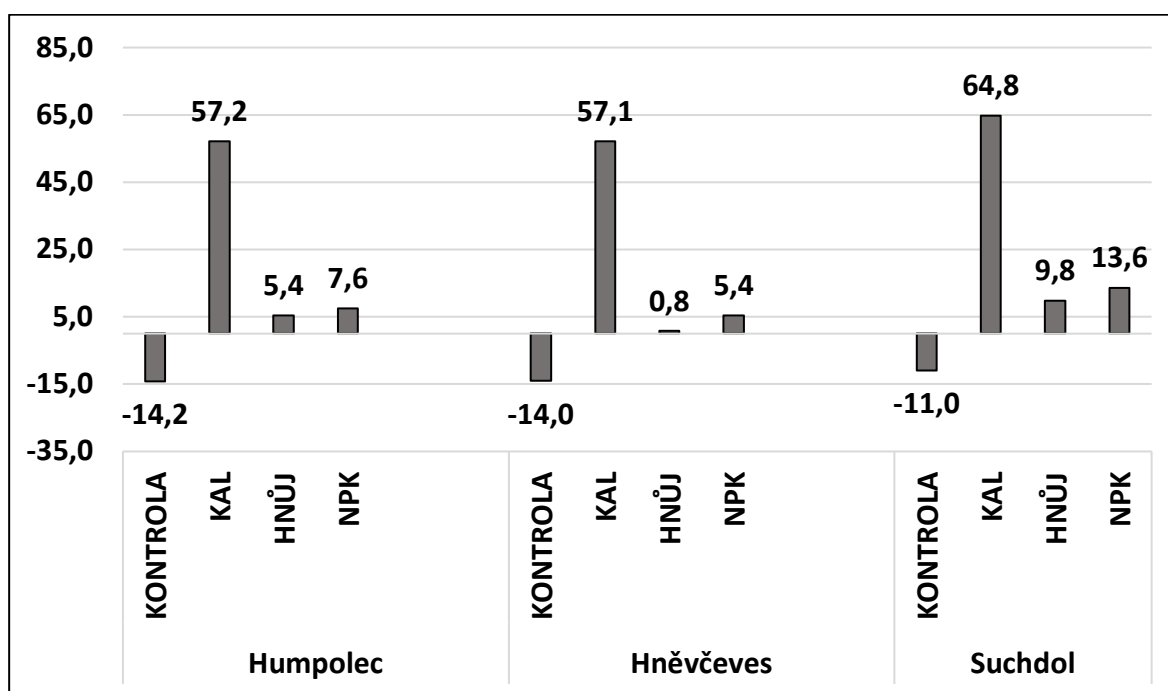
V grafu (graf č. 18) je charakterizován vliv různých systémů hnojení na odběr fosforu slámou pšenice ozimé na stanovišti. Po aplikaci hnoje v celém sledovaném období vždy docházelo k nižšímu odběru P než při použití čistírenských kalů a NPK, vyjma let 1999 a 2002, které ukazují, že po aplikaci NPK došlo k nejnižšímu odběru P slámou oproti použití ostatních hnojiv, a dokonce i oproti nehnojené kontrole. Naopak k nejvyšším odběrům P slámou po aplikaci NPK došlo v letech 2005, 2008 a 2014 v porovnání s ostatními systémy hnojení. Největší vliv na odběr P slámou měla především aplikace čistírenských kalů. V letech 1999, 2002, ale i 2017 a 2020 jednoznačně převyšuje odběr P slámou po aplikaci čistírenských kalů. NPK je jedinou variantou, kde bylo v některých letech (2008, 2014, 2017) dosaženo podobných výsledků jako u čistírenských kalů.

**Graf 18: Odběr fosforu slámou pšenice ozimé na stanovišti Suchdol**



Průměrnou bilanci P (v kg/ha) při různých systémech hnojení na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Suchdol charakterizuje graf 19. Průměrná bilance P vychází z průměrného ročního vstupu P v hnojivech do půdy a průměrného odběru P zrnem a slámou. Při aplikaci organických a minerálních hnojiv došlo k pozitivní bilanci P na všech stanovištích. Dále byla bilance P vyšší v systémech hnojení s vyšším vstupem P v hnojivu. Na kontrolních nehnojených variantách byla bilance vždy záporná (-11,0 až -14,2 kg P/ha/rok). Zapravením hnoje bylo do půdy dodáno 23,3 kg P/ha/rok a po odběru zrnem a slámou v půdě zde zůstalo nejméně ze všech použitých hnojiv, a to v Humpolci 5,4 kg P/ha/rok, v Suchdolu 9,8 kg P/ha/rok a zcela nejméně na stanovišti v Hněvčevsi 0,8 kg P. Vyšší pozitivní bilance P se dostavila po aplikaci minerálního P v hnojivu NPK, jehož prostřednictvím do půdy bylo celkem dodáno 30 kg P/ha/rok. Přes vyšší odběry P zrnem a slámou na variantách hnojených NPK bylo dosaženo bilance 7,6 kg P/ha/rok (Humpolec), 9,8 kg P/ha/rok (Suchdol) a 5,4 kg P/ha/rok (Hněvčeves). Nejvyšší bilance P v půdě byla zaznamenána po aplikaci čistírenského kalu. Čistírenský kal několikanásobně zvýšil bilanci P oproti půdám hnojeným hnojem a NPK. Hnojením kaly bylo do půdy zapraveno 80 kg P/ha/rok, což je zároveň nejvíce aplikovaného P do půdy ze všech sledovaných hnojiv.

**Graf 19: Průměrná roční bilance P po sklizni pšenice ozimé na sledovaných stanovištích**



## 6 Diskuze

Tato diplomová práce se zabývá tématem fosforu a vztahem této živiny k ovlivnění výnosu ozimé pšenice a půdní úrodnosti z hlediska P. Pro vyhodnocení vlivu různého systému hnojení na výnos pšenice a změny obsahu P v půdě byla využita data z dlouhodobého stacionárního pokusu založeného na pokusných stanicích ČZU v Praze a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Pokusy byly realizovány celkem na třech různých stanovištích s různými půdně-klimatickými podmínkami. Jednalo se o stanoviště v Humpolci, v Hněvčevsi a v Suchdolu. Půdně-klimatické charakteristiky stanovišť jsou uvedeny v tabulce č.5. Poloprovozní pokusy probíhaly na parcelkových pokusech, ve kterých byly v trojhonném sledu pěstovány po sobě tyto plodiny: brambory, pšenice ozimá a ječmen jarní. V diplomové práci jsou použity výsledky z variant kontrola, hnůj, kaly a NPK let 1996, 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017 a 2020. Jedná se o výsledky z ukončeného tříletého cyklu, vždy po sklizni ozimé pšenice.

