

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Vliv lokální aplikace hnojiv na výnos hrachu setého

Bakalářská práce

Autor práce: Tomáš Hrubý

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Černý, Ph.D.

© 2020 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vliv lokální aplikace hnojiv na výnos hrachu setého" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 7.7.2020

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jindřichu Černému, Ph.D. za poskytnutí pro mne velmi přínosných informací týkajících se výživy a hnojení polních plodin a také za ochotu a trpělivost při vedení této práce.

Dále děkuji své manželce a dětem za podporu, pomoc s pracovními povinnostmi a trpělivost, jež během posledních tří let prokázaly.

Vliv lokální aplikace hnojiv na výnos hrachu setého

Souhrn

V této bakalářské práci byl sledován vliv předseťové aplikace fosforu a dusíku na růstové a výnosové parametry rostlin hrachu setého.

Jako pokusné plochy byly zvoleny pozemky s velice nízkým obsahem rostlinám přístupných forem fosforu (průměrně 10,5 mg P.kg⁻¹ dle Mehlich 3). Bylo tak předpokládáno, že rostliny hrachu setého budou mít zvláště v počátcích růstu (přechod na autotrofní výživu—malý kořenový systém) problémy s dostatečným příjmem této živiny a budou omezeny v růstu.

Dalším předpokladem bylo, že nedostatek fosforu může omezit zásobování rostlin dusíkem v důsledku omezení kolonizace či činnosti rhizobiálních bakterií.

Aplikováno bylo hnojivo s obsahem fosforu převážně ve vodorozpustné formě a s obsahem dusíku v amonné formě (NH₄H₂PO₄). Na pozemek hnojený pouze dusíkem bylo aplikováno jednosložkové dusíkaté hnojivo s dusíkem ve formě (NH₂)₂CO. Hnojiva byla aplikována na široko a zapravena předseťovou přípravou půdy. Převážná část hnojiva byla zapravena do hloubky přibližně 0,02–0,05 m.

Po sklizni plodiny byl zaznamenán zvýšený obsah rostlinám přístupných forem fosforu především ve vrstvě půdy 0–0,05 m. Zvýšený obsah fosforu však byl zaznamenán až do hloubky 0,1 m.

Do růstové fáze BBCH 70 vykazovaly rostliny hnojené kombinací fosforu a dusíku ve srovnání s nehnojenými rostlinami a rostlinami hnojenými pouze dusíkem vždy vyšší hmotnost vytvořené nadzemní biomasy a následně i vyšší hmotnost semen. V růstové fázi BBCH 22 vytvořily rostliny na pozemku hnojeném kombinací fosforu a dusíku o 42,6 % vyšší hmotnost nadzemní biomasy a v růstové fázi BBCH 70 o 42,3 % vyšší hmotnost semen než rostliny nehnojené. Do růstové fáze BBCH 89 však rostliny na tomto pozemku především díky vyšší délce lodyh a vyšší hmotnosti semen výše umístěných na lodyhách polehly. Díky tomuto stavu rostliny následně vykazaly mezi BBCH 70 a BBCH 89 pouze 101 % nárůst hmotnosti semen. Rostliny nehnojené nepolehly a zvýšily v tomto časovém rozmezí hmotnost svých semen o 255 %.

Rostliny hnojené pouze dusíkem vykazovaly do růstové fáze BBCH 70 vždy nižší hmotnost nadzemní biomasy a následně i semen než rostliny hnojené kombinací dusíku a fosforu, ale zároveň vždy vyšší hodnoty těchto parametrů než rostliny nehnojené. Do růstové fáze BBCH 89 však také polehly, ale s nižší intenzitou než rostliny hnojené kombinací fosforu a dusíku. Díky polehnutí tak rostliny hnojené fosforem a dusíkem poskytly nejnižší výnos semen, rostliny hnojené dusíkem střední a rostliny nehnojené poskytly nejvyšší výnos semen.

Tři měsíce po předseťové aplikaci 26 kg N.ha⁻¹ ve formě (NH₂)₂CO vykazovaly rostliny hrachu setého vyšší hmotnost nadzemní biomasy, vyšší hmotnost semen, vyšší počet lusků na rostlinách, vyšší počet semen v lusku a vyšší délku lodyh než rostliny nehnojené.

Klíčová slova: fosfor, hrách setý, výnos, polní pokus

Effect of local fertilizer application on field pea yield

Summary

The Bachelor's thesis examined the effect of pre-sowing application of phosphorus and nitrogen on growth and yield parameters of field pea plants.

Parcels with very low levels of plant accessible phosphorus (10,5 mg P.kg⁻¹ according to Mehlich 3 on average) were chosen to be the experimental areas. Field pea plants in the initial growth in particular (transition to autotrophic nutrition – small root system) were expected to have problems getting sufficient amount of this nutrient and their growth would therefore be limited.

It was also expected that the lack of phosphorus can limit nitrogen supply to the plants as a result of colonization or activity of Rhizobium bacteria.

A fertilizer with phosphorus in predominantly water-soluble form and nitrogen in the form of ammonium (NH₄H₂PO₄) was applied. The parcel fertilized only with nitrogen was treated with a straight nitrogenous fertilizer containing nitrogen in the form of (NH₂)₂CO. The fertilizers were applied widely and through pre-sowing soil preparation. The major part of the fertilizer was applied in the depth of approximately 0.02–0.05 m.

After the harvest, increased amount of plant accessible phosphorus was registered, mainly in the soil layer of 0–0.05 m. However, increased amount of phosphorus was registered within a depth of 0.1 m.

Up to BBCH 70 growth stage, plants fertilized with a combination of phosphorus and nitrogen, compared to unfertilized plants and plants fertilized only with nitrogen, always had higher weight of the above-ground biomass created and subsequently also higher weight of the seeds. The plants on the parcel fertilized with the combination of phosphorus and nitrogen created by 42.6% higher weight of the above-ground biomass in BBCH 22 growth stage and by 42.3% higher weight of seeds in BBCH 70 growth stage than the unfertilized plants. However, the plants on this parcel flattened before BBCH 89 growth stage, mainly because of higher stalk length and higher weight of seeds on the stalks. For this reason, the plants had only 101% seed mass increase between BBCH 70 and BBCH 89 growth stages. The unfertilized plants didn't flatten and within that period of time, they increased the seed mass by 255%.

The plants fertilized only with nitrogen always had lower weight of the above-ground biomass and the seeds up to BBCH 70 growth stage than the plants fertilized with the combination of nitrogen and phosphorus, but at the same time had higher values of these parameters than the unfertilized plants. However, they flattened as well by BBCH 89 growth stage, even though with lower intensity than the plants fertilized with the combination of phosphorus and nitrogen. Because of the flattening, the plants fertilized with phosphorus and nitrogen provided the lowest seed yield, the plants fertilized with nitrogen provided medium seed yield and the unfertilized plants provided the highest seed yield.

Three months after the pre-sowing application of 26 kg of N.ha⁻¹ in the form of (NH₂)₂CO, the field pea plants had higher weight of the above-ground biomass, higher weight of seeds, higher number of seeds in pods and higher lengths of stalks than the unfertilized plants.

Keywords: phosphorus, field pea, yield, field trial

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce a hypotéza.....	10
3	Literární rešerše.....	11
3.1	Fosfor	12
3.1.1	Fosfor v orníční a podorníční vrstvě půdy.....	12
3.1.1.1	Anorganický fosfor v půdě.....	12
3.1.1.2	Fosfor v půdní organické hmotě.....	13
3.1.1.3	Sorpce fosforu.....	15
3.1.1.4	Stanovení přístupného fosforu v půdě, Olsen P a Mehlich 3.....	16
3.1.2	Fosfor v rostlině.....	17
3.1.2.1	Hlavní fosforečné sloučeniny a jejich úloha v rostlině.....	18
3.1.2.2	Příjem fosforu kořeny rostlin.....	20
3.1.2.3	Mimokořenová výživa.....	23
3.1.2.4	Vnější projevy nedostatku fosforu v rostlinách.....	24
3.2	Hrách setý polní.....	25
3.2.1	Význam, botanická charakteristika rostlin, způsob pěstování.....	25
3.2.2	Kořenový systém hrachu.....	26
3.2.2.1	Symbiotická fixace dusíku.....	26
3.2.2.2	Výnosová odezva hrachu na aplikaci fosforu.....	28
3.3	Hnojiva obsahující fosfor.....	29
3.3.1	Historie výroby a používání	29
3.3.2	Hlavní zdroje pro výrobu hnojiv.....	30
3.3.3	Minoritní zdroje.....	31
3.3.4	Minerální hnojiva obsahující fosfor.....	32
3.3.4.1	Způsob aplikace.....	32
3.3.4.2	Hnojiva s fosforem rozpustným ve vodě.....	33
3.3.4.3	Hnojiva s fosforem nerozpustným ve vodě.....	33
3.3.4.3.1	Hyperfosfáty.....	33
3.3.4.4	Hnojiva s fosforem rozpustným v neutrálním citranu amonném....	34
3.3.4.5	Další minerální hnojiva obsahující fosfor.....	34
3.3.4.6	Hnojiva pro foliární aplikaci fosforu.....	34
3.3.4.7	Fosfor v organických a ostatních hnojivech.....	34
3.3.4.8	Bilance fosforu.....	35
4	Metodika.....	36
4.1	Pokusná lokalita.....	36
4.2	Způsob založení a vedení pokusu.....	37
4.2.1	Založení a agrotechnika pokusných pozemků.....	37
4.2.2	Stanovení obsahu přístupného fosforu v půdě.....	39
4.2.3	Odběr rostlinných vzorků a způsob hodnocení rostlin.....	39
5	Výsledky.....	41

5.1	Změny obsahu rostlinám přístupného fosforu v půdě.....	41
5.2	Vývoj rostlin na jednotlivých pokusných pozemcích.....	42
5.2.1	Výsledky v růstové fázi BBCH 22.....	42
5.2.2	Výsledky v růstové fázi BBCH 70.....	43
5.2.3	Výsledky v růstové fázi BBCH 89.....	47
5.2.4	Výsledky sklizně.....	49
6	Diskuze.....	51
6.1	Navýšení obsahu rostlinám přístupného fosforu v půdě.....	51
6.2	Reakce rostlin na hnojení fosforem.....	53
6.2.1	Parametry rostlin v růstové fázi BBCH 22.....	53
6.2.2	Parametry rostlin v růstové fázi BBCH 70.....	54
6.2.3	Parametry rostlin v růstové fázi BBCH 89.....	55
6.2.4	Výsledky sklizně.....	56
7	Závěr.....	57
8	Literatura.....	58
9	Samostatné přílohy.....	I

1 Úvod

Fosfor je z pohledu výživy rostlin makroprvek. Pro svůj zdárný vývoj jej rostliny potřebují přijmout relativně velké množství a v rostlinných tělech má i relativně velké zastoupení. Rostliny přijímají fosfor především kořenovým vlášením z půdního roztoku. V tomto roztoku se však díky rychlé sorpci a začlenění do stabilnějších sloučenin nachází v porovnání s ostatními makroprvky jen malé množství jeho rostlinám přijatelných forem. Vzhledem k relativně vysoké ceně fosforečných hnojiv a méně patrným projevům deficitu tohoto prvku na rostlinách je často nedostatečně nahrazován jeho export sklizněmi a tím dále klesá množství této živiny v půdním roztoku.

Rostliny na tento stav reagují tvorbou objemnějšího a hustšího kořenového systému (zvětšení absorpční plochy). Zároveň zvyšují exkreci kořenových exudátů, zvláště kyselin a enzymů (fosfatáz). Tímto způsobem urychlují uvolňování fosforu z anorganických vazeb a hydrolyzu fosforu v půdní organické hmotě. Postupně je také mezi kořeny rostlin a hyfami určitých druhů půdních hub navazována symbióza. Tím se násobně zvyšuje plocha absorpce fosforu z půdního roztoku rostlinami i množství vylučovaných fosfatáz (fosfatázy vylučují i houby).

Z uvedeného vyplývá, že rostliny dokáží v případě potřeby vytvořit mechanismy, kterými si zajistí dostatečný přísun fosforu i v podmínkách jeho jinak snížené dostupnosti. Tvorba těchto mechanismů je však energeticky, hmotově a časově náročná. Zvláště mladé rostliny, které po vyčerpání zásobního fosforu ze semen přecházejí na autotrofní výživu a nemají dostatečně vyvinutý kořenový systém a listovou plochu tak nemají možnost, jak se s nedostatkem fosforu ve svém okolí dostatečně vyrovnat.

Hrách setý má podle mnohých autorů dobrou osvojovací schopnost fosforu a to i z méně rozpustných sloučenin. Tato schopnost je dána agresivitou a množstvím vylučovaných kořenových exudátů. Plně rozvinuta je však až při dostatečném zásobení rostlin symbioticky fixovaným dusíkem, tedy zhruba čtyřicet dní po navázání symbiózy s hlízkovými bakteriemi. První hlízky se však na hlavním kořínku hrachu objevují již osmý den po vzejití. Po přechodu na autotrofní výživu tak mladé rostliny hrachu potřebují zajistit dostatek fosforu nejen pro růst vlastních kořenů, ale i pro tvorbu hlízek a potřeby v nich uzavřených bakterií.

Předseťové hnojení, spolu s běžně dostupným mělkým zapravením, dostatečnou vlhkostí půdy v brzkém jarním období a aplikací vodorozpustných forem fosforu tak může přechodně zvýšit koncentraci této živiny v půdním roztoku. To by mělo rostlinám pomoci překonat kritické období nedostatku fosforu v důsledku malého kořenového systému a také následně umožnit optimální kolonizaci jejich kořenů rhizobiálními bakteriemi (zajistit přísun dusíku).

Rostliny hrachu optimálně zásobené dusíkem by v pozdější fázi vegetace již měly produkovat větší množství exudátů a snáze si zajistit dostatečné množství tohoto prvku pro své potřeby i potřeby symbiontů.

V konečném důsledku by přechodný dostatek fosforu v půdním prostředí na počátku vegetace měl umožnit rostlinám hrachu rychleji rozvinout svoji dobrou osvojovací schopnost této živiny a poskytnout vyšší výnos semen.

2 Cíl práce a hypotéza

Cílem práce bylo vyhodnotit, zda na orné půdě s velmi nízkým obsahem rostlinám přijatelného fosforu způsobí předseťově aplikovaný a mělce zapravený fosfor v převažující vodorozpustné formě kladné odezvy růstových a výnosových parametrů rostlin hrachu setého.

Na stejném stanovišti byl zároveň hodnocen vliv předseťové aplikace dusíku na rostliny hrachu setého.

Dále byl sledován vliv aplikace fosforu na změnu obsahu jeho přístupných forem v různých vrstvách orničního profilu.

Hypotéza: Předpokládá se, že jarní předseťová aplikace fosforu zvýší výnos semen hrachu setého na půdách s nízkým obsahem přístupného fosforu.

3 Literární rešerše

3.1 Fosfor

Bařek (1918) uvádí, že roku 1669 se učený kupec a alchymista Heining Brand zabýval destilací zbytků po odpařování moči, z nichž prý chtěl vyrobiti umělé zlato. Objevil při tom látku, která bez předchozího osvětlení ve tmě zářila. Dle této vlastnosti pak onu látku nazval řeckým slovem Phosphorus, doslovně přeloženo světlo nesoucí, volněji světlonoš. Dále uvádí, že kolem roku 1770 objevil švédský chemik Johan Gottlieb Gahn fosfor v kostech a spolu se svým kolegou stejné národnosti Carlem Vilhelmem Scheelem jej také z kostí vyrobil. Oproti moči má fosfor v kostech výrazně větší zastoupení. Schneider et al. (1959) uvádí, že odtučněné (vypařené) kosti obsahují 20-22 % P_2O_5 , tedy kolem 9 % fosforu. Oproti tomu v moči, kterou použil Heining Brand, se nachází pouze 0,1 % P_2O_5 (Duchoň 1948). Což je v přepočtu asi 0,044 % fosforu. Do poloviny devatenáctého století tedy jako surovina pro získávání této látky sloužily kosti a podle nich byl v českých zemích fosfor nazýván kostíkem.

Jako prvek tuto látku definoval francouzský vědec, šlechtic a daňový úředník Antoine-Laurent de Lavoisier (Lefèvre 2018).

Dle Dolejškové et al. (2000) rozeznáváme tři základní modifikace elementárního fosforu, které jsou navzájem odlišné typem krystalové soustavy, případně fyzikálními či chemickými vlastnostmi.

Bílý fosfor je bílá, při pokojové teplotě voskově měkká látka, která chladnutím křehne. Vytváří jednotlivé čtyřatomové molekuly P_4 (tetraedry). V současnosti se získává kondenzací svých par vznikajících při reakci fosforečnanu vápenatého s oxidem křemičitým a uhlíkem. Z praktického pohledu se jedná o redukci fosforitů pomocí koksu a křemene v elektrické peci (Peč & Pečová 2001). Taje při 44,1 °C. Je velmi reaktivní a prudce jedovatý. Rozpouští se v sirouhlíku a nerozpustný je ve vodě. Pro jeho vysokou reaktivitu se vzdušným kyslíkem (samozápalnost) je ve vodě také uchováván.

Červený fosfor vzniká delším zahříváním bílého fosforu na 400 °C v inertní atmosféře. Má polymerní řetězovitou strukturu P_n , je málo reaktivní, nerozpustný, není jedovatý, ani samozápalný. Při reakci se silnými oxidačními činidly reaguje explozivně.

Černý fosfor vzniká zahříváním bílého fosforu za velmi vysokého tlaku či v přítomnosti katalyzátoru. Má vysoce polymerní vrstevnatou strukturu. Vzhledem i elektricko vodivostí se podobá grafitu (Kulveitová 2003).

V přírodě se však žádná z forem elementárního fosforu volně nevyskytuje, prvek je zde vždy vázán v minerálních či organických sloučeninách.

V tuhé části zemské kůry (litosféra) je fosfor zastoupen cca 0,1 %, v biosféře jeho obsah kolísá od 0,1 do 1 % (Balík et al. 2002).

3.1.1 Fosfor v orniční a podorniční vrstvě půdy

Celkový obsah fosforu v orniční vrstvě kolísá v rozmezí od 0,01 do 0,15 %. Na rozdíl od nižších vrstev litosféry je zde vázán nejen v anorganických, ale i v organických sloučeninách. Podíl organicky vázaného fosforu činí 3–80 %, je odvislý od půdně-klimatických podmínek, množství biomasy pěstovaných plodin a intenzity používání statkových hnojiv (Balík et al. 2008).

3.1.1.1 Anorganický fosfor v půdě

Vyvřelé minerály a usazeniny s významným obsahem fosforu

Primární zdroj fosforu v půdě představují především magmatické apatity. Tyto minerály jsou rozptýleny ve vyvřelých horninách, kde se vyskytují v různých formách jako fluor, chlor a hydroxylapatity (Vaňek et al. 2016). V menší míře se vyskytují sloučeniny fosforu s železem a manganem (triplity).

Sedimentací se pak vytvořily vodnaté sloučeniny hliníku (wavellity) a v zamokřených neprovzdušněných půdách fosforečnanů železnatých (vivianity) (Richter 2007).

Dále mohou být v půdě ve větší míře přítomny různé druhy fosforitů (viz kap. 3.3.2).

Tab. 1–Významné minerály v půdě sestupně dle četnosti zastoupení v zemské kůře (Schneider 1959, Čvančara 1962, Balík et al. 2002, Richter 2007)

Primární magmatické minerály dle četnosti výskytu	Chemický vzorec	% P (vypočtené, složení se může lišit dle příměsí)
Horniny vyvřelé a metamorfované		
Fluorapatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	18,4 (+ F 3,8)
Chlorapatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	17,9
Hydroxylapatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	18,5
Triplit	$(\text{MnFeMgCa})_2(\text{PO}_4)(\text{F},\text{OH})$	14,0
Horniny usazené		
Wavellit	$\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH},\text{F})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	15,3
Vivianit	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	12,3

Sekundární fosforečné minerály vzniklé chemickou sorpcí fosforečnanů z půdního roztoku

Zvětváním primárních fosforečných minerálů a následnou reakcí jejich oxidů s vodou vzniká především kyselina trihydrogenfosforečná (H_3PO_4). Ta ve vodě hydrolyzuje na dihydrogen, hydrogen a fosforečnanové anionty (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), které jsou buď přímo přijaty rostlinami, nebo velmi rychle vstupují do sloučenin s ionty železa, hliníku, či vápníku. Sloučeniny s vápníkem a v počátečních fázích i sloučeniny s hliníkem a železem jsou v běžných podmínkách dobře rozpustné, a slouží tak jako jeden ze zdrojů fosforečné výživy rostlin (Vaňek et al. 2016).

Tab. 2–Významné sekundární minerály v půdě sestupně dle rozpustnosti, upraveno dle (Richter 2007, Vaňek 2016)

Sekundární minerály dle rozpustnosti	Chemický vzorec	Rozpustnost v prostředí
Dihydrogenfosforečnan vápenatý	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	kyselé
Hydrogenfosforečnan vápenatý	CaHPO_4	kyselé
Oktokalciumfosfát	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$	kyselé
Fosforečnan vápenatý	CaHPO_4	kyselé
Variscit	$\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$	počáteční amorfní formy v neutrálním až zásaditém, krystalický málo rozpustný
Strengit	$\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$	počáteční amorfní formy v neutrálním až zásaditém, krystalický téměř nerozpustný

Anorganický, rostlinám přístupný fosfor v půdním roztoku

Rostliny přijímají fosfor z půdního roztoku ve formě dihydrogenfosforečnanů (H_2PO_4^-), hydrogenfosforečnanů (HPO_4^{2-}) a částečně fosforečnanů (PO_4^{3-}). Z důvodu rychlé sorpce těchto aniontů nejen do chemických vazeb, ale i na půdní částice je jejich koncentrace v půdním roztoku velice nízká. V orniční vrstvě půd ČR se pohybuje většinou pod $0,5 \text{ mg P.l}^{-1}$ (Vaňek et al. 2002). V podorničním roztoku je tato hodnota ještě nižší, pohybuje se v rozmezí $0,1\text{--}0,01 \text{ mg P.l}^{-1}$ a s hloubkou se snižuje (Balík et al. 2002).

Toto potvrzují i Read & Campbell (1981), kteří připisují zvýšený obsah přijatelného fosforu ve spodních vrstvách půdy na fosforem značně hnojených půdách tomu, že se do podorničí dostal z odumřelých kořenů rostlin pšenice, které fosfor ve zvýšené míře obsahovaly.

Nejlépe přístupný rostlinám je dihydrogenfosforečnanový aniont (H_2PO_4^-) (Dolejšková et al. 2015).

Při pH 6 je poměr mezi H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} 9 : 1, při pH 8 je tento poměr 1 : 9 (Balík et al. 2008). Při pH 5 je většina fosforu v půdním roztoku přítomna ve formě H_2PO_4^- (Tlustoš et al. 2002). Nejprůzračnější pH, z pohledu co nejvyššího uvolňování a co nejnižší sorpce leží v rozmezí 6,2–6,5 (Balík et al. 2002). V tomto rozmezí pH je ve většině typů půd ČR uvolněno nejvíce rostlinám přístupných fosforečnanů do půdního roztoku.

3.1.1.2 Fosfor v půdní organické hmotě

Odumřelá organická hmota v půdě představuje 1–5 % jejího objemu (Šarapatka 2014). Díky rozdílné intenzitě mineralizačních procesů, variabilitě v množství rostlinného pokryvu, množství mikrobiální masy či vstupů statkových hnojiv se podíl fosforu vázaného v této hmotě pohybuje v rozmezí 3–80 % z jeho celkového obsahu v půdě.

Půdní organickou hmotu lze rozdělit na primární organickou hmotu (čerstvě odumřelé zbytky organismů či produkty jejich metabolismu), meziprodukty rozkladu a syntézy (organická hmota v různém stupni mineralizace plus nově vzniklé nestabilní látky) a sekundární humusové látky (nově vzniklé stabilní makromolekulární látky, produkty humifikace).

V čerstvé primární organické hmotě je obsah fosforu v rozmezí 0,02–0,4 %. Například sláma obilovin obsahuje 0,1 % fosforu (Vaňek et al. 2016). Tato hmota je z 90 % mineralizována a

slouží tak jako zdroj fosforečné výživy. Zbylá část je transformována v procesu humifikace do sekundárních humusových látek. Tyto látky jsou již stabilní a rozkladu téměř nepodléhají. Některé obsahují fosfor v chemických (esterových) vazbách, ale většinou ho absorbují na svém povrchu výměnnou sorpcí.

Z jednotlivých organických fosfátů jsou v půdním prostředí nejvíce zastoupeny (až 50 %) soli kyseliny inositolhexafosforečné (fytové), které se souhrnně označují jako fytiny. Anionty těchto solí mohou být v půdě sorbovány stejně jako ortofosforečnanů. V kyselých půdách se tak slučují s hliníkem a železem, v zásaditých s vápníkem (Richter & Hlušek 1999).

Tím zabírají vazebné pozice ortofosforečnanů, což má kladný vliv na jejich množství v půdním roztoku.

Především sloučeniny fytinových solí s železem a hliníkem dále vstupují do komplexů sekundárních humusových látek, ve kterých je vázán jejich značný podíl.

Oproti dřívějším předpokladům nejsou zdrojem těchto solí rostlinné zbytky, ale mají striktně mikrobiální původ (Balík et al. 2008).

Nukleové kyseliny tvoří 5–10% podíl. Fosfolipidy, fosfoproteiny a fosfocukry jsou v půdní organické hmotě zastoupeny 1–2 %. (Balík et al. 2002).

Fosfocukry a nukleotidy (zvláště ATP) jsou nejen zdrojem přístupného fosforu, ale díky snadno uvolnitelné chemické energii i katalyzátorem látkových přeměn v půdě.

Mineralizace organického fosforu

Rostlinám přístupné fosforečnanové anionty jsou z organické hmoty odštěpeny pomocí enzymů fosfatáz. Tento rozklad představuje jednoduchou hydrolyzu, která je uvedenými enzymy katalyzována. Fosfatázy jsou schopny produkovat jak rostliny, tak i mikroorganismy a houby.

Fosfatázy jsou obecně rozděleny na kyselé a alkalické. Optimální pH pro reakce kyselých fosfatáz leží v rozmezí 4–6, alkalické fosfatázy nejlépe reagují v rozmezí pH 9–11 (Balík et al. 2008).

Mineralizace organické hmoty může rostlinám zpřístupnit výraznou část potřebného fosforu. Nepřímým důkazem je jev, kdy brzy na jaře rostliny vykazují příznaky nedostatku této živiny, po oteplení a rozběhnutí biologické činnosti v půdě tyto příznaky postupně mizí (Balík et al. 2002).

Kolář & Kužel (2002) uvádějí, že nejrychleji jsou mineralizovány fosfocukry, nejpomaleji pak fytin.

Mineralizaci podléhají i stabilnější organické látky obsahující fosfor (zvláště fulvokyseliny).

Je však velmi pomalá, představuje rozklad 1–3 % humusových látek ročně (Šarapatka 2014).

Zapravené posklizňové zbytky však nemusí být ve všech případech zdrojem pohotového fosforu pro rostliny. Ha et al. (2007) uvádějí, že při sledování rozkladu zbytků zralého a mladého (zeleného) hrachu byl v půdním prostředí navýšen přístupný fosfor jen rozkladem mladých rostlin. Ze zralých rostlin se díky jejich menšímu obsahu snadněji rozložitelných látek

uvolňovalo jen tolik fosforu, kolik mikroorganismy sami využily. Pro rostliny byl tedy částečně přístupný až po jejich odumření.

Balík et al. (2008) uvádějí, že mrtvá mikrobiální biomasa uvolňuje fosfor mineralizací podstatně lépe než zbytky rostlin.

3.1.1.3 Sorpce fosforu

Fosfor je v půdě poután především těmito druhy sorpcí.

Chemická sorpce aniontů

Chemickou sorpcí vznikají především sloučeniny fosforu s ionty vápníku, hliníku a železa. Při pH půdy pod 5,5 a nad 6,8 se velice zrychluje tvorba méně rozpustných forem těchto sloučenin. V zásaditém až neutrálním prostředí probíhá chemická sorpce fosforečnanových aniontů s kationty vápníku (Ca^{2+}) za vzniku dihydrogenfosforečnanů vápenatých $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, hydrogenfosforečnanů vápenatých $\text{Ca}(\text{HPO}_4)$ a fosforečnanů vápenatých $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

Proces vzniku těchto sloučenin trvá dny až měsíce (Černý et al. 2020).

Fosforečnan vápenatý a hydrogenfosforečnan vápenatý pak tvoří stabilnější sloučeninu oktokalciumfosfát (Vaněk et al. 2016). Z této sloučeniny pak po letech vzniká pravděpodobně málo rozpustný apatit (Richter & Hlušek 1999). Tento proces bývá označován jako „retrogradace fosforu“.

V kyselých půdách se více uvolňují do půdního roztoku ionty železa a hliníku. Ty pak s fosforečnanovými anionty vytváří variscit $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ a strengit $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$.

Tyto sloučeniny se dále mohou transformovat na augelit $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{PO}_4$ a wavellit $\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH},\text{F})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Šarapatka 2014).

Strengit i variscit mají po vytvoření krystalové mřížky velmi malou rozpustnost a zvláště sloučeniny železa jsou pro většinu rostlin nepřijatelné (Vaněk et al. 2016). Tento proces bývá označován jako „zvrhávání fosforu“.

Oba tyto minerály však mohou v půdě prakticky vznikat až při $\text{pH} < 4$. Z pohledu trvalého zneprístupnění fosforu tak mají ve většině evropských půd malý význam (Balík 2002).

Fyzikálně chemická sorpce aniontů

Probíhá především v kyselém prostředí. V neutrálních půdách má výměnná sorpce aniontů vzhledem k relativně malému množství kladných nábojů zastoupení pouze 1–5 % z celkové výměnné sorpce (Richter & Hlušek 1999).

Je umožněna vznikem kladných nábojů na koloidních micelách hydratovaných oxidů železa a hliníku, kdy dochází k disociaci některých funkčních skupin (OH^-), které jsou pak nahrazeny aniontem dihydrogenfosforečnanu (Jan et al. 2015).

Tento proces je velice rychlý, trvá minuty až hodiny (Černý et al. 2020).

Počáteční amorfní formy těchto sloučenin jsou považovány za aktivní. Při navýšení pH opět vydávají ortofosforečnany zpět do půdního roztoku (Dufková et al. 2016).

Značný podíl amorfních Al a Fe sloučenin fosforu dále tvoří komplexy s huminovými kyselinami a fulvokyselinami (Balík et al. 2008). Fosfohumátové komplexy pak zabraňují „zvrhávání fosforu“ do stabilnějších sloučenin. Pohyblivé fulvokyseliny navíc dokáží doslova rozvézt málo pohyblivý prvek půdním prostředím (Kolář & Kužel 1999).

Biologická sorpce fosforu

Fosfor je touto sorpcí vázaný v živých a odumřelých tělech mikroorganismů. Množství takto vázaného fosforu představuje nejčastěji 2–5 % z veškerého organicky poutaného fosforu v půdě. V půdách trvalých travních porostů však může být toto zastoupení až 25 %. Množství fosforu poutaného mikroorganismy tvoří v Ap horizontu přibližně 60–120 kg·ha⁻¹. Těla mrtvých mikroorganismů jsou v půdě mineralizována během několika týdnů, fosfor je tak z nich uvolňován snadněji, než z ostatních částí organické hmoty (Balík et al. 2002).

3.1.1.4 Stanovení obsahu přístupného fosforu v půdě, Olsen P a Mehlich 3

Tyto metody jsou založeny na extrakci rostlinám přístupného fosforu z půdního vzorku extrakčním činidlem. Olsen P je zhruba o 60 % slabší extrakční činidlo než Mehlich 3, ve stanovení množství přístupného fosforu však spolu oba postupy těsně korelují (Černý et al. 2020).