Dle Dhillon et al. (2017) je fosfor a jeho obsah v půdě nejvíce limitujícím faktorem v produkci obilovin napříč celým světem. Výsledku se dopracoval zkoumáním mezi lety 1961 až 2013. Výsledky této diplomové práce nám mají ukázat vliv hnojení hnojiv s obsahem fosforu na výnos pšenice ozimé, obsah fosforu v půdě a jeho odběr zrnem a slámou pšenice. V průběhu jednotlivých let byly systémy hnojení minerálním NPK, hnojem, čistírenskými kaly porovnávány s nehnojenou kontrolou.

Z výsledků je patrné, že na dynamice jednotlivých frakcí P v půdě po sklizni se podílel vliv dávky a forma použitého hnojiva. V roce 1996 před začátkem pokusu na jednotlivých stanicích byla provedena první měření pro zjištění zásoby P v půdě. Okamžitě přístupné formy fosforu v půdě byly stanoveny metodou vodného výluhu ( $P_{H_2O}$ ). Zásoba okamžitě přístupného fosforu byla v Humpolci 2,73-8,81 mg/kg, v Hněvčevsi 6,05-11,1 mg/kg a nejnižší zásoba  $P_{H_2O}$  v půdě byla na stanovišti Suchdol, 2,45 – 6,32 mg/kg. V Humpolci po aplikaci hnoje došlo v celém sledovaném období, vyjma roku 1999, k navýšení přístupného fosforu oproti nehnojné kontrole. Pozitivní efekt se dostavil i po aplikaci čistírenského kalu, který kopíroval pozitivní vliv aplikace hnoje na stanovišti. V letech 2017 a 2020 byly po aplikaci kalu naměřeny nejvyšší hodnoty oproti všem sledovaným variantám ošetření. Aplikace kalů v roce 2017 dokonce takřka dvojnásobně zvýšila obsah  $P_{H_2O}$  oproti aplikaci hnoje a NPK. V Suchdolu hnůj podle těchto výsledků patří mezi hnojiva významně zvyšující obsah  $P_{H_2O}$  v půdě oproti NPK a kontrole. Obsah  $P_{H_2O}$  v půdě byl však nejvíce ovlivněn zapravením čistírenských kalů, tento jev se opakoval celkem 5x (2005, 2011, 2014, 2017 a 2020). V několika letech sledování organická hnojiva podobně zvyšují obsah  $P_{H_2O}$  v půdách. Tento efekt se projevil také na půdách v Hněvčevsi, kde organická hnojiva obecně významně zvýšila obsah okamžitě přijatelného fosforu pro rostliny. Hnůj v půdě na stanovišti Hněvčevs významně zvýšil koncentraci  $P_{H_2O}$  v porovnání s aplikací NPK v letech 1999, 2002, 2005, 2017 a 2020. Nejvyšších hodnot  $P_{H_2O}$  bylo dosaženo po aplikaci čistírenského kalu, a to beze změny od roku 2005 až do roku 2020, avšak zcela nejvyšší koncentrace byly naměřeny v roce 2014 (20,17 mg/kg) a v roce 2020 (21,54 mg/kg) oproti všem způsobům hnojení a nehnojené kontroly. Pozitivní zvýšení obsahu  $P_{H_2O}$  u varianty kal bylo způsobeno mimo jiné vysokým jednorázovým vstupem P z hnojiva, jehož zapravením bylo dodáno 240 kg P/ha za 3honný osevní postup. Lze také konstatovat, že nejméně okamžitě přístupného fosforu je vždy na variantách nehnojených. To potvrzuje

očekávání, že bez přísunu fosforu v hnojivech, obsah fosforu v půdě klesá (Bajerová 2020). Dle Kudrna (2013) německý chemik Justus von Liebig (1803-1873) a ve svém díle „Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie“ z roku 1840 představil definici: „Výše výnosu závisí na té živině, která je vzhledem k optimální potřebě v nejmenším množství (minimu).“ Tímto se potvrzuje jedno ze základních ekologických pravidel, které bylo formulováno už v roce 1840. Říká, že život a růst organismů je limitován tím prvkem, kterého je nedostatek (je v minimu).

Potencionálně přístupné formy fosforu byly stanovovány pomocí metody Mehlich 3. Kulhánek et al. (2018) poukazuje na výhody této metody, které spočívají v univerzálnosti a poměrné jednoduchosti provedení. Využívána se jak v České republice, tak v zahraničí. Dle Wendt (1995) je zřejmé, že tato metoda ukazuje rovnocenné prognózy úrodnosti půd, stejně jako jiné ověřené extrakční metody. Jones (1990), uvádí, že Mehlich 3 lze využít i k analyzování potencionálně deficitních půd, jak pro jednu či více makroživin či mikroživin. Původně byl Mehlich 3 koncipován pro kyselé půdy, ale následně našel využití na půdách alkalických (Schmisek et al. 1998), kde je účinný vzhledem k zvýšené pufrční kapacitě (Wendt 1995). Smatanová & Sušil (2018) uvádí, že průměrná zásoba přístupného fosforu ( $P_{M3}$ ) v zemědělských půdách ČR je 90 mg/kg. Intenzivní hnojení fosforem vyžaduje v naší republice více než 25,5 % výměry ČR. Vysokou a velmi vysokou zásobu přístupného fosforu vykazuje 24,6 % výměry ČR.

Princip a roky vyhodnocení potencionálního P ( $P_{M3}$ ) jsou identické jako u forem okamžitě přístupných. V roce 1996 se naměřené zásoby P všech stanovišť pohybovaly v rozmezí 59–105 mg/kg. Absolutně nejvyšších koncentrací  $P_{M3}$  dosahovaly na všech stanovištích varianty hnojené čistírenskými kaly. To potvrzují i průměrná data, kde byly na všech stanovištích naměřeny průměrné nejvyšší hodnoty vždy ve variantě hnojené kaly. Podobné výsledky prezentovali také Kulhánek et al. (2019). Černý et al. (2021) v 18 let trvajících pokusech rovněž potvrdili variantu hnojenou čistírenskými kaly jako nejperspektivnější přínos fosforu do půdy. Shodují se se závěry pokusů zveřejněných Wu et al. (2012). Oproti roku 1996 lze z výsledků také sledovat nárůst průměrných hodnot potencionálně přístupného fosforu v půdě ve všech hnojených variantách. Bilanci tedy můžeme hodnotit jako kladnou. Nejnižší obsahy naopak vykazovaly varianty kontrolní, tedy nehnojené. Obecně by se dalo konstatovat, že na obsah vodorozpustného, okamžitě přístupného P pro rostliny a potencionálně přístupného P v půdě měla největší vliv aplikace organických hnojiv ve srovnání s aplikací minerálního NPK. Z použitých organických hnojiv však půdy hnojené čistírenskými kaly vykazovaly nejvyšší efekt. Černý et al. (2021) ve své práci konstatují, že mezi často nejlevnější a nejjednodušší způsob opakovaného využití P bez chemické úpravy je právě přímá aplikace statkových hnojiv a organických odpadů (hnůj, kejda, digestát, kompost, čistírenský kal, popel ze spalování biomasy či kalů). S tímto tvrzením souhlasí také Lu et al. (2012), který rovněž zastává názor, že přímá aplikace odpadů s obsahem P na zemědělskou půdu, je nejjednodušší celosvětově praktikovaný způsob. Praktikuje se tak již mnohá desetiletí. Dle Cieslik et al. (2014) jsou výhodné i nízké náklady na hnojivo, ovšem při velkém objemu je zde problém s přepravou a manipulací. Dle Černý et al. (2021) je tímto nejstarším a aktuálně nejrozšířenějším způsobem recyklace P počítána také aplikace dalších živin a organické hmoty, nejen tedy odpadů. Kowaljow et al. (2014) zmiňuje, že aplikace čistírenských kalů je zdrojem N, P, organické hmoty a ostatních živin. Tato aplikace se využívá na zemědělských, ale

i degradovaných půdách k zachování koloběhu uhlíku a živin. Možným problémem pro životní prostředí je možnost obsahu rizikových prvků v kalech, organických polutantů, parazitů a patogenních mikroorganismů (Dean & Suess 1985; Černý et al. 2021). V případě aplikace čistírenských kalů může být nevýhodou rovněž pomalé uvolňování P, např. z fyтинových vazeb a přeměny fosforu v půdě po aplikaci hnojiv, kdy je omezena přístupnost fosforu pro rostliny (Černý et al. 2021).

Výnos zrna a slámy je obecně ovlivňován mnoha biotickými a abiotickými faktory. Výsledky umožnily sledování změn výnosu hlavního a vedlejšího produktu vlivem použitého hnojiva s obsahem P. Z dosažených výsledků je patrné a lze konstatovat, že výnosy zrna slámy na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Suchdol poukazují obecně na to, že nejvyšší výnosy zrna, ale i slámy jsou dosahovány aplikací minerálních hnojiv u varianty NPK. Zatímco aplikace čistírenských kalů pozitivně zvyšuje výnos zrna pšenice, snižuje výnos pšeničné slámy. Naopak půdy vyhnojené hnojem poskytují nižší výnosy zrna než čistírenské kaly, ale zvyšují výnosy slámy, především na stanovišti Hněvčeves. Výnosy zrna pšenice ozimé se na všech variantách a stanovištích pohybovaly v rozmezí 2,06 t/ha až 10,2 t/ha. Variabilita výnosů byla ovlivněna proměnnými podmínkami počasí, a také změnami odrůd v průběhu pokusu. Nejvyšší absolutní hodnoty dosáhla odrůda RGT Reform v roce 2017 v Hněvčevsi hnojená čistírenským kalem. U všech variant a stanovišť dosahovaly nehnojené kontroly zpravidla nejnižších výnosů zrna a slámy. Jak již bylo zmíněno, nejlepší výsledky dosahovala varianta hnojení NPK. Nejvyšších výsledků výnosů zrna při pokusech s hnojením NPK dosáhl i Hlisnikovský et al. (2019), který na pokusech trvajících od roku 2013 do roku 2017 dospěl ke stejnému závěru. Při porovnání NPK uvádí, že dusík byl nejvíce limitujícím faktorem ovlivňujícím výnos a obsah bílkovin. Významný byl také vliv vysokých teplot a sucha, při pokusu bylo počasí ve dvou ročnících extrémní. V rámci této práce to v Humpolci dokonce bylo ve všech realizovaných ročnících. Pouze v roce 2002 se umístila lépe varianta s kaly. Na Suchdole

a v Hněvčevsi byla variabilita nejvyšších výnosů větší, ale i na těchto stanovištích celkově vyšlo, že pozitivně výnos zrna nejvíce ovlivnilo hnojení NPK, poté kal, hnůj a nehnojená varianta. Z výsledků je tedy patrné, že půdní úrodnost bez postupně nahrazovaných odčerpaných živin klesá a nemůže dlouhodoběji zajistit vyšší výnosy. Výnos slámy v podstatě koreloval s výsledky výnosu zrna. V Humpolci a Hněvčevsi nejlépe vycházely varianty hnojené NPK. Stanoviště v Suchdole vykazovalo větší variabilitu výsledků. Zde se v nejvyšších výnosech slámy střídaly varianty NPK a čistírenského kalu. V porovnání všech lokalit dosáhla nejvyššího výnosu Hněvčeves. V roce 2020 dosáhla odrůda RGT Reform výnosu 8,18 t/ha slámy u varianty hnůj. Ve výnosech slámy i zrna můžeme vidět jednoznačně pozitivní vliv hnojení na úrodnost stanovišť. Obecně nejlépe vychází hnojení NPK. Varianta NPK obsahuje i jiné živiny než fosfor, které v této práci nejsou řešeny. Ovšem tyto živiny mají rovněž nezastupitelnou úlohu ve výživě rostlin a tvorbě jejich výnosu (Vaněk et al. 2016).

Z výsledků odběru fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé je na první pohled evidentní, že odběr P slámou je vždy nižší než odběr zrnem na všech stanovištích a v celém sledovaném období (1999-2020). Toto tvrzení se shoduje s publikací Černý et al. (2010). Tyto výsledky jsou uchopitelné i z praktického hlediska, protože nám ukazují, kolik fosforu z pole se sklídí a odvezeme, a kolik ho tedy musíme minimálně do půdy dodat, abychom udrželi alespoň stávající zásobenosti půdy. Můžeme se samozřejmě řídit i průměrnými, takzvanými odběrovými

normativy, ale zde máme k dispozici přesné hodnoty. Výsledky všech variant jsou relativně různé. Ze všech použitých hnojiv dokázaly rostliny odebrat nejméně P do zrna a slámy po aplikaci hnoje. Naopak aplikace čistírenských kalů a minerálního NPK zajistila nejvyšší odběr P zrnem i slámou. Pokud sláma na pozemku zůstává v podobě posklizňového zbytku, a následně se zapraví do půdy, fosfor se dostane zpět do koloběhu živin. Hnojení slámou přichází v úvahu hlavně v podnicích bez živočišné výroby a v osevních sledech s vysokým obsahem obilnin (Vaněk et al. 2016). I zde byly výsledné hodnoty variabilní. Obecně ale můžeme říci, že v porovnání všech variant nejvíce odebraného fosforu vykazovala varianta hnojená kaly. Nejvyšším naměřeným odběrem vůbec byla hodnota 7,03 kg P/t slámy v roce 2014 na Suchdole.