K vyhodnocení získaného výluhu se v současné době nejčastěji využívá emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP–OES). Principem této metody je excitace elektronů sledovaného prvku teplotou 6 000–10 000 K. Tyto elektrony při návratu do původního energetického stavu emitují světlo o specifické vlnové délce. Intenzita záření pak odpovídá množství sledovaného prvku ve zkoušeném vzorku.

Osen P

Tato metoda byla vyvinuta Sterlingem R. Olsenem a jeho spolupracovníky v roce 1954. Používá se především ve středu a na severozápadě Spojených států amerických, dále pak v Německu, Rakousku a Anglii.

Jedná se o silně alkalický roztok (pH 8,5) o koncentraci 0,5 mol·l⁻¹ hydrogenuhličitanu sodného (NaHCO₃). Metoda extrakce je založena na slučování uhličitanů činidla s kationty vápníku, následně vzniklé uhličitanové vápenaté reagují s ionty železa a hliníku. Tím je uvolňován fosfor jak z vazeb s vápníkem, tak i z vazeb s železem a hliníkem.

Tato metoda je nejvhodnější pro stanovení množství přístupného fosforu na silně vápenatých půdách (obsah vápníku > 2 %).

Extrakce 10 mg P·kg⁻¹ půdy touto metodou je obecně považováno za dostatečný obsah rostlinám přístupného fosforu v půdě (Kovar & Pierzynski 2009).

Mehlich 3

A. Mehlich vyvinul tuto metodu v r. 1984 jako náhradu za metodu Mehlich 2. Cílem vývoje nového činidla bylo výrazně zvýšit extrakci mědi a dalších mikroprvků (Mn, Zn, Fe) a zároveň zachovat nebo rozšířit škálu vhodných půd k analýze tímto činidlem (Mehlich 1984). Kromě

zmíněných mikroprvků lze s jeho pomocí stanovit obsahy rostlinám přístupných forem fosforu, draslíku, vápníku, hořčíku, síry a hliníku. V současné době je používán ve Spojených státech amerických, Kanadě, jižních státech Evropské unie, ale i v České republice.

Jedná se o kyselý roztok (pH 2,5), který je složen z 0,2 mol.l⁻¹ kyseliny octové (CH₃COOH), 0,25 mol.l⁻¹ dusičnanu amonného (NH₄NO₃), 0,015 mol.l⁻¹ fluoridu amonného (NH₄F), 0,013 mol.l⁻¹ kyseliny dusičné (HNO₃) a 0,001 mol.l⁻¹ kyseliny edetové (EDTA).

Díky obsahu kyseliny octové je dobře uvolňován přístupný fosfor ve většině půd. Na alkalických půdách také není kyselost tohoto činidla tolik neutralizována obsaženými uhličitany.

Při obsahu 40–60 mg P.kg⁻¹ půdy stanoveném touto metodou již není výnos pěstované plodiny pozitivně ovlivňován fosforečným hnojením a stačí pouze doplňovat fosfor odebraný sklizněmi (Vaněk et al. 2002). Z důvodu možných negativních vlivů na přijatelnost fosforu rostlinami (půdní sucho, chlad, odklon pH od rozmezí cca 6–7, množství a aktivita půdních mikroorganismů) či opomenutí nahrazovacího hnojení je vhodné udržovat obsah přijatelného fosforu v půdě na vyšší hodnotě. Dle Vaňka et al. (2016) je z těchto důvodů pro většinu půd ČR optimální obsah rostlinám přijatelných forem fosforu cca 80 mg.kg⁻¹.

Dle Matuly (2012) není vhodné zvyšovat tuto hodnotu nad 90 mg P.kg⁻¹, neboť je i přes silnou sorpci zvyšován obsah fosforu v půdním roztoku a hrozí jeho vyplavení (eutrofizace vod).

Na vysoce alkalických půdách s pH (KCl) > 7 a extrahovatelným obsahem Ca > 4 000 mg.kg⁻¹ se použití této metody nedoporučuje (Zámečnicková et al. 2013).

3.1.2 Fosfor v rostlině

Pro rostliny je fosfor živinou, což znamená, že je nezbytnou a nezastupitelnou látkou, která má přímé zapojení v jejich metabolismu.

Po dusíku bývá označován za nejdůležitější prvek ve výživě rostlin.

Rostliny s dostatkem této živiny dříve přecházejí do generativní fáze, tvoří větší květenství, větší počet kvítků, květů, semen a dříve dozrávají (Vaněk et al. 2016).

Úloha fosforu spočívá především v akumulaci, přenosu a výdeji energie. Dále je součástí mnoha klíčových sloučenin podílejících se na procesech fotosyntézy, přenosu genetické informace, výstavby buněk a tvorby zásobních či stavebních látek. Fosfor je také důležitou součástí systémů zabezpečujících přenos signálů na vnitro i mezibuněčné úrovni (Pavlíková et al. 2008).

Obsah fosforu v sušině rostlin se v průměru během celé vegetace pohybuje v rozmezí 0,3–0,4 %. Díky takto vysokému obsahu je řazen mezi rostlinné makroprvky, či makroživiny.

Tato živina také tvoří nespalitelný podíl rostlin (popeloviny), mezi nimiž je obsažena v průměru 7–10 % (Čvančara 1962, Tlustoš et al. 2002).

V průběhu vegetace se celkový obsah tohoto prvku v rostlině snižuje. Jednak zde působí zředovací efekt, ale zároveň je více fosforu vydáváno ve sloučeninách kořenových exudátů.

Během zrání se fosfor přesouvá z jednotlivých částí rostlin do semen.

V semenech je následně lokalizováno 80 % z celkově přijatého množství fosforu během vegetace (Černý et al. 2020). Fosfor je zde uložen především ve formě fyтинových solí (cca 50 % uloženého P). Tyto soli pak slouží jako zásobní zdroj fosforu pro klíčící rostlinu.

Kritické období pro zásobení rostlin tímto prvkem nastává po vyčerpání fyтинových zásob a přecházení na autotrofní výživu. Pokud není dostatečně zastoupen přístupný fosfor v půdním roztoku, nedokáží si rostliny málo vyvinutým kořenovým systémem obstarat potřebné množství pro svůj optimální vývoj, tedy zvláště pro tvorbu mechanismů umožňujících jeho optimální čerpání z tohoto prostředí (je zpomalená rychlost fotosyntézy a buněčného dýchání a tím tvorba kořenů i jejich exudátů).

Tento nedostatek nastává díky tomu, že do bezprostředního prostoru kořenového vlášení (rhizosféry) se vodorozpustný fosfor dostává především difuzí, rozdíl koncentrací daný čerpáním rostlinou je pro dostatečný transport tímto způsobem a v tomto prostředí nízký. Symbiotické vztahy s mykorrhizními houbami ještě nejsou navázány a rostlina by zřejmě v této fázi vývoje neměla ani dostatek uhlíku a energie pro jejich udržení.

Fosforový stres na počátku vegetačního období má tedy obecně větší vliv na hospodářskou produktivitu rostlin, protože v pozdějších fázích růstu se s případným nedostatkem této živiny již rostliny dokáží lépe vyrovnat (dokáží ji efektivněji čerpat) (Grant et al. 2001).

Tab. 3–Obsahy fosforu v jednotlivých sklizňových produktech v % v přirozeném stavu, množství se liší dle úrovně přístupného P v půdě (Čvančara 1962, Vaněk et al. 2016, Škarpa et al. 2019)

Semena	% P	Kořeny a hlízy	% P	Zelená hmota	% P
Pšenice ozimá	0,37	Brambory	0,07	Hořčice před květem	0,02
Ječmen ozimý	0,26	Řepa cukrová	0,03-0,04	Řepka zač. květu	0,05-0,07
Oves	0,32	Mrkev krmná	0,08	Obilniny v květu	0,04-0,06
Řepka	0,72	Mrkev stolní	0,04	Hrách	0,07
Hořčice	0,64	Čekanka	0,03	Vojtěška zač. květu	0,04-0,07
Hrách	0,37–0,43	Topinampury	0,06	Tráva mladá	0,06

3.1.2.1 Hlavní fosforečné sloučeniny a jejich úloha v rostlině

Nukleotidy

Jsou tvořeny dusíkatou heterocyklickou bází, cukernou složkou a fosfátovým zbytkem kyseliny fosforečné.

Adenosintrifosfát (ATP) je syntetizován při světelné fázi fotosyntézy na vnějším stromatálním povrchu thylakoidní membrány gran chloroplastů. Jednak necyklickou fosforylací, kdy uvolněný elektron při své cestě z fotosystému II k fotosystému I díky své energii zapříčiní sloučení adenosindifosfátu (ADP) s kyselinou fosforečnou. Dále je syntetizován cyklickou fosforylací ve fotosystému I, kdy je zde excitovaný elektron uvolněn, zapříčiní syntézu ATP a vrací se zpět na molekulu chlorofilu stejného reakčního centra.

ATP je asimilát, tedy sloučenina, ve které je zachycená energie fotonů uložena do chemických vazeb. V tomto případě do vícenáobných (makroergických) chemických vazeb fosforu, které svou energii v případě potřeby snadno uvolňují.

Je také základním energetickým zdrojem pro syntézu škrobu (Tlustoš et al. 2008).

Dále ATP vzniká při rozkladu cukrů během buněčného dýchání, kdy zejména v noci nemůže být syntetizován a rostlina pro zachování života potřebuje energii nejen získat ze svých zásobních látek (cukrů), ale i transportovat do míst spotřeby.

Jedná se jakousi energetickou konzervu, která je v případě potřeby v buňce využita pro anabolické (syntéza látek) či osmotické (aktivní transport látek přes membrány) procesy vyžadující energii (Tlustoš 2016).

Nukleotidy nukleových kyselin jsou syntetizovány za účelem zachování a přenosu genomu organismu. Střídáním pořadí ve trojicích, záměnou těchto trojic a komplementaritou jejich purinových a pyrimidinových bází je tvořen genetický kód výstavby nové buňky. Tyto nukleotidy se nacházejí především v jádře buňky.

Fosfolipidy

Jedná se o sloučeniny karboxylové kyseliny, glycerolu a fosfátového zbytku kyseliny fosforečné. Tvoří hlavní součásti buněčných membrán. V membráně jsou uspořádány ve dvou vrstvách vždy lipidovými částmi k sobě a fosforečnou částí vně. Tím je vytvořena semipermeabilní (polopropustná) membrána, která oběma směry (do cytosolu a vně) propouští především vodu, kysličník uhličitý a kyslík. Vstup dalších potřebných látek pro buňku je zajištěn soustavou selektivních přenašečů. Tím je zabráněno průniku nežádoucích látek do vnitřního prostředí buňky.

V případě nedostatku fosforu se množství fosfolipidů snižuje a jejich místo zaujímají fosfor neobsahující glykolipidy. K této změně dochází rychleji u buňek kořenů, než v nadzemní biomase. Důsledkem je snížená odolnost rostlin proti vstupu patogenů do vnitrobuněčného prostoru. (Pavlíková et al. 2008).

Fytiny

Esterifikací cyklického alkoholu myoinositolu kyselinou fosforečnou vzniká kyselina fytová. Fytiny jsou soli, které vzešly z reakce mezi touto kyselinou a hořečnatými, nebo vápenatými kationty. Jedná se o zásobní látky sloužící k překonání nedostatku fosforu při klíčení nových jedinců a absenci dostatečné kořenové hmoty.

Kromě semen ukládají rostliny fytiny i do kořenů a hlíz. Z celkového obsahu fosforu obilných zrn je ve fytinových solích vázáno 60–70 %, semen vojtěšky 50 % a kořenů mrkve 15–23 % (Tlustoš et al. 2002).

Celkové množství přijatého fosforu rostlinami významně koreluje s obsahem fytinu v zru (Černý et al. 2020). Rostliny rostoucí v prostředí s trvalým nedostatkem fosforu tak budou produkovat potomstvo, které bude mít při klíčení k dispozici nižší množství této zásobní látky. Hydrolýzu fytinů během bopnutí a klíčení umožňují enzymy fytázy. Vysokou aktivitu fytáz vykazují semena žita, nižší pšenice, nízkou oves a bobovité luskoviny a nejnižší kukuřice (Vaňek et al. 2016).

Další významné sloučeniny v rostlině, které obsahují fosfor jsou fosfocukry, NADP, rubisco a fosfoproteiny.

3.1.2.2 Příjem fosforu kořeny rostlin

Fosfor (jako většinu živin) přijímá rostlina z půdního roztoku. Díky jeho nízké koncentraci v roztoku a relativně vysokému příjmu rostlinou je 93 % živiny transportováno k buňkám kořenového vlášení difuzí (Vaněk et al. 2016).

Transport do vnitrobuněčných prostor kořene a symplastických cest je však pomocí difuze nemožný. Koncentrace v buněčné cytoplazmě je sto až tisícinásobně vyšší, než koncentrace v půdním roztoku (Tlustoš et al. 2002). Rostliny tak musí mít mechanismus k překonání takto výrazného koncentračního gradientu.

Tento mechanismus je vysvětlován existencí tzv. protonových pump. Protonová pumpa je bílkovinný komplex v cytoplazmatické membráně, který enzymaticky štěpí ATP a uvolněnou energii využívá k navázání a transportu vodíkových protonů (H^+) z cytoplazmy buňky (proti koncentračnímu gradientu, pH cytoplazmy je cca 7,5, apoplastu cca 5,5). Pokud tato pumpa vykazuje afinitu vůči aniontům fosforu, přenáší je zároveň s vodíkem (antiportem) proti jejich koncentračnímu gradientu. Předpokladem přenosu je vytvoření komplexu přenášené látky s přenašečem (protonovou pumpou), který je v cytoplazmatické membráně difuzibilní (Hejnák et al. 2005).

Hydrolýzou uvolněná energie ATP je tak využita na transport protonů (H^+) přes buněčné membrány proti elektrochemickému potenciálu. Vzniklý rozdíl v chemickém (pH) a elektrickém potenciálu je využit pro transport fosforečných aniontů (Tlustoš et al. 2002).

Po vstupu do cytoplazmy buňky kořenového vlášení jsou fosforečné anionty dále transportovány již difuzně symplastickou cestou (skrz plazmodezmy) do xylémových cév.

V praxi tak může nastat situace, že nedostatek fosforu vykazují i rostliny, které mají k dispozici dostatek jeho přístupných forem, ale nedostává se jim energie pro transport přes cytoplazmatickou membránu. Jedná se především o teplomilné rostliny (kukuřice), u kterých asimilační procesy (poutání energie do ATP) startují až při vyšších teplotách (Tlustoš et al. 2002).

V případě nedostatku přístupného fosforu v půdním prostředí je prudce zvýšen růst kořenů na úkor nadzemní biomasy. Zvyšuje se nejen délka, ale i hustota kořenového vlášení a kořenová exudace. Rostlina tím zvýší absorpční plochu a uvolňování fosforu z méně přístupných vazeb. Zároveň také roste intenzita mykorhizní symbiózy.

Kořenová exudace

Kromě růstu kořenů je další rostlinou strategií pro zajištění si dostatečného množství této živiny kořenová sekrece specifických látek.

Do kořenů je transportováno velké množství organických látek, především sacharózy (30-60 % uhlíku čisté fotosyntézy) a až 40 % z tohoto množství (u jednoletých rostlin) je uvolněno ve formě exudátů (Vaněk et al. 2016).

Kořenové exudáty se skládají z vysokomolekulárních exudátů a nízkomolekulárních exudátů. Vysokomolekulární exudáty jsou především extracelulárně působící enzymy (ektoenzymy) a sliz na kořenové špičce (mucigel). Nízkomolekulární exudáty pak zahrnují organické kyseliny (citronová, jablečná, šťavelová), aminokyseliny včetně sideroforů (látek schopných přenášet železo), cukry a fenoly (Balík et al. 2008).