Parametr pojednávající o vstupech a výstupech P je bilance P. Průměrná bilance P vychází z průměrného ročního vstupu P v hnojivech do půdy a průměrného odběru P zrnem a slámou. Při aplikaci organických a minerálních hnojiv došlo k pozitivní bilanci P na všech stanovištích. Je potřeba zmínit, že bilance P byla vždy vyšší v systémech hnojení s vyšším vstupem P v hnojivu. Zapravením hnoje bylo do půdy dodáno 70 kg P na osevní postup a po odběru zrnem a slámou v půdě zůstalo nejméně ze všech použitých hnojiv. Vyšší pozitivní bilance P se dostavila po aplikaci minerálního P v hnojivu NPK, jehož prostřednictvím do půdy bylo celkem dodáno 90 kg P/3 roky, a to i přes vyšší odběry P zrnem a slámou na variantách hnojené NPK než při hnojení hnojem. Nejvyšší bilance P v půdě byla zaznamenána po aplikaci čistírenského kalu, který několikanásobně zvýšil bilanci P oproti půdám hnojeným hnojem a NPK. Hnojením kaly bylo do půdy zapraveno 240 kg P/3 roky, což je zároveň nejvíce aplikovaného P do půdy ze všech sledovaných hnojiv. Autoři Kulhánek et al. (2023) zabývající se přeměnami P v půdě (Asrade et al. 2023) ve své práci uvádějí, že čistírenské kaly jsou hlavním zdrojem biologicky dostupného anorganického fosforu. Díky tomu tak pravděpodobně docházelo k vyšší využitelnosti P do biomasy rostlin pšenice, a tím tak vyšších výnosů po aplikaci čistírenského kalu. Způsobem, jakým můžeme zlepšit bilanci živin je hnojení minerálními hnojivy. V případě této diplomové práce byla použita kombinace NPK. Hnojiva se mohou aplikovat plošně či cíleně. Balík et al. (2002) uvádí rostoucí význam lokální aplikace hnojiv. Z důvodu intenzivního plošného hnojení P hnojivy byla dosažena vyšší hladina přijatelného fosforu v půdách. Withers et al. (2014) je ale opačného názoru a propaguje jako jednu z možností zvýšení využitelnosti fosforu rostlinami a snižování vstupů fosforečných hnojiv aplikací umožňující dodání P hnojiv blíže ke kořenům rostlin. Zabýval se zkoumáním aplikací hnojiv tzv. „pod patu“ nebo na list. V pokusech na kanadských černozemích dosahovaly téměř shodných výsledků aplikace 10 kg P/ha „pod patu“, jako plošná aplikace 40 kg P/ha. Stále nejčastější formou je u nás plošná aplikace fosforečných hnojiv. Zvláště u fosforu je ovšem využití rostlinami u takto aplikovaných hnojiv minimální. Dlouhodobé pokusy prokazují až 85% imobilizace fosforu z minerálních hnojiv různými chemickými a biologickými procesy. Bylo zjištěno, že při běžných půdních testech na stanovení přístupného P, není fosfor detekován a dochází k nadměrnému hnojení. Fosfor je tak hromaděn v půdě a zvyšuje se riziko jeho uvolnění do prostředí (MacDonald et al. 2011). V současné době však spotřeba fosforečných hnojiv klesá a snaha o ovlivnění přijatelnosti fosforu je opět aktuální (Balík et al. 2002).

## 7 Závěr

Hlavními cíli práce bylo porovnání vývoje zásobenosti různých frakcí fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení pšenice ozimé a dále vyhodnocení odběrů fosforu a výnosů ozimé pšenice u vybraných variant hnojení, včetně výpočtu jednoduché bilance P.

- 1) Z dosažených výsledků lze potvrdit, že u kontrolní nehnojené varianty v dlouhodobém pokusu klesaly obsahy jednotlivých frakcí P ( $P_{H_2O}$  a  $P_{M_3}$ ) v půdě, což bylo způsobeno především odběrem P rostlinami pšenice.
- 2) Na fosforem hnojených variantách byl potvrzen vzestupný trend zvýšení obsahu přístupného P v půdě. Frakce vodorozpuštěného P ( $P_{H_2O}$ ) potenciale přístupného fosforu ( $P_{M_3}$ ) se významně zvyšovala zejména u variant s organickými hnojivy.
  - Pro zvýšení obsahu  $P_{M_3}$  byla nejpříznivější aplikace čistírenských kalů. Nejméně pozitivní vliv měla varianta NPK.
  - Hnojení minerálním P (NPK) se vzestupný trend dostavil pouze na stanovištích Humpolec a Hněvčeves.
  - Hnojení minerálním P na Suchdole nepřineslo zvýšení  $P_{H_2O}$  v půdě od doby založení pokusu v porovnání s organickými hnojivy.
- 3) Čím vyšší dávka byla P dodána do půdy v hnojivech, tím vyšší byl odběr P rostlinami.
  - Největší odběry P rostlinami pšenice byly dosahovány po aplikaci čistírenského kalu, kde bylo do půdy dodáno jednorázově 240 kg P/ha za celý osevní postup. Následovalo hnojení minerálním NPK, kterým do půdy bylo dodáno celkem 90 kg P/ha za osevní postup.
- 4) Předpokládalo se, že na stanovištích s nižší zásobou P v půdě bude se stoupající dávkou fosforu v hnojivech dosaženo pravděpodobně i vyššího efektu hnojení.
  - Tato hypotéza byla částečně potvrzena. Stanoviště s nižší zásobou P byla se stoupající dávkou fosforu v hnojivech zvýšena. Nejvyšší efekt hnojení na obsah frakce P ( $P_{H_2O}$  a  $P_{M_3}$ ) se dostavil po aplikaci organických hnojiv, především čistírenského kalu.
  - Významný efekt se také dostavil i po aplikaci hnoje s celkovou jednorázovou dávkou 70 kg P za celou rotaci.
  - Nejnižší efekt hnojení na obsah frakcí P v půdě se dostavil po aplikaci celkem 90 kg P dodané minerálním NPK. Hnojením NPK bylo dodáno do půdy více P než aplikací hnojem, ale nedosáhlo se vyššího efektu hnojení. Tato varianta však naproti tomu měla nejvyšší efekt na výnosy pšenice ozimé.