Ektoenzymy odštěpují fosfor z vazeb v organických sloučeninách. Sliz kořenové špičky pomáhá utvářet drobtovitou strukturu půdy a je spolu se sacharidy zdrojem potravy půdních mikroorganismů, které ektoenzymy také produkují. Kyselina citronová, jablečná a fenoly uvolňují fosfor z vazeb s hliníkem a železem (Fe^3 a Al cheláty).

Zvýšení kořenové exudace a tím koncentrace exudátů dosahují rostliny různými způsoby.

Například u dřeviny čeledi proteovité (*Proteaceae*) je navýšena exkrece a koncentrace kořenových exudátů zapříčiněno vývojem trsovitého kořenového vlášení (proteoidní kořeny). Tato strategie k získání jinak nedostupného fosforu byla pozorována i u lupiny bílé (*Lupinus albus*) a u některých zástupců čeledi přesličníkovité (*Casuarinaceae*) či akácie (*Acacia*) (Rob 1983).

Při sledování šesti genotypů jarní pšenice došli Wang et al. (2016) k závěrům, že při nízké koncentraci fosforu v půdním roztoku ($2 \mu\text{mol P.l}^{-1}$) byl sice výrazně omezen i růst kořenů, ale jejich poměr k nadzemní biomase byl vyšší než u varianty s obsahem $200 \mu\text{mol P.l}^{-1}$.

Dále zjistili, že u pěti genotypů vzrostla při nízké koncentraci fosforu poměrná hustota kořenového vlášení a u čtyř genotypů poměrná délka kořenového vlášení. S těmito rozdíly souvisela i rozdílná exudace. Hustější vlášení produkovalo více protonového iontu (H^+), delší vlášení produkovalo více organických kyselin (především kyseliny citronové) a také fosfatáz. Kořeny s řidším vlášením tedy kompenzovaly menší plochu příjmu exudací agresivnějších exudátů.

Fosfor je však rostlinami nejen přijímán, ale určitý podíl z tohoto příjmu je kořenovou exudací vždy vylučován (Vaněk et al. 2016).

Mykorhizní symbióza

Tímto termínem se označuje symbiotická asociace mezi houbou a hostitelem a to na kořenech vyšších rostlin (Rob 1985).

V přírodě je velice rozšířena, dalo by se říci, že je těžké najít rostlinu bez tohoto soužití. Mykorhizní houby se nejvíce vyskytují v provzdušněných A horizontech (Gryndler 2004). Mykorhizní houba čerpá energii ke své výživě a uhlík od hostitelské rostliny. Ta jí za to na oplátku dodává některé minerální látky (Balík et al. 2008).

Vlákna mykorhizních hub propojují vnitřní prostor kořene s půdním prostředím. Povrchová plocha příjmu živin z půdy je tak až 10x zvětšena (Šarapatka 2014).

Kolonizace mikorhizními houbami neprobíhá v celém kořeni, ale omezuje se na kořenovou pokožku (rhizodermis), což je nejsvrchnější vrstva buněk na povrchu kořene a (primární) kořenovou kůru, což je zpravidla několik dalších vrstev buněk pod kořenovou pokožkou (Gryndler et al. 2004).

Ning & Cumming (2001) uvádějí, že v prostředí s obsahem $20 \mu\text{mol P.l}^{-1}$ měly rostliny vousatice virginské (*Antropogon virginicus*), jejichž kořeny byly kolonizované arbuskulo mykorhizními houbami více jak dvojnásobný objem biomasy než nekolonizované rostliny, a že množství biomasy kolonizovaných a nekolonizovaných rostlin se vyrovnalo až při koncentraci $80 \mu\text{mol.l}^{-1}$. Dále uvádějí, že přírůstek biomasy je dán nejen zvětšením plochy kořene o hyfy hub, ale i tím, že rostliny nebyly nuceny investovat energii do zvýšené exudace jako jejich nekolonizované protějšky. Přínos této symbiomy pro rostlinu je tedy především v prostředí s nízkou koncentrací přístupného fosforu. Mykorhizní symbiont tak stojí na jednotku získaného fosforu rostlinu méně energie a hmoty, než by musela investovat do vlastních kořenů a axudátů (Tinker 1975).

Naopak v případě dostatku fosforu může nastat i situace, že kolonizované rostliny budou hůře prospívat než nekolonizované. Je to dáno tím, že v tomto případě symbiont nepřináší rostlině žádný prospěch, ale energii pro svůj život jí odebírá stále, mutualistické soužití se tak mění až na parazitické (Rob 1985).

Rozeznáváme několik různých typů tohoto soužití, kdy hyfy hub buď pronikají do vnitřního prostoru buněk hostitele, nebo se vyskytují pouze v mezibuněčných prostorách (intercelulárách) a do protoplastu nepronikají.

V některých případech jsou různé části kořenového systému téže rostliny kolonizovány houbami tvořícími různé typy mykorhiz. U topolu osikovitého (*Populus tremuloides*) byly například arbuskulární mykorhizy častější ve větších hloubkách v zemi, zatímco ektomykorhizy převládaly u povrchu půdy (Balík et al. 2008).

Ektomykorhizní symbióza je způsob soužití, při kterém houba do vnitřních prostor buněk neproniká. Houbou kolonizovaný úsek kořene je často zduřelý a výrazně tvarem odlišný od kořenů nekolonizovaných. V mezibuněčných prostorách kořenové pokožky tvoří hyfy hub tzv. Hartigovu síť a na povrchu kořene hustý hyfový plášť. Tato symbióza se vyskytuje téměř výhradně u dřevin.

Orchideoidní mykorhizní symbióza, zde hyfy hub kolonizují vnitřní prostor buněk kořenové kůry, kde tvoří smotky (pelotony). Kořenovou pokožkou houba pouze proniká. Tento typ soužití se vyskytuje pouze u orchidejí (*Orchidales*).

Erikoidní mykorhizní symbióza, zde houby opět pronikají do protoplastu buněk, ale na rozdíl od předešlého typu tvoří smotky především v buňkách kořenové pokožky. Vyskytuje se u vřesovcovitých rostlin (řád Ericales).

Arbuskulární mykorhizní symbióza je pravděpodobně nejvíce rozšířeným a nejvíce univerzálním typem mykorhizní symbiomy. Její výskyt se předpokládá u 95 % druhů cévnatých rostlin, které v současnosti na Zemi žijí (Gryndler et al. 2004).

Charakteristický je výskyt bohatě větvených hyf ve vnitrobuněčném prostředí (arbuskulostromečků), které však neperforují cytoplazmatickou membránu, ale pouze ji vychlipují, čímž

je zachována integrita vnitrobuněčného prostředí. Celé mycelium těchto hub je tvořeno jednou trubicovitou buňkou, v jejíž cytoplazmě se nachází obrovské množství jader. Hyfou přijatý fosforečný aniont je polymerizován, vzniklý polyfosfát je transportován cytolem hyfy v pohybujících se vakuolách do arbuskul, zde je hydrolyzován do původní formy a předán rostlině.

Javot et al. (2006) uvádějí existenci specializovaných proteinových přenašečů (Pht 1 I, Pht1 III) pouze pro přenos mykorhizního fosforu. Dále uvádějí, že životnost arbuskuly (a tím i hyfy) je pouze 8,5 dne a že vitalita rostlinné buňky není smrtí arbuskuly změněna.

Li et al. (1991) uvádějí, že ve 20 mm ohraničené zóně kolem kořene, ve které byl zamezen průnik kořenů, ale umožněn rozvoj jejich arbuskulo mykorhizních symbiontů výrazně a rovnoměrně klesl obsah přístupného fosforu. Dále uvádějí, že v oblasti, do které již hyfy hub nemohly proniknout obsah fosforu rychle stoupl na původní koncentraci v roztoku. Fosforečné anionty se jednotlivými oblastmi pohybovaly bez omezení.

Rob et al. (1985) uvádí, že arbuskulární mykorhiza dokáže rostlinám dopravit fosfor až ze vzdálenosti 0,07 m od jejich kořene.

Genava et al. (2006) uvádějí, že koinokulace rhizobiálními bakteriemi (*Rhizobium*) a arbuskulárně mykorhizní houbou (*Glomus mosseae*) vedla u hrachu setého (*Pisum sativum*) v půdě se obsahem 13,2 mg P.kg⁻¹ k cca dvojnásobnému obsahu fosforu v rostlině, 50% nárůstu kolonizace kořenů rhizobii a 30% nárůstu biomasy rostliny oproti rostlinám očkovaným pouze rhizobii.

3.1.2.3 Mimokořenová výživa

Tímto termínem je označována aplikace roztoku živin na nadzemní orgány rostlin. Většinu plochy těchto orgánů tvoří listy, proto se můžeme setkat s termínem „foliární výživa“.

Z pohledu zajištění výživy rostlin fosforem (i ostatními makroživinami) se však jedná pouze o doplňkový způsob, který výraznější deficit této látky v půdě nedokáže nahradit.

Při doporučené 2% koncentraci rozpuštěného trojitého superfosfátu ve 400 litrové postřikové jíše dodáme jen cca 1,6 kg P.ha⁻¹ (Finck 1982). Lépe rozpustným Amofosem v totožné jíše a koncentraci dodáme cca 1,8 kg P.ha⁻¹. Aplikací 5 l.ha⁻¹ foliárního hnojiva Retafos prim dodáme 0,545 kg P.ha⁻¹.

Potřeba většina u nás pěstovaných plodin však představuje 20–30 kg P.ha⁻¹.rok⁻¹ (Pavlíková et al. 2008).

Pokud nám fosfor v roztoku na listu ihned nezaschne, musí překonat kutikulu. Ta sice obsahuje hydrofilní póry v dostatečném počtu (10¹⁰.cm⁻¹) i velikosti (do 1 nm), ale jejich okolí je lemováno negativními skupinami (především polygalakturonových kyselin) a jejich hustota se směrem dovnitř zvětšuje. Rostlinou přijatelné ortofosforečnanové anionty jsou tak z pórů vytěšňovány. Nejvyšší koncentrace pórů je v okolí průduchů. Průduchy však mají pro průnik živin jen omezený význam, neboť i jejich vnitřní části jsou kutikulou pokryty. Důkazem malého významu průduchů je i zvýšení příjmu prvků z foliární výživy aplikované v noci, kdy jsou průduchy uzavřené (Balík et al. 2009).

Pro vstup do symplastu pak aniont, stejně jako u buněk kořene vyžaduje specifické přenašeče a dodání energie. Následně je symplastem transportován do floému, vstoupí do vakuol či je využit v metabolismu. Transportní a úložná místa v listech však nejsou na vysoký příjem fosforu uzpůsobeny, brzy tak klesá rychlost listové absorpce.

To potvrzují i Koontz & Biddulph (1957), kteří uvádějí, že po 24 hodinách od aplikace roztoku 10 mmol.l⁻¹ dihydrogenfosforečnanu sodného (NaH₂PO₄) bylo listem fazole absorbováno cca 45 % aplikovaného fosforu, pak ale rychlost absorpce výrazně klesla a po 96 hodinách bylo celkem absorbováno 60 % z aplikovaného množství.

V případě nízkého množství fosforu v rostlině však foliární výživa význam má.

S intenzitou „hladovění“ rostliny roste rychlost listové absorpce a translokace do kořenů. Clarkson & Scattergood (1982) uvádějí, že rostliny trpící nedostatkem fosforu absorbovaly za hodinu zhruba dvojnásobné množství fosforu než rostliny optimálně zásobené (9,92 ± 2,17 mmol P.g⁻¹ sušiny listu.h⁻¹ oproti 5,29 ± 0,54 mmol P.g⁻¹ sušiny listu.h⁻¹ u dostatečně zásobených). Translokace z listu byla zhruba 3 x vyšší a translokace do kořenů 7 x vyšší než u rostlin optimálně zásobených.

I relativně malé množství živiny aplikované na list tak může pomoci rostlině zvýšit růst kořenů a tím se přizpůsobit stresovým podmínkám.

3.1.2.4 Vnější projevy nedostatku fosforu v rostlinách

Na rostlinách většinou nejsou zřetelné příznaky nedostatku fosforu (latentní nedostatek). Díky omezení fotosyntetické aktivity jsou rostliny celkově menší. Obilniny méně odnožují, dvouděložné rostliny mají silně řapíkaté listy s vystouplou nervaturou. Barva listů je špinavě zelená a místy přechází do červeného až purpurového zabarvení (Richer & Hlušek 1999, Vaňek et al. 2016).

Načervenalý nádech nadzemních částí rostlin není způsoben přímo nedostatkem fosforu v nich, ale produkcí ochranných fenolových sloučenin. Fenolové sloučeniny jsou transportovány jako ochranný prvek do kořenových buněk, které v důsledku nedostatku fosforu mají snížený obsah fosfolipidů v buněčné membráně a tím sníženou ochranu proti vstupu patogenů. Fenolové sloučeniny dále brání mikrobiální degradaci specifických exudátů schopných extracelulárně odštěpovat fosfor z organické hmoty (Pavlíková et al. 2008).

Při přechodu do generativní fáze rostliny nasazují méně květů a kvítků a dozrává méně zrn.

V této souvislosti bylo zjištěno, že odrůdy pšenic, které tvoří výnos počtem zrn v klasu jsou nedostatkem fosforu ovlivněny méně, než odrůdy tvořící výnos počtem klasů na rostlinu (Černý et al. 2015).

Na rostlinách je v důsledku nedostatku této živiny také patrný zvýšený růst kořenů na úkor nadzemní části.

V případě trvalého a značného deficitu fosforu je však zpomalen i růst kořene. Kořen je ale vždy v poměru k nadzemní části výrazně větší než u rostlin s dostatkem fosforu (Wang et al. 2016).

3.2 Hrách setý polní (*Pisum sativum* convar. *sativum*)

3.2.1 Význam, botanická charakteristika, způsob pěstování

Význam

Hrách setý patří k nejstarším kulturním plodinám, výskyt druhu se datuje již z doby kamenné.

Dle Situační a výhledové zprávy MZE 2018 (2018) byla celosvětová plocha hrachu v roce 2017 8 141 tis. ha a je tak třetí nejpěstovanější luskovinou (sója není započítávána). Mezi hlavní produkční oblasti patří Severní Amerika, Asie, Evropa. Ze států se nejvíce pěstuje v Kanadě, Číně a Rusku. V České republice byl v roce 2018 nejpěstovanější luskovinou a nacházel se na výměře 29 087 ha.

Významná je především produkce semen pro jejich vysoký obsah bílkovin. Ve zralém stavu semena obsahují 22–28 % dusíkatých látek, 46–56 % škrobu, 5–7 % vlákniny, 3 % tuku. Z dalších látek je především významný obsah vitamínů A₁, B₁ a B₂.

V menší míře se jako krmivo používá celá nadzemní část rostliny, která na počátku květu obsahuje 19 % dusíkatých látek. (Lahola et al. 1990).

Botanická charakteristika

Hrách setý je jednoletá, jarní rostlina. Má však i ozimé formy vhodné do poloh mírného pásma.

Klíčí hypogeicky. Kořen sahá cca 600 mm hluboko a je pro něj charakteristická kolonizace rhizobiálními bakteriemi. Lodyha je lysá, poléhavá, větvení slabé. List je zpravidla sudospeřený, 1–3 jařmý, ukončený aktivními úponky. V současnosti jsou velmi rozšířené odrůdy s redukovanou listovou plochou (semileafless), které méně poléhají a redukce jejich asimilačního aparátu se neprojevuje na výnosu semen.

Rostlina se rozmnožuje samosprašně a k opylení dochází ještě před rozkvetem.

Květenství je nejčastěji bílé, párové s nadměrně vyvinutou pavézou. Lusk je 40–90 mm dlouhý, 11–18 mm široký a obsahuje 3–11 semen.

Z pěstebních požadavků je především důležité optimální množství vláhy v určitých obdobích. Pro nabobtnání potřebují semena množství vláhy, které se rovná 90–120 % jejich hmotnosti. V období tvorby generativních orgánů vede nedostatek vláhy ke zvýšenému opadu květů. Naopak v příliš vlhkých podmínkách tvoří hrách velké množství vegetativních orgánů, což vede k redukci výnosu a zhoršení zdravotního stavu porostu.

Způsob pěstování

Hrách nejlépe prospívá na hlinitých až hlinitopísčitých půdách s neutrální až mírně kyselou reakcí (Lahola et al. 1990).

Klíčí při 3 °C, poškození klíčence nastává až při -6 °C. Teploty nad 25 °C působí na růst hrachu negativně. Vegetační doba jarních forem hrachu je 103–110 dní.

Vysévá se co nejdříve na jaře (či počátkem října u ozimých variant) do hloubky 60–80 mm, v počtu 0,9–1,1 mil. klíčivých semen. Rozteč řádků je nejčastěji 125 mm, maximální rozteč, kdy není redukován výnos je 250 mm.

Hnojení dusíkem se používá pouze před setím do výše 30 kg N.ha⁻¹ (startovací dávka). Toto hnojení slouží k zásobení rostliny před plným rozběhnutím rhizobiální symbiózy. Dusík ve větším množství a v pozdějších fázích vegetace snižuje výnos semen.

V hnojení ostatními makroprvky se hrách neliší od většiny kulturních plodin. U fosforu je konkrétní odběrový normativ na vytvoření 1 t výnosu semen 6,6–6,8 kg.ha⁻¹ (Vaněk et al. 2016).

V osevním postupu je výborným přerušovačem úzkých obilních sledů (omezuje pravou únavu půdy). Po sobě se zařazuje v minimálně čtyřletém odstupu.

Sklízí se klasickými sklízecími mlátičkami jednofázovou sklizní v plné zralosti. Sklizeň zelené hmoty je méně častá. Hrách se v tomto případě většinou nepěstuje jako monokultura, ale jako součást luskoobilních směsek (LOS).

3.2.2 Kořenový systém hrachu

Hrách má slabší kulový kořen, který je dobře větvený. Hloubka, do které proniká se značně různí a záleží především na stavu půdního prostředí (utužení, hladina podzemní vody, typ podloží). Dle Čvančary (1962) je nejčastější hloubka kořenění 800–1 260 mm. Sací síla, dle stejného autora dosahuje až 2,38 MPa.

Lahola (1990) uvádí, že hrách dokáže mimořádně dobře osvojovat živiny ze staré půdní síly, ale vyšší produkce organických kyselin a fosfatáz je dána až látkovou přeměnou vyplývající z činnosti symbiotické fixace. Symbióza je navazována ihned po vyklíčení rostliny, ale její plné rozvinutí nastává až za 40 dní (Vaněk et al. 2016).

To potvrzují i Ahokas et al. (2011), kteří uvádějí, že testované mladé rostlinky hrachu v nádobových pokusech dokázaly dobře rozpouštět pouze hydrogenfosforečnan vápenatý (CaHPO₄) a ve výrazně menší míře masokostní moučku. Do dalších potenciálních zdrojů fosforu (fosforečnanů hlinitých, železitých a apatitů) byl díky kořenové exkreci mladých rostlin fosfor imobilizován. Mezi jednotlivými genotypy hrachu však byly výrazné rozdíly. Exudáty genotypu L1703 dokázali rozpouštět kromě fosforečnanu hlinitého všechny ostatní pozorované fosfáty včetně fosforečnanu železitého. Dále uvádí, že zdvojnásobení množství dobře rozpustného CaHPO₄ (z 10 na 20 mg P.kg⁻¹) nevedlo k většímu zastoupení přístupného fosforu v půdním roztoku (sorpčním komplexu), což naznačuje vázanost rozpustnosti na množství konkrétních látek dodaných exudáty.

3.2.2.1 Symbiotická fixace dusíku

Za normálního tlaku a teploty je molekulární dusík (N₂) neobyčejně stabilní a nereaktivní. Jedním z mála katalizátorů, se kterým se dusík váže v těchto podmínkách je enzym nitrogenáza.

Tento enzym je schopen při dodání energie z adenosintrifosfátu (ATP), elektronů (e^-) a protonů vodíku (H^+) redukovat vzdušný dusík na amoniak (NH_3). Nalézt ho můžeme v epidermálních buňkách bakteroidních forem hlízkových bakterií rodu *Rhizobium*.

Pro čeleď bobovitých rostlin (*Fabaceae*) je typické symbiotické soužití s těmito bakteriemi. Každý rod bobovitých žije v symbióze pouze s jedním druhem rhizobií. Pro hrách je tímto druhem *Rhizobium leguminosarum*.

Navázání symbiocy nastává již při klíčení rostliny. Díky kořenové exudaci specifické aminokyseliny (homoserinu) je stimulován růst kolonií rhizobií, které se následně pohybují ve směru koncentračního spádu exudátu ke kořeni rostliny. Zde jsou uchyceny v mucigelu na povrchu kořenového vlásku. Pro navázání přímého kontaktu s bakteriemi slouží hostitelskou rostlinou produkováný specifický lektin (protein), který je kompaktilní s polysacharidem příslušného druhu bakterií. Tyto bakterie pak proniknou do kořenového vlásku a vytvoří infekční vlákno, které proroste až do vnitřního kortexu kořene a stimuluje tvorbu hlízek. Tyčinky rhizobií se následně změny v morfologicky odlišnou bakteroidní formu a jsou obklopeny buňčnou membránou rostlinných buněk. Tyto buňky pak vytvoří kořenovou hlízku. Dále oba symbionti spolusyntetizují leghemoglobin (hemovou část syntetizuje bakterie).

Metabolickou funkcí leghemoglobinu je transport kyslíku bakteriím. Zároveň zabraňuje jeho nahromadění v cytosolu hlízkových buněk a poškození nitrogenázy (Marečková 1983).

Aktivní hlízky jsou díky hemoglobinu růžové, na řezu červené. Hlízky neefektivních bakterií jsou bílé až šedé, někdy i zelené a hnědé. Rovněž staré hlízky ztrácejí červený pigment.

Výraznější přísun dusíku z hlízkových bakterií nastává u hrachu zhruba čtyřicet dní od navázání symbiocy a trvá asi šest týdnů (Vaňek et al. 2016).

Hlízky postupně odumírají se zráním rostliny, zároveň jsou z porušených membránových obalů uvolněny rhizobie. Volné rhizobie jsou z části zahubeny a zbytek se dostane zpět do půdy (Marečková 1983).

Rhizobie jsou obligátní aerobionti. Optimální pH pro jejich činnost je v rozmezí 6,5-7,5. *Rhizobium leguminosarum* (hrachová) projevují nejvyšší aktivitu při 20-24 °C. Při 30 °C se již tvoří malé bílé nefunkční hlízky (Lahola 1990).

Symbiotická fixace dusíku je energeticky náročný proces. Na redukcí jedné molekuly N_2 je zapotřebí až 28 molekul ATP. V přepočtu je tak zapotřebí na 1 kg fixovaného dusíku 34-36 MJ energie (Vaňek et al. 2016). I přes tuto spotřebu je však zatím nejméně energeticky náročným způsobem přeměny vzdušného dusíku na amoniak.

Při Haber-Boschově syntéze se v současné době spotřebuje zhruba 70 MJ energie na výrobu 1 kg dusíku (Lahola 1990).

Volně žijící diazotrofní bakterie *Azotobacter* musí vydat zhruba 1 000 MJ aby fixovaly 1 kg dusíku (Vaňek et al. 2016).

Přímá syntéza kyseliny dusičné v elektrickém oblouku pak vyžaduje zhruba 1 400 MJ energie na 1 kg fixovaného dusíku (Schneider 1959).

U bobovíých rostlin může činit podíl symbioticky asociovaného vzdušného dusíku až 85 %. Lahola (1990) uvádí, že výkonné odrůdy hrachu dokáží fixovat 140–200 kg dusíku na ha.

Vliv nedostatku fosforu na činnost hlízkových bakterií

Fosfor dodává bakteriím ve formě energeticky bohatých látek hostitelská rostlina. Lahola (1990) uvádí, že dostatek fosforu působí příznivě na tvorbu hlízek a aktivitu rhizobií. Klimek-Kopyra et al. (2018) uvádějí, že při hnojení $140 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ se na kořenech pozorovaných odrůd hrachu vytvořilo výrazně více kolonií rhizobií, než při hnojení $70 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$, ale pouze při vláhově příznivých podmínkách.

Bethenfalvy & Yoder (1981) uvádějí, že při zavlažování živným roztokem o koncentraci $4 \mu\text{mol P} \cdot \text{l}^{-1}$ nenastala u kořenů sóji tvorba hlízek. Při zavlažování koncentrací 20 a $100 \mu\text{mol P} \cdot \text{l}^{-1}$ byla tvorba hlízek vždy větší u rostlin kolonizovaných arbuskulárně mykorrhizními houbami, které umožnily rostlině získat více fosforu.

Také Genova (2006) uvádí, že při koncentraci $13,2 \text{ mg P} \cdot \text{l}^{-1}$ v půdním roztoku byla kolonizace hlízkovými bakteriemi o 50% vyšší u rostlin dostatečně fosforem zásobených díky mykorrhizní symbióze.

Jin et al. (2014) uvádějí, že zvýšení obsahu přístupného fosforu v půdě z $15 \text{ mg P} \cdot \text{l}^{-1}$ na $60 \text{ mg P} \cdot \text{l}^{-1}$ zvýšilo počet hlízek hrachu o 133% .

3.2.2.2 Výnosová odezva hrachu na aplikaci fosforu

Duchoň (1948) uvádí, že hrách je velice vděčný za přihnojení touto živinou. Oproti tomu Lahola (1990) i Hosnedl & Hochman (1994) uvádějí slabou výnosovou reakci na hnojení tímto prvkem a zmiňují dobrou osvojovací schopnost kořenů. Sandana & Pinochet (2014) uvádějí, že v optimálních živinných (kromě fosforu) a vláhových podmínkách byl dodáním $100 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ zvýšen výnos hrachu (ve výnosnější variantě) ze $4,93 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ na $6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Při dodání $250 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ stoupl výnos v této variantě na $6,68 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Dále byla sledována pšenice, která v daných podmínkách vykazovala o něco vyšší výnosovou odezvu na nižší množství fosforu v půdě. Množství fosforu absorbovaného z jednotky objemu půdy však bylo u obou druhů rostlin přibližně stejné. Pšenice tedy nemá horší osvojovací schopnost fosforu z půdy než hrách, ale energeticky a hmotově náročnější strategii jeho získávání (tvorba velkého množství kořenové hmoty), což se následně promítne ve vytvořeném výnosu.

Klimek–Kopyra et al. (2018) při svém pozorování zjistili, že v suchém a teplé vegetační sezóně (srážky duben 49 mm , květen $17,5 \text{ mm}$) vedlo hnojení $140 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ k průměrnému výnosu $3,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ hrachových semen a hnojení $70 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ k průměrnému výnosu $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Pokud byly vláhové poměry více příznivé (duben 77 mm , květen 49 mm), bylo z obou variant sklizeno shodně po $3,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ semen a navýšen hnojení se tak do výnosu nepromítlo.

V suchých podmínkách tak vysoká dávka fosforu výnosově kompenzovala nedostatek vody.

3.3 Hnojiva obsahující fosfor

3.3.1 Historie výroby a používání

Hnojiva s výrazným obsahem fosforu používal člověk již velmi dlouho před objevením (rozlišením) této látky.

Před více jak třemi tisíci lety používali staří Egypťané popel z kostí ke hnojení obilnin a před dvěma tisíci let hnojily svá pole Inkové v Peru ztvrdlým trusem mořských ptáků, později známým jako guano (Richter 1996, Vaňek et al. 2016).

Výraznější rozmach v hnojení (v té době již pojmenovaným) fosforem nastává v první polovině devatenáctého století. V roce 1826 vyvrátil Carl Sprengel Thaerovu teorii humusu tím, že analyticky dokázal hnojivý účinek ne humusu jako takového, ale především živin v něm obsažených. Následně v roce 1828 zveřejnil svůj názor, že rostlina bude růst vždy nešťastně, pokud jedna z látek nutných k jejímu vzniku nebude v míře požadované touto rostlinou (Jung 2009).

Následně tuto teorii zpřesnil a rozšířil Justus von Liebig ve svém díle *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie* publikovaném roku 1840 (Van der Ploeg et al. 1999). Liebig ve své knize zdůrazňoval nutnost náhrady sklizněmi odčerpaných živin z půdy a tím poukázal na potřebu výroby a používání minerálních hnojiv (Vaňek et al. 2016).

Zdrojem pro výrobu těchto hnojiv byly a jsou přírodní minerály či kosti zvířat. Fosforečné minerály se v půdě nacházejí v dostatečném množství. Jsou však málo rozpustné a uvolňování ortofosforečnanů tak nepostačuje krýt potřeby hospodářských rostlin.

Výrobou hnojiva je proto nutné změnit molární poměr 5:3 mezi vápníkem a fosforem (apatity) ve vstupním materiálu na poměr 1:1, či lépe 1:2 v produktu (dobře rozpustný dihydrogenfosforečnan vápenatý či hydrogenfosforečnan vápenatý) (Richter 2007). Dosažení tohoto poměru bylo v počátcích výroby fosforečných hnojiv zajišťováno výhradně rozkladem fosfátů pomocí kyseliny sírové.

Výrobu hnojiva (superfosfátu) uvedeným způsobem si nechal jako první patentovat pod číslem 9354 dne 23.5.1842 sir John Bennet Lawes, majitele panství Rothamsted.

V Německu se superfosfát začal vyrábět roku 1855 (Schneider 1959). V Čechách roku 1861 v Ústí nad Labem (Vaňek et al. 2016).

Vstupní surovinou v počátcích výroby byly především kosti, koprolity (exkrementy pravěkých zvířat) a guano (v roce 1856 se do Evropy dovezlo 342 000 t.). Od sedmdesátých let devatenáctého století se začínají používat surové americké a severoafrické fosfáty (Schneider 1959).

Extrakční proces výroby kyseliny fosforečné je znám od roku 1880, ale obohacené superfosfáty se výrazněji začínají vyrábět až po druhé světové válce (Richter 2007). V této době se také rozbíhá výroba hnojiv s účinnou složkou fosforečnanu amonného (rozklad fosfátů pomocí kyseliny dusičné).

3.3.2 Hlavní zdroje pro výrobu hnojiv.

Pro výrobu hnojiv obsahujících fosfor se používají především fosfority a apatity. Celosvětová roční těžba těchto minerálů činila v roce 2017 269 milionů tun. Ročně se pak celosvětově spotřebuje 20,5 milionu tun elementárního fosforu v minerálních hnojivech (Mineral commodity summaries 2019, 2019). Ověřené světové zásoby fosfátů by měly zabezpečit jejich současnou spotřebu na přibližně 100 let, ovšem odhadované zásoby jsou přibližně desetinásobné. V roce 2017 se nejvíce fosfátů vytěžilo v Číně, následovalo Maroko, USA a Rusko. Největší odhadované zásoby fosfátů jsou v Maroku a Západní Sahaře a činí 50 miliard tun (Mineral commodity summaries 2019, 2019). Ložiska fosfátů jsou však nerovnoměrně rozděleny. Na území patnácti států leží 96 % světové zásoby této suroviny. V případě stagnace či spekulace v těžbě tak může docházet k vysokému nárůstu cen (Tlustoš 2008).

Fosfority

Jsou dominantním zdrojem výroby hnojiv s obsahem fosforu. Produkci veškerých fosfátů pokrývají z 95 % (Tlustoš et al. 2016).

Většina ložisek vznikala mineralizací pozůstatků živočišných organismů. Tyto fosfority často obsahují zbytky jejich koster a zubů. Ložiska jsou často pozůstatkem bujného života na dnech moří a lagun. Většinou se nalézají při pobřeží oceánů, kde se postupně hromadily kostry vyplavených živočichů (Schneider 1959).