## 8 Seznam použité literatury

- ADW AGRO. 2018. Amofos. Available at <https://www.adw.cz/underwood/download/files/pl-amofos.pdf> (accessed April 2024).
- Asrade DA, Kulhánek M, Balík J, Černý J, Sedlář O. 2023. Side effect of organic fertilizing on the phosphorus transformation and balance over 27 years of maize monoculture:12. Available at [https://www.email.cz/download/k/1\\_PZwHkqoxYRJY11WhbV5Vs-g-Jiu\\_BFtnCvXwwMJjZixh29d0TTJZ1wpzopfDNGhIi\\_UnA/1-s2.0-S0378429023000953-main.pdf](https://www.email.cz/download/k/1_PZwHkqoxYRJY11WhbV5Vs-g-Jiu_BFtnCvXwwMJjZixh29d0TTJZ1wpzopfDNGhIi_UnA/1-s2.0-S0378429023000953-main.pdf) (accessed April 2024).
- Baier J. 1962. Abeceda výživy rostlin. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Baier J, Baierová V. 1985. Abeceda výživy rostlin a hnojení. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Bajerová E. 2020. Fosfor v půdě. Agrostris s.r.o. Available at <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/fosfor-v-pude> (accessed April 2024).
- Balík J, Kulhánek M, Černý J, Vaněk V. 2008. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Kulhánek M, Zitková M, Jakl M. 2002. Lokální aplikace fosforečných hnojiv. Sborník z 8. mezinárodní konference – Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Katedra agrochemie a výživy rostlin ČZU v Praze, Praha.
- Bartels JM, Bigham JM. 1996. Phosphorus, Methods of Soil Analysis, Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc. USA
- Bittner V. 2024. Škodlivé organismy pšenice. Available at <https://docplayer.cz/9491339-Publikace-skodlive-organismy-psenice.html> (accessed April 2024).
- Bruinsma J. 2003. World agriculture: Towards 2015-2030 an FAO perspective. 67 in World agriculture. Ecanthscan publications, USA. Available from [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=2yd868WG6V4C&oi=fnd&pg=PR1&dq=agriculture&ots=0LYXW6ZmOL&sig=ZQ\\_paITu\\_ABh5hbH718YYV96izc&redir\\_esc=y#v=onepage&q=wheat](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=2yd868WG6V4C&oi=fnd&pg=PR1&dq=agriculture&ots=0LYXW6ZmOL&sig=ZQ_paITu_ABh5hbH718YYV96izc&redir_esc=y#v=onepage&q=wheat) &f=false (accessed April 2024).
- Büchner W. 1991. Průmyslová anorganická chemie: důležité suroviny a meziprodukty. SNTL-Nakladatelství technické literatury, Praha.
- Čermák P, Mühlbachová G, Káš M, Pechová M, Lošák T, Hlušek J, Kulhánek M, Sedlář O, Balík J. 2018. Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.

- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Časová K, Nedvěd V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant soil environ.* 56:28-36.
- Černý J, Kulhánek M, Sedlář O, Javor T, Suran P, Balík J. 2021. Vhodná dávka síry a termín aplikace při jarním hnojení ozimé pšenice. *Kurent. Česká zemědělská univerzita.* Available at <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-astimulace/hnojeni/vhodna-davka-siry-a-termin-aplikace-pri-jarnim-hnojeni-ozimepsenice> (accessed April 2024).
- Černý J, Shejbalová Š, Kovařík J, Kulhánek M. 2014. Předset'ové a podzimní hnojení pšenice ozimé. Available at <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-apodzimni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed April 2024)."
- Černý J, Shejbalová Š, Kulhánek M, Kovařík J. 2014. Předset'ové a podzimní hnojení pšenice ozimé. *Agromanuál, České Budějovice.* Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed March 2024).
- Dean RB, Suess MJ. 1985. The risk to health of chemicals in sewage sludge applied to land:251-278.
- Dhillon J, Torres G, Driven E, Figueiredo B, Raun WR. 2017. World phosphorus use efficiency in cereal crops. *Agron.* Available at <https://doi.org/10.2134/agronj2016.08.0483> (accessed April 2024).
- Diviš J. 2010. Pěstování rostlin: učební texty pro obor provozní podnikatel a pozemkové úpravy a převody nemovitostí. Jihočeská univerzita, České Budějovice.
- Dondlinger PT. 2018. *The Book of Wheat: An Economic History and Practical Manual of the Wheat industry.* Routledge Revivals, New York. Available from [https://books.google.cz/books?id=PXt\\_DwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=The+book+of+wheat:+an+economic+history+and+practical+manual+of+the+wheat+industry&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjGk9bxxO7vAhUaOuwKHR6vDO8Q6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q=The%20book%20of%20wheat%3A%20an%20economic%20history%20and%20practical%20manual%20of%20the%20wheat%20industry&f=false](https://books.google.cz/books?id=PXt_DwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=The+book+of+wheat:+an+economic+history+and+practical+manual+of+the+wheat+industry&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjGk9bxxO7vAhUaOuwKHR6vDO8Q6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q=The%20book%20of%20wheat%3A%20an%20economic%20history%20and%20practical%20manual%20of%20the%20wheat%20industry&f=false) (accessed April 2024).
- Dostál J, Haberle J, Klír J, Kozlovská L, Kvítek T, Růžek P. 2004. *Zásady správné zemědělské praxe zaměřené na ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů.* Ministerstvo zemědělství ČR v Ústavu zemědělských a potravinářských informací, Praha.
- EcoTrend. 2015. *Optimalizace nakládání s kaly z komunální čistíren odpadních vod.* Eco trend Research centre s.r.o., Praha. Available from [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty\\_po8\\_opzp\\_2007\\_2013/\\$FILE/OO DP-Oddil\\_I\\_1\\_Analyticka%20cast-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OO DP-Oddil_I_1_Analyticka%20cast-20160810.pdf) (accessed April 2024).
- Elsen J, Haygarth P. 2021. *Phosphorus: Past and Future.* Oxford university press, USA. Available from