Největší naleziště jsou především v Maroku a dalších státech severní Afriky, v USA, na Blízkém východě a v Číně (Tlustoš et al. 2008)

Část fosforitů vznikala rozkladem původního magmatického apatitu. V mořích a oceánech se pomocí kyseliny uhličitě a huminových kyselin původní apatit rozkládal na rozpustné fosforečnany, ty pak přecházely do vodného roztoku a účinkem podložních vápencových vrstev sedimentovaly jako fosforečnany vápenaté (Schneider 1959).

Zajímavý typ fosforitu pochází z tropických ostrovů. Má pórovitě korálkovou strukturu a vznikl z vápence prosáknutého výluhem guana (Schneider 1959).

Po chemické stránce převládá fluorapatit, dále jsou přítomny chlorapatity, hydroxylapatity a karbonátapatity (Richter & Hlušek 1999).

Struktura fosforitů je amorfní až kryptokrystalická (Tlustoš et al. 2016). Díky své genezi obsahují fosfority v hornině vždy příměsi zrn vápence, křemene, pyritu, hlinité částice či těžko mineralizovatelné zbytky živočichů. Obsahují od 7,4 % fosforu (kurské fosfority) po 17,9 % fosforu (naleziště na ostrově Protas–170 km jižně od Hong Kongu) (Schneider 1959).

Fosfority mají vyšší obsah doprovodných iontů (například kadmia) a díky svému vzniku jsou také rozpustnější než magmatické apatity (Vaněk et al. 2016).

Apatity

Jejich podíl na produkci fosfátů stále klesá a v současné době tvoří zhruba 5 % (Tlustoš et al. 2008).

Apatity jsou magmatického původu, krystalického složení. Nejčastěji se vyskytuje fluorapatit, méně častý je chlorapatit a hydroxylapatit. Při tektonických erupcích byly tyto fosforečnany přetaveny se silikáty a proto obsahují ještě křemičitany (minerál nefelin) (Vaňek 2016).

Nejbohatší naleziště apatitu se nachází na poloostrově Kola v severozápadním Rusku. Rozprostírá se na ploše 1 300 km² ve tvaru čočky. Průměr hlavního ložiska je 40 km (Schneider 1959). Kolský apatit obsahuje 17,5 % fosforu.

Další významější naleziště magmatických apatitů jsou ve Švédsku, Norsku, Kanadě, Indii, Číně, Brazílii a Chile (Richter & Hlušek 1996).

3.3.3 Minoritní zdroje

Zvířecí kosti

Jako hnojivo se nejprve používal popel z kostí (Vaňek 2016). Vypálením se kosti nejprve zbavily organických látek a následně i uhlíku, zkřehly a daly se snadno rozmělnit na kostní popel (Baťek 1918). Kostní popel obsahuje zhruba 18,3 % fosforu (Schneider 1959).

Zhruba od druhé poloviny 18. století se používají rozemleté odtučněné kosti (Richter & Hlušek 1996). Mleté kosti obsahují 13–14,8 % fosforu převážně ve formě karbonátapatitu a z menší části fluorapatitu. Vypálením kostí apatitové krystalky narůstají, proto má kostní popel horší hnojivé účinky než surová kostní moučka.

Od poloviny 19. století se ve velkém začíná používat rozkladu kostí pomocí kyseliny sírové. Kostí však pro jejich malou produkci nikdy netvořily významný zdroj výroby fosforečných hnojiv. Po druhé světové válce se jich v Československu vyprodukovalo přibližně 20 000 tun za rok, což je asi 2 800 tun fosforu. Toto množství krylo spotřebu z 10 % (Schneider 1959).

Guano

Guano je částečně až plně mineralizovaný trus ptáků či netopýrů (Duchoň 1948). Jeho nejvýznamější ložiska se nacházejí na skupinách ostrovů poblíž Peru. Toto guano je díky bezdeštnému klimatu nevyluhované. Průměrně obsahuje 10 % dusíku, 6,5 % fosforu, 2,5 % draslíku a zbytky organických látek dle stupně mineralizace. Používá se rozemleté k přímému hnojení i jako surovina pro výrobu hnojiv. Hlavní sloučenina fosforu je zde amorfní apatit.

Železné rudy

Železné rudy obsahující fosfor jsou vesměs sedimentárního původu. Fosfor je zde obsažen ve formě amorfních fosforitů (mineralizované zbytky živočichů). Vyskytují se po celém světě. Obsah fosforu se pohybuje kolem 0,9 %. Například rudy v nalezištích nedaleko Prahy (Zdice, Nučice) obsahují 0,78 % fosforu (Slavík 1918).

Železné rudy jsou pro nízký obsah fosforu vždy primárně těženy pro obsah železa a fosfor je z nich odstraňován aby ocel nebyla křehká.

Fosfor je z roztavené rudy vyloučen ve formě tzv. Thomasovy strusky. Struska se pak drtí a mele na Thomasovu moučku (Duchoň 1948).

3.3.4 Minerální hnojiva obsahující fosfor

3.3.4.1 Způsob aplikace

Díky vysokému poutání ortofosforečnanů půdními koloidy a rychlému vstupování do chemických vazeb s vápníkem, hliníkem a železem je fosfor v půdě málo pohyblivý. Fosforečná hnojiva je proto potřeba zapravit hlouběji do půdního profilu, blíže ke kořenovému vlášení rostlin. Většina uvolněného fosforu je zde sice také rychle sorbována, ale díky vyšší vlhkosti půdy, vyšší koncentraci exudátů, výraznému koncentračnímu gradientu v blízkosti rhizosféry a krátké vzdálenosti difuzního transportu je postupně uvolňován a využit rostlinou.

Pokud hnojivo přímo nezaoráváme, tak by hloubka zapravení měla dosahovat alespoň 15 cm. Menší část dávky lze uložit mělčeji (pod patu–0,05 m) a zabezpečit tak dostupnost hnojiva pro mladé rostliny přecházející na autotrofní výživu.

Pokud je však mělčeji zapravena převažující dávka hnojiva, kořeny zde více větví a je omezen jejich růst do hloubky (Černý et al. 2018).

Přímé využití fosforu z průmyslových hnojiv se pohybuje v rozmezí 10–15 %, převážná část fosforu hnojiv je tedy sorbována půdou a až následně uvolňována rostlinám.

Fosforečná hnojiva je proto vhodné zapravit spolu s organickým hnojením. Z organické hmoty se rozkladem uvolňují organické kyseliny, které rozpouštějí sekundární fosforečnany. Huminové látky organických hnojiv konkurují ortofosforečnanům na vazebných površích či při sorpci se sesquioxidy. V procesu mineralizace uvolněný oxid uhličitý (CO_2) umožňuje vznik kyseliny uhličitě (H_2CO_3), která rozpouští sloučeniny fosforu s vápníkem. Ortofosforečnany se také slučují s humáty, které je následně ochraňují před „zvrháváním“ či „retrogradací“ V současné době jsou fosforečná hnojiva používána především v granulované formě. Je tím zjednodušen způsob aplikace a vodorozpustné formy hnojiv pomaleji uvolňují živinu do půdního roztoku.

3.3.4.2 Hnojiva s fosforem rozpustným ve vodě

Tyto hnojiva rychle uvolňují fosfor, jejich aplikace proto není doporučována do kyselých půd. Uvolněný fosfor, který rostlina v krátkém čase z roztoku nepřijme zde tvoří hůře rozpustné sloučeniny s hojně zastoupenými ionty železa a hliníku.

Hnojiva s převažující vodorozpustnou formou fosforu tvoří 98 % světové spotřeby fosforečných hnojiv (Tlustoš et al. 2008). Dle stejného autora dominují světové spotřebě fosforečných hnojiv tyto druhy:

Amofosy (MAP), Diamofosy (DAP)

Amofosy obsahují 21–22,7 % fosforu a 11–12 % dusíku, Diamofosy 20–22 % fosforu a 18 % dusíku. Jedná se o dvousložková fosforečná hnojiva. U MAP je účinnou složkou dihydrogenfosforečnan amonný ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), u DAP je účinnou složkou hydrogenfosforečnan diamonný ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$). Hnojiva se vyrábí rozkladem fosfátů kyselinou dusičnou (HNO_3).

Z celkového obsaženého fosforu je 40–48 % ve vodorozpustné formě. V MAP a DAP je celosvětově spotřebováno 50 % použitého fosforu ve výrobě hnojiv (Tlustoš et al. 2008).

NPK hnojiva – s draslíkem v chloridové vazbě

Obsahují 3,9–11,3 % fosforu, 6–20 % dusíku a 6,6–29 % draslíku. Jedná se o tříložková hnojiva. Vyrábí se rozkladem fosfátů kyselinou dusičnou (HNO_3) v přebytku, která je následně neutralizována amoniakem. Do vzniklé břečky je přidán chlorid draselný (KCl). Větší část fosforu je ve vodorozpustné formě, zbytek je rozpustný citrátově. Díky vyššímu obsahu chloru se nepoužívají pro hnojení zelenin. K zajištění správného molárního poměru (vodorozpustnosti) mezi vápníkem a fosforem se část vápníku odstraňuje technologií tzv. vymražování.

Trojité superfosfáty

Obsahují 20–21 % fosforu a 15 % vápníku. Účinnou složkou je dihydrogenfosforečnan vápenatý $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Vyrábí se rozkladem surových fosfátů kyselinou fosforečnou (H_3PO_4). Většina obsaženého fosforu je ve vodorozpustné formě.

Jednoduché superfosfáty

Obsahují 7,5–8,5 % fosforu, 18–21 % vápníku a 8–12 % síry. Účinnou složkou je dihydrogenfosforečnan vápenatý $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ a síran vápenatý (CaSO_4). Vyrábí se rozkladem surových fosfátů kyselinou sírovou (H_2SO_4). Obsahují minimálně 6,5 % vodorozpustného fosforu. Hnojivo většinou slouží jako komponent pro výrobu směsných hnojiv (Vostal 1994).

3.3.4.3 Hnojiva s fosforem nerozpustným ve vodě

Fosfor obsažený v těchto hnojivech je dobře rozpustný pouze v silných kyselinách, či ve 2% kyselině mravenčí. Živina je uvolňována pozvolně a hnojiva tak mohou být použita do kyselých půd a k melioračnímu hnojení ve vysokých dávkách. Hnojivý účinek je zajištěn jen jemností mletí a to až na velikost zrn $< 0,063$ mm. Možné je jejich použití v ekologickém zemědělství. Jako surovina pro výrobu těchto hnojiv se používají měkké amorfní fosfority. Jednou z nejkvalitnějších surovin je tuniský fosforit Gafsa (Richter & Hlušek 1999).

3.3.4.3.1 Hyperfosfáty

Hyperkorn

Obsahuje 11,3 % fosforu, 28,4 % vápníku a 1,3–2 % hořčíku. Obsažený fosfor je z 55 % rozpustný ve 2% kyselině mravenčí CH_2O_2 . Vyrábí se z Gafsa fosforitu v Rakousku.

Dolophos

Obsahuje 6,5–11,3 % fosforu, 28,4 % vápníku a 2 % hořčíku. Obsažený fosfor je z 55 % rozpustný ve 2% kyselině mravenčí CH_2O_2 . Vyrábí se v Německu.

3.3.4.4 Hnojiva s fosforem rozpustným v neutrálním citranu amonném

Fosmag MK

Obsahuje 10,9 % fosforu, 25,5 % vápníku, 7 % síry a 2 % hořčíku. V citrátově rozpustné formě je zastoupeno 40 % fosforu a vodorozpustné 24 %. Vodorozpustný fosfor pochází ze superfosfátu, zásobní je tvořen jemně mletými apatity.

3.3.4.5 Další minerální hnojiva obsahující fosfor

PK hnojiva, nejkoncentrovanější druh obsahuje 22,7 % fosforu a 28,2 % draslíku, účinnou složkou je dihydrogenfosforečnan draselný (KH_2PO_4). Fosfor v nich obsažený je dobře rozpustný ve vodě.

NPK směsná hnojiva, obsahují 4,4–22,9 % fosforu, 8–22 % dusíku, 8,3–16,6 % draslíku. Fosfor je zde zastoupen především ve vodorozpustné formě. Vyrábí se smícháním jednotlivých hnojiv.

Kapalná hnojiva nejčastěji obsahují 10,6 % fosforu a 8 % dusíku ze své hmotnosti. Většinou jsou vyráběny z Amofosu a ostatními vlastnostmi se s ním shodují. Jsou určeny pro hnojení půdy.

Thomasova moučka obsahuje 6 % fosforu, 32–35 % vápníku, 2,5 % hořčíku, 3–4 % křemíku a 5–6 % manganu. Je odpadním produktem při výrobě železa. 80 % z obsaženého fosforu je rozpustných v neutrálním citranu amonném (Richter & Hlušek 1999).

3.3.4.6 Hnojiva pro foliární aplikaci fosforu

Především díky zápornému náboji pórů listové kutikuly jsou ve vodě disociované anionty kyseliny ortofosforečné pro rostliny hůře přístupné. Jedním ze způsobů, jak tuto živinu více zpřístupnit přes list je spojit přes atomy kyslíku více molekul fosforečnanů a vytvořit tak elektroneutrální polyfosfát. Lošák (2019) uvádí, že aplikace polyfosfátu u ozimé řepky v BBCH 16 vedla po dvou dnech k 19,2%, po čtyřech dnech k 17% a po 8 dnech k 17,1% navýšení obsahu fosforu v listu. Stejně množství fosforu aplikované ve vodném roztoku MAP+DAP vedlo k navýšení ve stejných intervalech o 5,9 %, 12 % a 8,9 %. Polyfosfáty byly aplikovány ve hnojivu Retafos prim.

Retafos prim

Obsahuje 109 g.l⁻¹ fosforu, 207,5 g.l⁻¹ draslíku, 125 g.l⁻¹ dusíku, 5 g.l⁻¹ bóru, humáty, oligopeptid, smáčedla a protistresové látky. Aplikuje se 5 l.ha⁻¹ ve 120–300 l vody.

3.3.4.7 Fosfor v organických a ostatních hnojivech

Fosfor v organických hnojivech má většinou velmi nízké zastoupení a pro doplnění živiny odebrané výnosem tak běžné dávky hnojiv nedostačují.

Z organické hmoty je fosfor uvolňován pozvolna s postupujícím procesem mineralizace.

Například u chlévského hnoje je v prvním roce po aplikaci rostlinami využito 15 % dodaného fosforu, ve druhém 10 % a ve třetím 5 % (Vaňek et al. 2016).

Určitou výjimku tvoří kaly z čistíren odpadních vod, které obsahují výrazně vyšší množství fosforu oproti např. chlévskému hnoji a rostlinám přístupný fosfor také rychleji uvolňují.

Toto uvolňování však může být negativně ovlivněno technologií čištění odpadních. Pokud je fosfor v odpadních vodách chemicky vysrážen, jeho následné uvolňování v půdním prostředí je sníženo zabudováním do méně rozpustných sloučenin, například fosforečnanů hořečnatoamonných ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Černý et al. 2014).

Díky možným vyšším obsahům patogenů, organických polutantů a rizikových prvků je nutné při aplikaci kalů dodržovat přísné legislativní podmínky, které zaručují jak ochranu životního prostředí, tak i zdravotní nezávadnost potravin.

Tab. 4–Množství fosforu v jednotlivých organických hnojivech (Černý et al. 2014, Dostál et al. 2014, Vaněk et al. 2016)

Hnojivo	Hnůj skotu	Slepičí hnůj	Kompost	Kejda skotu	Digestát	Čistírenské kaly	Zelené hnojení	Sláma
P (%) v čerstvém stavu	0,11	0,75	0,20	0,07	0,06–0,08	0,24–0,75 při sušíně 30 %	0,02–0,07	0,09–0,16

3.3.4.8 Bilance fosforu

Pro potřeby výživy konkrétních plodin je důležitá především „povrchová“ bilance. Jedná se o kalkulaci, jejímž cílem je zjistit rozdíl mezi kontrolovanými vstupy živin do půdy a jejich výstupy za definované časové období.

U fosforu však zajištění optimální výživy nezáleží pouze na bilančním výsledku, ale také na vlastnostech půdy (pH, druh, množství koloidů, org. hmoty, int. mikrobiálního života, osvojovací schopnost meziplodin) a dále na vlastnostech hnojiva (malá intenzita uvolňování, či naopak vysoká ve vztahu k pH – zvrhávání, retrogradace).