- <https://books.google.cz/books?id=SIoIEAAAQBAJ&pg=PA53&dq=story+of+phosphorus&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjOmuOymenvAhUCP-wKHcemBm4Q6AEwA3oECAIQAg#v=onepage&q=story%20of%20phosphorus&f=false> (accessed April 2024).
- Emsley J. 2000. *The Shocking History of Phosphorus: A Biography of the Devil's Element*. Macmillan Publishers, London.
- Excel. Microsoft Office Excel 2016: Microsoft office Enterprise 2016. USA.
- Faměra O. 1993. *Základy pěstování ozimé pšenice*. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR, Praha.
- Fecenko J, Ložek O. 2000. *Výživa a hnojení polních plodin*. SPU, Praha.
- Feldman M. 1995. *Wheats*. In *Evolution of Crop Plants*. Longmans, London.
- Fijalkowski K, Rorat A, Grobelak A, Kacprzak MJ. 2017. The presence of contaminations in sewage sludge-The current situation. *Journal of Environmental Management*:11. Institute of Environmental Engineering, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland.
- Filippelli G. 2002. The Global Phosphorus Cycle. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **48**:391-425. Available from <https://pubs.geoscienceworld.org/rimg/article/48/1/391-425/110619> (accessed March 2024).
- Forbes JC, Watson RD. 1996. *Plants in Agriculture*. Cambridge university press, USA. Available from [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=itB5yKv7-rIC&oi=fnd&pg=PR13&dq=agriculture&ots=b4j9xE7T0f&sig=ZnAWtjo65MYJb4LSECMfiM9LcBA&redir\\_esc=y#v=snippet&q=phosphorus&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=itB5yKv7-rIC&oi=fnd&pg=PR13&dq=agriculture&ots=b4j9xE7T0f&sig=ZnAWtjo65MYJb4LSECMfiM9LcBA&redir_esc=y#v=snippet&q=phosphorus&f=false) (accessed April 2021).
- Fuhrman JK, Zhang H, Schroder JL, Davis RL. 2005. Water-Soluble Phosphorus as Affected by Soil to Extractant Ratios, Extraction Times, and Electrolyte. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **36**:925–935.
- Greenwood N, Earnshaw A. 1993. *Chemie prvků*. Informatorium, Praha.
- Haberle J, Trčková M, Růžek P. 2008. Příčiny nepříznivého působení vlivu sucha a dalších abiotických faktorů na příjem a využití živin obilninami a možnosti jeho omezení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- Havelka P. 2019. Změny v nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. *Enviweb*, Brno. Available from <http://www.enviweb.cz/114231> (accessed April 2024).
- Hergert GW. 2010. Sugar Beet Fertilization. *Sugar Tech* **12**:256-266. Available from <http://link.springer.com/10.1007/s12355-010-0037-1> (accessed March 2024).
- Hlisnikovský L, Čermák P, Kunzová E, Barlog P. 2019. The effect of application of potassium, magnesium and sulphur on wheat and barley grain yield and protein content. *Poznan*

University of Life Sciences. Poland. Available at <https://doi.org/10.15159/ar.19.182> (accessed April 2024).

Hnojivo ES. 2012. Agrofert. Available from [https://www.agrofert.cz/sites/default/files/downloads/npkmgms\\_15-15-152\\_12\\_hokr.pdf](https://www.agrofert.cz/sites/default/files/downloads/npkmgms_15-15-152_12_hokr.pdf) (accessed April 2024).

Housecroft CE, Sharpe AG. 2012. Inorganic chemistry. Pearson, Harlow.

Hřivna L, Cerkal R. 2009. Možnosti ovlivnění výnosu i kvality cukrovky mimokořenovou výživou. *Listy cukrovarnické a řepařské* **5-6**:164-169, Brno.

Hřivna L. 2012. Výživa a hnojení porostů pšenice ozimé a kvalita produkce. *Šlechtitelské listy*:1-4, Brno.

Huffman WE, Evenson RE. 2006. Science for Agriculture, A Long-Term Perspective. Blackwell publishing, Australia. Available from [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=7CuCZJeB5KcC&oi=fnd&pg=PR5&dq=agriculture&ots=UYVnnvN\\_zP&sig=9IMi-8cDu9hM-qN5mr1knVGpqbQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q=phosphate&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=7CuCZJeB5KcC&oi=fnd&pg=PR5&dq=agriculture&ots=UYVnnvN_zP&sig=9IMi-8cDu9hM-qN5mr1knVGpqbQ&redir_esc=y#v=onepage&q=phosphate&f=false) (accessed April 2024).

Cheesman AW, Turner BL, Reddy KR. 2010. Interaction of Phosphorus Compounds with Anion-Exchange Membranes: Implications for Soil Analysis. *Soil Science Society of America Journal* **74**:1607-1612. Available from <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2009.0295> (accessed March 2024).

Chesworth W. 2008. Encyclopedia of Soil Science. Springer, Canada. Available from <https://books.google.cz/books?id=EOYYM0-DAGQC&printsec=frontcover&dq=soil+science&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwj1-vL0q-LvAhURDOWKHQ8CBOcQ6AEwCXoECAcQA#v=onepage&q=winter%20wheat&f=false> (accessed April 2024).

Igrejas G, Ikeda T, Guzmán C. 2020. Wheat Quality For Improving Processing And Human Health. Springer, Switzerland. Available from <https://books.google.cz/books?id=pl7XDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Wheat+Quality+For+Improving+Processing+And+Human+Health&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwj05Liwru7vAhWUH-wKHZS7D3YQ6AEwAXoECAIQAg#v=onepage&q=Wheat%20Quality%20For%20Improving%20Processing%20And%20Human%20Health&f=false> (accessed April 2024).

IPNI. 2020. Triple Superphosphate. Nutrient source specifics 1:1. IPNI, USA. Available from <https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/35039C5F78D8740C852579AF0076567A/%24FILE/NSS-14%20Triple%20Superphosphate.pdf> (accessed April 2024).

Ivanič J, Havelka B, Knop K. 1984. Výživa a hnojenie rastlín. *Príroda*, Bratislava.