Může tak docházet ke stavu, že se bilančně fosfor v půdě akumuluje, ale výsledky rozborů půdy vykazují pokles jeho přístupných forem pro rostlinu (Černý et al. 2017).

Základem je alespoň nahradit export ve sklizňovém produktu importem v hnojivu.

Pokud máme na pozemku zásobu přístupného fosforu pod $40 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ půdy dle Mehlich 3 je tento import nutno o něco navýšit.

Například při nejčastějším případě sklizně semen a zaorávce slámy můžeme vycházet z odběrového normativu rostlin na vytvoření tuny výnosu a následného zohlednění fosforu ponechaného ve slámě. U hrachu je tento normativ $6,6\text{--}6,8 \text{ kg P} \cdot \text{t}^{-1}$ (Vaněk et al. 2016). V posklizňových zbytcích a kořenech hrachu zůstává až 40 % z tohoto množství.

4 Metodika

Pro experimentální část bakalářské práce byl založen polní poloprovozní pokus, ve kterém byl sledován vliv předseťového hnojení fosforem a dusíkem na hmotnost nadzemní biomasy, hmotnost vytvořených semen, počet a velikost vytvořených lusků, počet semen v lusku, výšku lodyh, výšku nasazení prvního lusků, počet lusků v jednotlivých třetinách celkového nasazení lusků a na délku nasazení lusků rostlin hrachu setého.

Dále byl sledován vliv aplikace fosforu na jeho obsah v jednotlivých vrstvách půdy.

Založeny byly tři pokusné pozemky. První pozemek byl zvolen jako kontrolní varianta a nebyl hnojen. Na druhém pozemku byl předseťově aplikován dusík v dávce 26 kg.ha⁻¹. Na třetím pozemku byl předseťově aplikován dusík v dávce 26 kg.ha⁻¹ a fosfor v dávce 50 kg.ha⁻¹.

4.1 Pokusná lokalita

Pokusné plochy se nacházely v katastrálním území Krasavce (629707), které náleží k obci Dolní Lukavice a okresu Plzeň-jih.

Pokusné pozemky byly lokalizovány na části půdního bloku s jílovitohlinitým půdním druhem. Bonitovaná půdně-ekologická jednotka (BPEJ) této části půdního bloku je vyjádřena kódem 4.26.14. Bodová výnosovost je hodnocena 20 body (půdy produkčně málo významné).

Půdním typem/subtypem je Kambizem modální, půdotvorné substráty jsou břidlice, fylity a hadce.

Údaje klimatické charakteristiky, průměrných hodnot agrochemických parametrů půdy v této části půdního bloku, průměrného množství srážek a výše teplot jsou uvedeny v následujících tabulkách. Údaje o průměrných srážkách a průměrné teplotě jsou převzaty z nejbližší meteorologické stanice (Plzeň Mikulka), která je vzdálena 18,5 km vzdušnou čarou od pokusných pozemků. Pro zpřesnění jsou dále uvedena data o průměrných srážkách z meteostanice Lužany u Plzně, která je vzdálená od pokusných pozemků cca 6,5 km vzdušnou čarou. Tato stanice však nezaznamenává teploty vzduchu.

Tab. 5–Klimatická charakteristika stanoviště

Klimatický region 4–mírně teplý, suchý (MT 1)	
Suma teplot nad 10 °C	2 400–2 600
Průměrná roční teplota (°C)	7,5–8,0
Průměrný úhrn srážek	450–550
Pravděpodobnost suchých vegetačních období (%)	30–40
Vláhová jistota ve vegetačním období	0–4

Tab. 6–Průměrné hodnoty agrochemických rozborů půdy na části půdního bloku s pokusnými pozemky, odběry uskutečněny 1.3.2019

pH CaCl ₂	Organická hmota (%)	KVK (mmol.kg ⁻¹)	P Mehlich 3 (mg.kg ⁻¹)	K ⁺ Mehlich 3 (mg.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ Mehlich 3 (mg.kg ⁻¹)	Ca ²⁺ Mehlich 3 (mg.kg ⁻¹)
6,37	1,01	159,60	10,50	109,80	352,70	2 560

Tab. 7–Průměrné srážky v jednotlivých měsících

Měsíc/lokalita	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Rok
Dlouhodobý srážkový normál r. 1981–2010, Plzeňský kraj (mm)	45,0	39,0	49,0	42,0	67,0	78,0	84,0	81,0	52,0	47,0	48,0	51,0	684,0
Plzeň Mikulka, měsíční úhrny srážek r. 2019 (mm)	30,4	29,8	28,5	16,6	87,3	39,0	57,2	98,3	32,8	36,6	27,1	15,9	499,5
Lužany u Plzně, bližší meteostanice, měří pouze srážky	31,7	32,2	29,7	19,0	57,2	36,7	30,7	80,5	29,8	24,5	21,8	14,5	408,3
Vlastní měření, měsíční úhrny srážek r. 2019 (mm)				22,5	53,0	39,0	30,0	75,0	25,0	14,0	28,0	9,0	

Tab. 8–Průměrná teplota v jednotlivých měsících

Měsíc/lokalita	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Průměr
Dlouhodobý normál tepoty vzduchu r. 1981–2010, Plzeňský kraj (°C)	-1,8	-1,0	2,8	7,4	12,5	15,4	17,4	16,8	12,4	7,6	2,5	-0,8	7,60
Plzeň Mikulka, průměrné měsíční teploty r. 2019 (°C)	-0,2	2,6	6,8	10,4	11,6	22,1	20,4	19,5	14,5	10,1	5,4	2,6	10,48

4.2 Způsob založení a vedení pokusu

4.2.1 Založení a agrotechnika pokusných pozemků

Založení pozemků

Byly založeny tři pokusné pozemky, každý o rozměrech 20 x 100 m.

Z důvodu aplikace hnojiv odstředivým rozmetadlem byly pozemky umístěny v řadě za sebou s odstupem 15 m.

Jednotlivé pozemky byly označeny jako Kontrola, N26 a N26+P50. U lomových bodů pozemků byly zaznamenány souřadnice dle GPS (příloha 1 a 2).

Agrotechnika pokusných pozemků

Pozemek Kontrola nebyl hnojen. Pozemek N26 byl hnojen dávkou 26 kg N.ha⁻¹ v amidické formě (NH₂)₂CO. Pozemek N26+P50 byl hnojen dávkou 26 kg N.ha⁻¹ a 50 kg P.ha⁻¹ v dihydrogenfosforečnanu amonném (NH₄H₂PO₄).

Odstup od organického hnojení byl na pokusné lokalitě delší než pět let.

Pozemek byl dlouhodobě zpracováván orbou.

Hnojiva byla aplikována s odstupem dvou dnů před setím na hrubou brázdou. Aplikace byla provedena odstředivým rozmetadlem (na široko).

Příprava půdy proběhla pomocí radličkového kypřiče a vířivých bran v jednom přejezdu společně se setím. Půda byla kypřena přibližně do hloubky 0,07 m. Výsev byl proveden klasickým secím strojem s válečkovým výsevním ústrojím, vzduchovým rozdělením a dopravou osiva a diskovými secími botkami. Hloubka uložení semen byla 0,07 m. Pozemky nebyly po zasetí přivalen z důvodu vyšší vlhkosti půdy (utužení, potřeba kyslíku hlízkovými bakteriemi). Fosforečné hnojivo bylo přípravou půdy zapraveno do hloubky cca 0,02–0,05 m.

Aplikace hnojiv a následné setí proběhlo záměrně při hraniční (vyšší) vlhkosti půdy (příloha 5a, 5b). Důvodem bylo zjistit, zda tento stav alespoň částečně ovlivní pohyb vodorozpustného fosforu půdním profilem.

Stimulátory růstu, regulátory růstu, listová hnojiva, či jiné látky ovlivňující metabolismus rostlin nebyly aplikovány.

Způsob herbicidní ochrany byl zvolen s ohledem na lokalizaci pozemku v OP vodních zdrojů II st.–povrchová voda.

Před sklizní porost nebyl desikován, ani jinak ošetřen.

Sklizen byl vždy středový pruh v plné délce každého pozemku. Šířka pruhu odpovídala plnému záběru žací lišty kombajnu (přesné údaje jsou uvedeny v tab. 19). Sklizené zrna z každého pozemku bylo uloženo do vaku, následně napytlováno a zváženo. Průběh sklizně dokumentuje příloha 11a, 11b.

Souhrn konkrétních agrotechnických údajů uvádí následující tabulka.

Tab. 9–Specifikace a termíny agrotechnických opatření

Předplodina/termín orby	Pšenice ozimá/ listopad 2018 (sláma předplodiny sklizena)
Pozemek N26 hnojení	17.3.2019, močovina granulovaná, 56 kg.ha ⁻¹ –26 kg N.ha ⁻¹ , na hrubou brázdou
Pozemek N26+P50 hnojení	17.3.2019, Amofos 218 kg.ha ⁻¹ – 26 kg N/ha, 50 kg P.ha ⁻¹ , na hrubou brázdou
Termín setí	18.3.2019
Výsevek semen, odrůda	1,1 mil.ha ⁻¹ , odrůda Eso–C1, nemořeno
Pree. herbicid	20.3.2019 Cirrus CS 2,5 L.ha ⁻¹
Post. herbicid	3.5.2019 Basagran 2 l.ha ⁻¹
Insekticid	1.6.2019 Nurelle D 0,6 l.ha ⁻¹
Sklizeň	23.7.2017, standartní žací mlátička, přímá sklizeň bez desikace

4.2.2 Stanovení obsahu přístupného fosforu v půdě

Vzorky půdy byly odebírány, před aplikací hnojiv a po sklizni plodiny.

Na každém pozemku byly úhlopříčně stanoveny tři odběrová místa. V úhlopříčném středu pozemku N26+P50 bylo navíc stanoveno další odběrové místo pro odběr vzorků z jednotlivých vrstev půdy. Odběrová místa ve středu pozemků byla označena jako Cel1, Cel2, Cel3, odběrová místa na krajích pozemků jako P1, P2, P3, P4, P5, P6. Místo pro odběr z jednotlivých vrstev půdy bylo označeno jako P7, P8, P9.

Souřadnice všech odběrových bodů byly zjištěny dle GPS a zaznamenány (viz. příloha 1 a 2).

1.3.2019 byly odebrány technikem ZÚ Ústí nad Labem, pobočky Klatovy vzorky půdy k chemickému vyhodnocení. Vzorky Cel1, Cel2, Cel3, P1, P2, P3, P4, P5 a P6 byly odebírány z celé hloubky orničního profilu (0,2 m). Vzorek P7 z hloubky 0–0,05 m, P8 z hloubky 0,05–0,1 m a P9 z hloubky 0,1–0,2 m. Všechny vzorky byly hodnoceny na obsah rostlinám přístupného fosforu metodou Mehlich 3.

Vzorky Cel1, Cel2 a Cel3 byly dále hodnoceny na výši pH, obsah organické hmoty, KVK a obsahy draslíku, hořčíku a fosforu. Obsahy kationtů byly hodnoceny metodou Mehlich 3, pH bylo stanoveno v roztoku chloridu vápenatého (CaCl_2). Důvodem rozsáhlejšího rozboru bylo ověřit předpoklad, že na těchto pozemcích nejsou výraznější deficity dalších živin a extrémní hodnoty pH, KVK, či množství organické hmoty v půdě.

Odebrané půdních vzorky byly odeslány k rozboru do laboratoří E. I. Empla Hradec Králové, s.r.o. Kompletní výsledky rozborů jsou uvedeny v příloze 3.

12.10.2019 byl proveden odběr vzorků půdy shodným způsobem. Původní odběrová místa byla lokalizována dle GPS. Vyhodnocení vzorků provedla opět E. I. Empla Hradec Králové, s.r.o. Vzorky byly hodnoceny metodou Mehlich 3 na obsah přístupného fosforu, draslíku, hořčíku a vápníku. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 4. Zjištěné hodnoty u obsahu fosforu byly porovnány s hodnotami před aplikací hnojiv.

4.2.3 Odběr rostlinných vzorků a způsob hodnocení rostlin

V průběhu vegetace byly rostlinné vzorky odebírány ve třech termínech.

První odběr byl proveden dne 6.5.2019 v růstové fázi rostlin BBCH 22. Z každého pozemku byly úhlopříčně odebrány tři rostliny s kořeny. Kořeny byly odděleny od rostlin a jednotlivé části rostlin byly zváženy samostatně. Z důvodu nízké hmotnosti byly váženy vždy všechny kořeny z jednotlivého pozemku společně a vypočtena průměrná hodnota, stejným způsobem bylo postupováno i u nadzemních částí. Z důvodu velké obtížnosti odběru celkové hmoty kořenů (separace jemného kořenového vlášení) sloužily tyto vzorky rostlin pouze k orientačnímu posouzení zastoupení hmotnosti kořenů na hmotnosti celé rostliny a subjektivnímu zhodnocení stupně nodulace kořenů. Dále bylo úhlopříčně odebráno z každého pozemku více nadzemních částí rostlin. Z každého odběru pak bylo náhodně vybráno 10 rostlin k hodnocení. Druhý odběr byl proveden 20.6.2019 v růstové fázi rostlin BBCH 70. Odebrány byly pouze nadzemní části rostlin. Z každého pozemku bylo odebráno větší množství rostlin, ze kterých bylo poté náhodně vybráno 30 rostlin k hodnocení.

Třetí odběr proběhl 22.7.2019 v růstové fázi rostlin BBCH 89 stejným způsobem jako odběr v BBCH 70.

Každý vzorek rostlin odebraných v BBCH 22 byl zvážen a hodnoty porovnány mezi jednotlivými variantami hnojení.

V BBCH 70 bylo 10 rostlin z každé varianty hnojení hodnoceno na počet lusků na rostlině, počet semen v každém lusků a zastoupení jednotlivých lusků na rostlině. U každé hodnocené rostliny byla zvážena zvlášť semena a zvlášť zbytek rostliny. Výsledky z jednotlivých variant byly porovnány.

U dalších 10 rostlin z každé varianty hnojení byla změřena délka rostliny, výška nasazení lusků nad povrchem, délka nasazení lusků, počet lusků v 1/3, 2/3 a 3/3 nasazení. Výsledky z jednotlivých variant byly mezi sebou porovnány.

V BBCH 89 bylo postupováno shodným způsobem.

Veškeré vzorky byly ponechány k přirozenému vyschnutí při poměrné vlhkosti vzduchu 55 % a teplotě 20 °C na výsledný obsah sušiny cca 90 % u vegetativních orgánů a cca 88 % u semen. Vážení proběhlo na laboratorních vahách.

Sklizeň proběhla v plné zralosti. Z každého pozemku byl pro účely hodnocení sklizen středový pruh o šíři plného záběru žací lišty a v délce pokusné plochy. Výměra sklizené plochy každého pozemku činila 0,0614 ha. Sklizené zrno z každého pozemku bylo zváženo a výsledky mezi sebou porovnány.

5 Výsledky

5.1 Změny obsahu rostlinám přístupného fosforu v půdě

Hodnoty obsahu fosforu pro jednotlivé pozemky a hodnoty obsahu fosforu v jednotlivých vrstvách půdy jsou uvedeny v následujících tabulkách. Odběry vzorků půdy byly provedeny v průběhu roku 2019, před aplikací hnojiv (tab.7) a po sklizni plodiny (tab. 8).

Z uvedených hodnot je především patrný nárůst obsahu rostlinám přístupného fosforu ve vrstvě půdy 0–0,05 m a 0,05–0,1 m.

Po sklizni plodiny však byly zaznamenány nárůsty obsahu fosforu na všech (i fosforem nehnojených) pozemcích.

Obr. 1 znázorňuje průměrný nárůst obsahu rostlinám přístupného fosforu na jednotlivých pozemcích v celém orničním profilu.