- Jackson ML. 2005. Soil Chemical Analysis: Advanced Course. Parrallel Press, University of Wisconsin. Available from <https://books.google.cz/books?id=VcEOK9QCkVEC&printsec=frontcover&hl=cs#v=snippet&q=phosphates&f=false> (accessed April 2024).
- Jäger L, Hegner P. 1987. Kvalita tuhých průmyslových hnojiv. SNTL, Praha.
- Jirsa, Tvarůžek, Polešenská, Jergl. 2020. Kvalita odrůd ozimé pšenice v polním pokusu v Kroměříži v roce 2019. *Obilnářské listy* **28**:7.
- Khan TS, Mubeen U. 2012. Wheat straw: A pragmatic overview. *Current Research Journal of Biological Sciences*. Chartered University, Pakistan.
- Konvalina P. 2008. Pěstování obilnin a pseudoobilnin v ekologickém zemědělství. Jihočeská univerzita, České Budějovice.
- Kudrna M. 2013. Přístupné živiny v půdě a Liebigův zákon. Available at <https://www.rosmarinus.cz/pristupne-ziviny-v-pude-a-liebiguv-zakon/> (accessed April 2024).
- Kolář L, Kužel S. 2002. Organický fosfor v půdách. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Kulhánek M, Balík J, Sedlár O, Zbírál J, Smatanová M, Suran P. 2018. Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Kulhánek M, Černý J, Balík J, Sedlár O, Suran P. 2018. Potential of Mehlich 3 method for extracting plant available sulfur in the Czech agricultural soils. *Plant, Soil and Environment* **64**:455-462. Available from [https://www.agriculturejournals.cz/web/pse.htm?type=article&id=372\\_2018-PSE](https://www.agriculturejournals.cz/web/pse.htm?type=article&id=372_2018-PSE) (accessed May 2024).
- Kunzová E, Menšík L, Vach M. 2017. Živiny a rizikové prvky v půdě. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- Kulhánek M, Černý J, Balík J, Vaněk V. 2009. Evaluation of phosphorus mobility in soil using different extraction methods. *Plant, Soil and Environment* **2**:267-272.
- Kunzová E, Menšík L, Vach M. 2017. Živiny a rizikové prvky v půdě. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- Kunzová E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i, Praha.
- Kuono K, Tuchiya Y, Ando T. 1995. Measurement of soil microbial biomass phosphorus by an anion exchange membrane method. *Soil Biology and Biochemistry* **27**:1353-1357.

- Kowaljaw E, Mazzarino MJ, Satti P, Jiménez-Rodríguez C. 2010. Organic and inorganic fertilizer effects on a degraded Patagonian rangeland. *Plant Soil* 332:135–145. doi: 10.1007/s11104-009-0279-4
- Kulhánek M, Černý J, Balík J, Sedlář O, Vašák F. 2019. Changes of soil bioavailable phosphorus content in the long-term field fertilizing experiment. *Soil and water Research*. 14:240-245.
- Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Souchere V, ALberola C. 2009. *Sustainable Agriculture*. Springer, France. Available from [https://books.google.cz/books?id=7cP-2jII02wC&printsec=frontcover&dq=Journal+of+Sustainable+Agriculture&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwivlpr\\_kenvAhUI3KQKHfdZAIwQ6AEwAXoECAUQAg#v=snipet&q=phosphate&f=false](https://books.google.cz/books?id=7cP-2jII02wC&printsec=frontcover&dq=Journal+of+Sustainable+Agriculture&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwivlpr_kenvAhUI3KQKHfdZAIwQ6AEwAXoECAUQAg#v=snipet&q=phosphate&f=false) (accessed April 2024).
- Luscombe PC, Syers JK, Gregg PEH. 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10:1361-1369.
- Lu Q, He ZL, Stoffella PJ. 2012. Land application of biosolids in the USA: a review. *Appl. Environ. Soil Sci.* 1:1-11. doi: 10.1155/2012/201462
- Macháček V, Čermák P. 2004. Stabilizace půdní úrodnosti z hlediska výživy rostlin fosforem a draslíkem. Metodická příručka. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i, Praha.
- MacDonald GK, Bennett EM, Potter PA, Ramankutty N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108:3086-3091. doi: 10.1073/pnas.1010808108
- Marschner P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, Elsevier, Australia.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15:1409-1416.
- Mehmood A, Akhtar M, Imran M, Ruks S. 2018. Soil apatite loss rate across different parent materials. *Geoderma*:218-229. Available at doi: 10.1016/j.geoderma.2017.09.036 (accessed April 2024).
- Mengel K. 1991. *Ernährung und Stoffwechsel die Pflanze*. Gustav Fischer Verlag, Jena, Germany.
- Minasny B, McBratney AB, Brough DM, Jacquier D. 2011. *Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration*. University of Sydney, Australia.
- Ministerstvo zemědělství. 2017. *Zelená zpráva 2016*. Ministerstvo zemědělství, Praha. Available from <http://eagri.cz/public/web/mze/ministerstvo-zemedelstvi/vyrocniohodnotici-zpravy/zpravy-o-stavu-zemedelstvi/zelena-zprava-2016.html> (accessed March 2024).

Ministerstvo životního prostředí. 2023.:2. Available at [https://www.mzp.cz/cz/kaly\\_cistiren\\_odpadnich\\_vod](https://www.mzp.cz/cz/kaly_cistiren_odpadnich_vod) (accessed April 2024).

Molins RA. 1991. Phosphates in food. CRC press, Boston. Available from [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=PydigGYruqYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=phosphates&ots=h5aVrFRSJ8&sig=hmE66zDbt1SoOxPW6vEYXaEs4Bc&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=PydigGYruqYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=phosphates&ots=h5aVrFRSJ8&sig=hmE66zDbt1SoOxPW6vEYXaEs4Bc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (accessed April 2024).

Moudrý J, Jůza J. 1998. Pěstování obilnin. Jihočeská univerzita, České Budějovice.

Norwood FB, Oltenacu PA, Calvo-Lorenzo MS, Lancaster S. 2015. Agricultural and Food Controversies: What Everyone Needs to Know. Oxford university, USA. Available from [https://books.google.cz/books?id=IyatBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=IyatBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (accessed April 2024).

Pazdera J. 2006. Pěstování rostlin – cvičení. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Petr J, Húska J. 1997. Speciální produkce rostlinná. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Petersen SO, Sommer SG, Béline F, Burton C, Dach J., Dourmad YA, Liep A, Misselbrook T, Nicholson F, Polsen H D, Provolò G, Sørensen P, Vinneras B, Weiske A, Bernal MP, 58 Böhm R, Juhász C, Mihelic R. 2007. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock Science* 112:180-191.

Pitter P. 1999. Hydrochemie. Vysoká škola chemicko technologická, Praha.

Prasad LC, Singh RM, Abdin MZ. 2007. Combining ability analysis for grain filling duration and yield traits in spring wheat (*Triticum aestivum* L. em. Thell.). *Genetics and Molecular Biology* 2:411-416.

Prasad R, Power JF. 1997. Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture. CRC Lewis publishers, New York. Available from [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=otAyc8tJGbwC&oi=fnd&pg=IA1&dq=agriculture&ots=RELjKggiTD&sig=41pZ62uGus248ME\\_Hrah4Xd1u50&redir\\_esc=y#v=onepage&q=phosphate&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=otAyc8tJGbwC&oi=fnd&pg=IA1&dq=agriculture&ots=RELjKggiTD&sig=41pZ62uGus248ME_Hrah4Xd1u50&redir_esc=y#v=onepage&q=phosphate&f=false) (accessed April 2024).

Prášková L, Němec P. 2016. Bazální monitoring zemědělských půd – pH a obsah živin 1995–2013. Available at [http://eagri.cz/public/web/file/458807/BMP\\_ZIVINY\\_text\\_opr.pdf#page=32&zoom=100,90,377](http://eagri.cz/public/web/file/458807/BMP_ZIVINY_text_opr.pdf#page=32&zoom=100,90,377) (accessed April 2024).

Pšenice obecná. 2020. Zf.CJU, Brno. Available from <https://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Psenice.htm> (accessed February 2024).

Pulkrábek J, Capouchová I, Hamouz K. 2003. Speciální fytotechnika. Česká zemědělská univerzita, Praha.

- Richter M. 2007. Chemie a technologie sloučenin fosforu. UJEP, Ústí nad Labem. Available from [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/pt1/Chemie\\_a\\_technologie\\_sloucenin\\_fosforu.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt1/Chemie_a_technologie_sloucenin_fosforu.pdf) (accessed April 2024).
- Richter R, Hlušek J. 1996. Průmyslová hnojiva, jejich vlastnosti a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR, Praha.
- Richter R, Hřivna L. 2005. Pšenice ozimá. MZLU, Brno. Available from [http://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/hnojeni\\_plodin/html/obilniny/psenice\\_ozima.htm](http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/html/obilniny/psenice_ozima.htm) (accessed February 2024).
- Rodriguez D, Goudriaan J, Oyarzabal M, Pomar M. 1996. Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plants. *Journal of Plant Nutrition* **19**:29-39. Available from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904169609365104> (accessed March 2024).
- Sharpley AN, Daniel T, Sims T, Lemunyon J, Stevens R, Parry R. 2003. Agriculture phosphorus and eutrophication. United States Department of Agriculture, Washington DC.
- Shewry. 2009. *Journal of Experimental Botany* **6**:1537-1553. Available from <https://academic.oup.com/jxb> (accessed April 2024).
- Schmisek ME, Cihacek LJ, Swenson LJ. 1998. Relationship between the Mehlich 3 soil test extraction procedure and standard soil test methods in North Dakota. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **29**:1719–1729.
- Sims JR, Haby VA. 1971. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Science* **112**:137-141.
- Smatanová M. 2021. Hodnocení zásobenosti orných půd České republiky přístupným fosforem. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Smatanová M, Sušil A. 2018. Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2012–2017. 37 in . Brno. Available at <https://eagri.cz/public/portal/-q456031---KFcKH3jl/vysledky-agrochemickeho-zkouseni-pud> (accessed April 2024).
- STATISTICA. 2019. ver. 13.2. Dell software. <https://software.dell.com/products/statistica/>.
- Stránská E, Neděla D, Válek R, Křivčík J. 2015. Optimalizace přípravy heterogenní kationvýmenné membrány s využitím různé distribuce velikostí částí iontovýmenné pryskyřice. *Chemické listy* **3**:701-709.
- Szabó AT, Hammer K. 1996. Notes on the taxonomy of farro: *Triticum monococcum*, *T. dicoccon* and *T. spelta*, Hulled wheats. IPGRI, Italy.
- Šafarčíková S, Kouřil M. 2016. Živiny v krajině. DAPHNE ČR – Institut aplikované ekologie **1**:1-16.
- Špaldon E. 1963. Rostlinná výroba. SZN, Praha.



- Špaldon E. 1982. Rostlinná výroba - vysokoškolská učebnice pre vysoké školy poľnohospodárske. Příroda, Bratislava.
- Šroller J. 1998. Speciální fyto technika-rostlinná výroba. Ekopress, Praha.
- Štípek K, Shejbal P, Černý J, Vaněk V, Kulhánek M. 2007. Výživa a hnojení ozimé pšenice určené (nejen) k potravinářskému využití. Agromanuál 3:71-74. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/casopis-agromanual/agromanual-2007-4> (accessed March 2024).
- Štolcová M. 2009. Speciální fyto technika. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Taufarová A, Petrášová M, Pokorná J, Tremlová B, Bartl P. 2014. Rostlinná produkce. Disertace, Brno.
- Tiessen H, Moir JO. 1993. Characterization of available phosphorus by sequential extraction. In: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers: 75-86.
- Tlustoš P, Pavlíková D, Balík J. 2002. Úloha fosforu v rostlinách, jeho příjem a potřeba rostlinami. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Toužín J. 2008. Stručný přehled chemie prvků. Tribun EU, Brno.
- Trávník K. 2010. Metodický návod pro hnojení plodin. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.
- Urban J, Vašák J. 2014. Zemědělské systémy II. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních rostlin. Profi Press. Praha.
- Wendt JW. 1995. Evaluation of the Mehlich 3 soil extractant for upland Malawi soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 26:687-702.
- Wittwer SH, Taubner FG. 1959. Foliar absorption of mineral nutrients. Plant. Physiology 1:13-30.
- Withers PJA, Bradley RS, Jones DL, Healey JR, Talboys PJ. 2014: Feed the Crop Not the Soil: Rethinking Phosphorus Management in the Food Chain. Environmental Science Technology, 48:6523–6530.
- Wolf B, Snyder HG. 2003. Sustainable soils: The place of organic matter in sustaining soils and their productivity. Food product press. New York.

- Wolf B, Snyder HG. 2003. Sustainable soils: The place of organic matter in sustaining soils and their productivity. Food product press. New York.
- Woźniak A. 2019. Effect of Crop Rotation and Cereal Monoculture on the Yield and Quality of Winter Wheat Grain and on Crop Infestation with Weeds and Soil Properties. *International Journal of Plant Production* **13**:177-182. Available from <http://link.springer.com/10.1007/s42106-019-00044-w> (accessed February 2024).
- Woźniak A. 2020. Effect of Cereal Monoculture and Tillage Systems on Grain Yield and Weed Infestation of Winter Durum Wheat. *International Journal of Plant Production* **14**:1-8. Available from <http://link.springer.com/10.1007/s42106-019-00062-8> (accessed February 2024).
- Wuenscher R, Unterfrauner H, Peticzka Z, Zehenter F. 2015. A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant, Soil and Environment* **2**:86-96.
- Wu LH, Cheng MM, Li Z, Ren J, Shen LB, Wang SF, Luo YM, Christie P. 2012. Major nutrients, heavy metals and PBDES in soils after long-term sewage sludge application. *Journal of Soils and Sediments*.
- Zbiral J. 2016. Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant a proposal of critical values. *Plant, Soil and Environment* 527-531.
- Zimolka J. 2005. Pšenice: pěstování, hodnocení a užití zrna. Profi Press, Praha.
- Zpracování kalů. 2023. Available at <http://hgfl0.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/charakter.html> (accessed April 2024).