Obr. 2 znázorňuje nárůst obsahu rostlinám přístupného fosforu v jednotlivých vrstvách půdy na pozemku N26+P50. K vysokému nárůstu obsahu přístupného fosforu pro rostlinu došlo především ve vrstvě půdy 0–0,05 m (+118,4 %) a ve vrstvě půdy 0,05–0,1 m (+82,8 %).

Ve vrstvě půdy 0,1–0,2 m byl zaznamenán nárůst obsahu fosforu přibližně shodný s průměrnými nárůsty obsahu fosforu v celém orničním profilu na všech pozemcích.

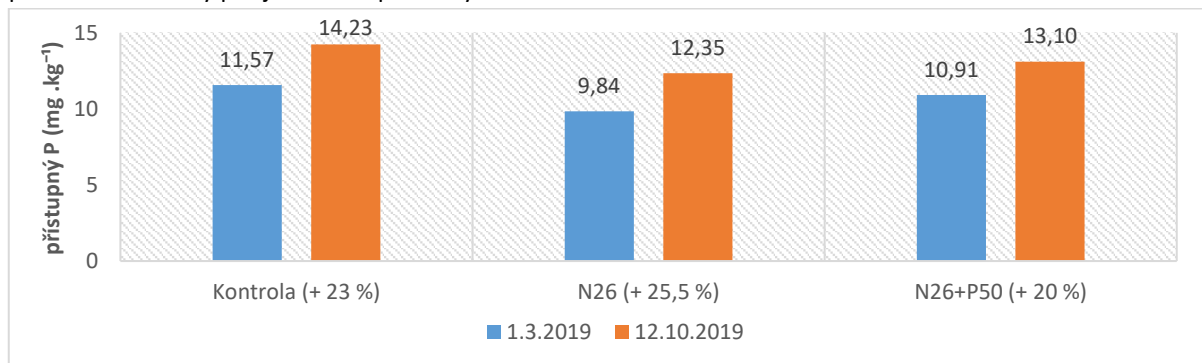
Tab. 10–Výsledky agrochemických rozborů půdy pro jednotlivé pozemky, metoda Mehlich 3, odběr 1.3.2019

Odb.místo/ pozemek	pH CaCl ₂	P1	Cel1	P2	P3	Cel2	P4	P5	Cel3	P6	P7 0- 0,05 m	P8 0,05- 0,1 m	P9 0,1- 0,2 m
Kontrola (mg P.kg ⁻¹)	6,62	10,50	13,70	10,50									
N26 (mg P.kg ⁻¹)	6,54				8,67	9,95	10,90						
N26+P50 (mg P.kg ⁻¹)	5,95							7,62	14,50	10,60	8,76	8,76	9,57

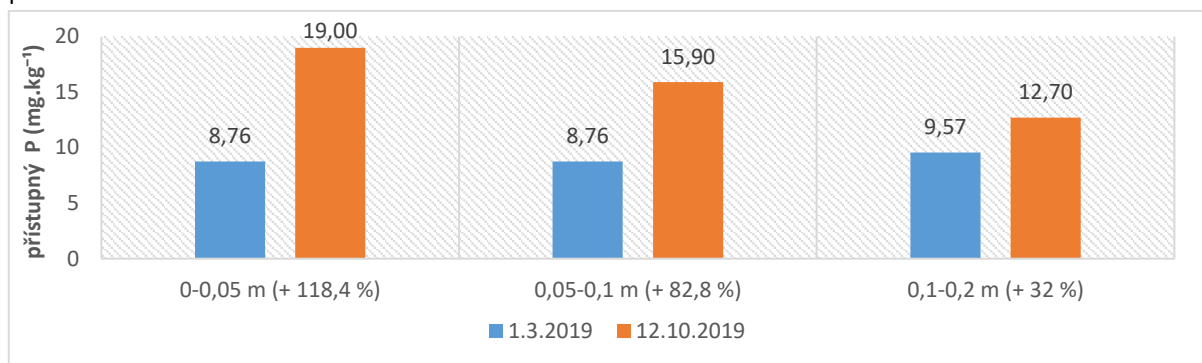
Tab. 11–Výsledky agrochemických rozborů půdy pro jednotlivé pozemky, metoda Mehlich 3, odběr 12.10.2019

Odb.místo/ pozemek	pH CaCl ₂	P1	Cel1	P2	P3	Cel2	P4	P5	Cel3	P6	P7 0- 0,05 m	P8 0,05- 0,1 m	P9 0,1- 0,2 m
Kontrola (mg P.kg ⁻¹)	6,73	15,00	14,90	12,80									
N26 (mg P.kg ⁻¹)	6,31				6,74	16,10	14,20						
N26+P50 (mg P.kg ⁻¹)	5,66							13,20	12,90	13,20	19,00	15,90	12,70

Obr. 1–Obsah přístupného fosforu v půdě před hnojením a po sklizni plodin, metoda Mehlich 3, průměrné hodnoty pro jednotlivé pozemky



Obr. 2–Obsah přístupného fosforu v jednotlivých vrstvách půdy před hnojením a po sklizni, metoda Mehlich 3, pozemek N26 + P50



5.2 Vývoj rostlin na jednotlivých pokusných pozemcích

5.2.1 Výsledky v růstové fázi BBCH 22

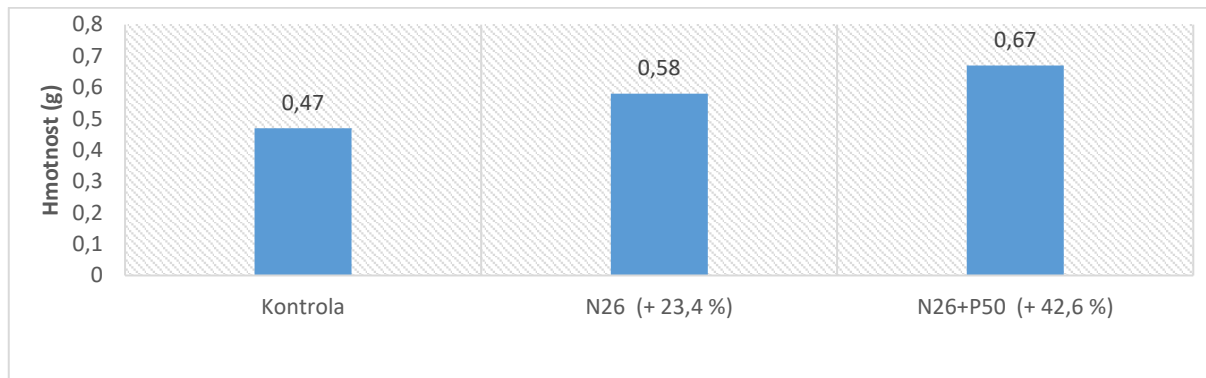
Z důvodu obtížné separace jemného kořenového vlášení byl pouze orientačně stanoven podíl hmotnosti kořenů na celkové hmotnosti rostlin (příloha 6a).

Na pozemku Kontrola tvořily kořeny cca 19,7 % hmotnosti celých rostlin včetně kořenů. Na pozemku N26 a N26+P50 tvořily kořeny shodně cca 24 % z celkové hmotnosti rostlin včetně kořenů. Stupeň nodulace kořenů byl subjektivně hodnocen jako shodný (příloha 6b).

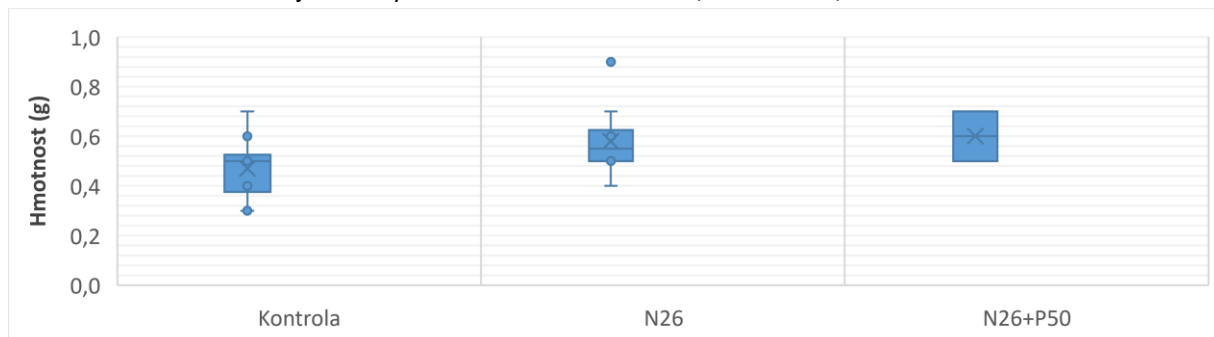
Z obr. 3 je zřejmý vysoký nárůst průměrné hmotnosti nadzemní biomasy rostlin hnojených fosforem oproti rostlinám nehnojeným, ale i rostlinám hnojeným pouze dusíkem.

Na obr. 4 jsou zaznamenány hmotnosti jednotlivých rostlin (jejich nadzemních částí). Z obrázku je patrné, že mírně vyšší rozptyl hmotnosti nadzemních částí vykazovaly rostliny na pozemku Kontrola. Dále je patrné, že rostliny na pozemku N26+P50 byly hmotnostně nejvyrovnanější.

Obr. 3–Průměrná hmotnost nadzemní biomasy jedné rostliny na jednotlivých pozemcích, sušina 90 %, BBCH 22



Obr. 4–Záznam hmotností jednotlivých nadzemních částí rostlin, sušina 90 %, odběr BBCH 22



5.2.2 Výsledky v růstové fázi BBCH 70

Počet lusků a semen na rostlinu, váha rostlin.

V tabulce 14 jsou uvedeny průměrné hmotnosti semen a rostlin bez semen a průměrné počty semen a lusků.

Z obr. č.5 a č. 6 je patrné, že rostliny na pozemcích N26 a N26+P50 nevytvořily vyšší počet lusků či semen v lusku než rostliny na pozemku Kontrola. Oproti BBCH 22 již také hnojené rostliny nepřevyšovaly nehnojené rostliny v hmotnosti nadzemní biomasy bez semen.

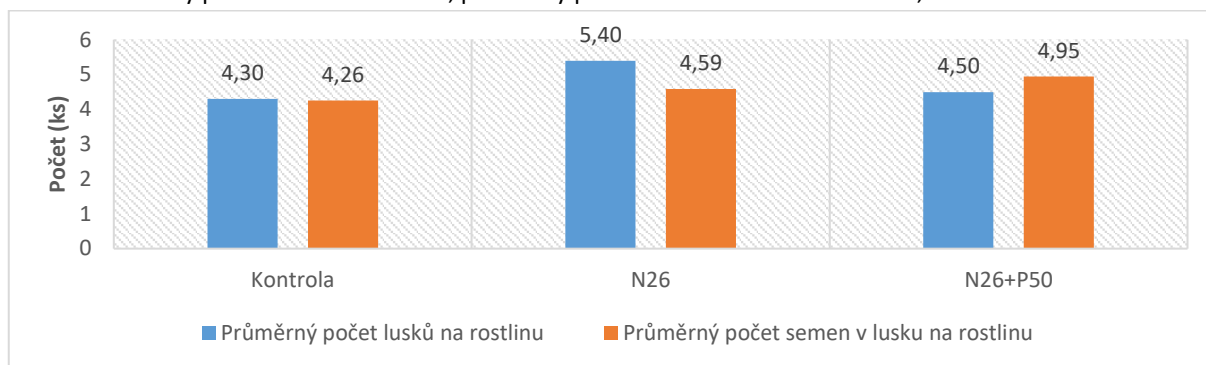
Výrazný rozdíl mezi jednotlivými variantami hnojení však byl v hmotnosti vytvořených semen. Rostliny na pozemku N26 vytvořily o 22,1 % těžší semena než rostliny na pozemku Kontrola. Rostliny na pozemku N26+P50 vytvořily o 42,3 % těžší semena než rostliny na pozemku Kontrola.

Parametry jednotlivých rostlin jsou uvedeny v příloze č. 7a, 7b, 7c a 7d.

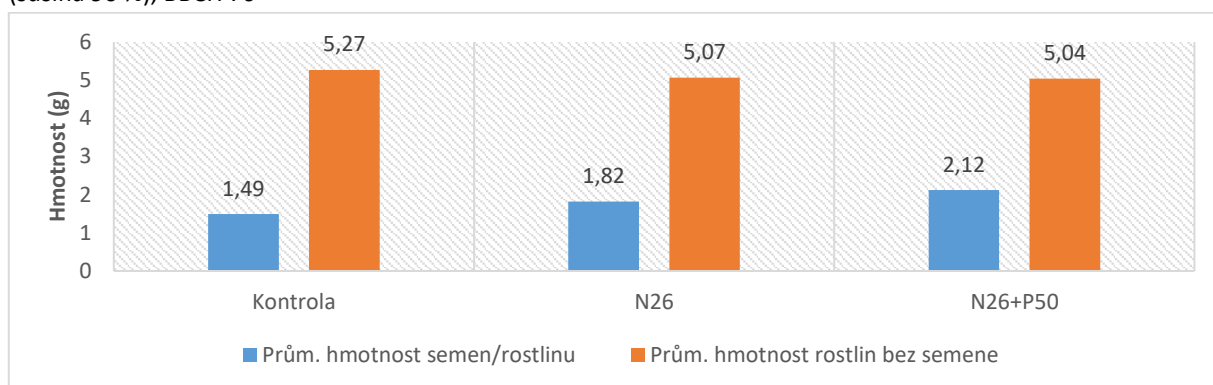
Tab. 12–Průměrné parametry rostlin, BBCH 70

Parametr	Kontrola	N 26	N 26 + P 50
\bar{x} -počet lusků/1 rostlinu	4,30	5,40	4,50
\bar{x} -počet semen v lusku	4,26	4,59	4,95
\bar{x} -počet semen/1 rostlinu	18,30	24,80	22,30
\bar{x} -hmotnost semen/1 rostlinu (g)	1,49	1,82	2,12
\bar{x} -hmotnost rostliny bez semen (g)	5,27	5,07	5,04
\bar{x} -hmotnost semene (g)	0,08	0,07	0,10

Obr. 5–Průměrný počet lusků na rostlinu, průměrný počet semen v lusku na rostlinu, BBCH 70



Obr. 6–Průměrné hmotnosti semen na rostlinu (sušina 88 %) a průměrná hmotnost rostliny bez semen (sušina 90 %), BBCH 70



Nasazení prvního luku, rozdělení lusků na rostlinách a délka rostlin

V tab. 15 jsou uvedeny průměrné parametry rostlin, jednotlivé rostliny jsou hodnoceny v příloze 8.

Z obr. 7 je patrné, že rostliny pozemku N26+P50 vytvořily o 26,5 % vyšší lodyhy a o 33,6 % výše nasadily první lusky než rostliny na pozemku Kontrola. Rostliny na pozemku N26 vytvořily o 13,2 % vyšší lodyhy a nasazení prvního luku bylo o 20,2 % výše než u rostlin na pozemku Kontrola.

Na obr. 8 jsou statisticky znázorněny počty lusků v jednotlivých třetinách celkového nasazení lusků. Z obrázku je patrné, že vyšší počty lusků (spodní a horní 75% zastoupení počtu lusků dané rozmezím „krabic“) byly častěji ve 3/3 nasazení lusků. Dále je patrné, že vyšší rozptyl v počtu lusků byl zaznamenán na pozemku Kontrola ve 2/3 nasazení lusků. Tečka nad „krabicí“ 1/3 nasazení lusků u rostlin na pozemku N26 značí, že pouze malá část rostlin měla v této třetině nasazení 2 lusky (z přílohy č. 8 je patrné, že se jednalo o dvě rostliny). Dále je patrné, že nejvyšší prostřední hodnota počtu lusků při řazení od nejnižšího počtu lusků k nejvyššímu byla zaznamenána na pozemku N26+P50 ve 3/3 nasazení. Celkově je z obrázku patrné, že vyšší a vyrovnanější počty lusků v jednotlivých třetinách nasazení byly zaznamenány u pozemku N26+P50.

Obr. 8 byl sestaven z parametrů jednotlivých rostlin uvedených v příloze 8.

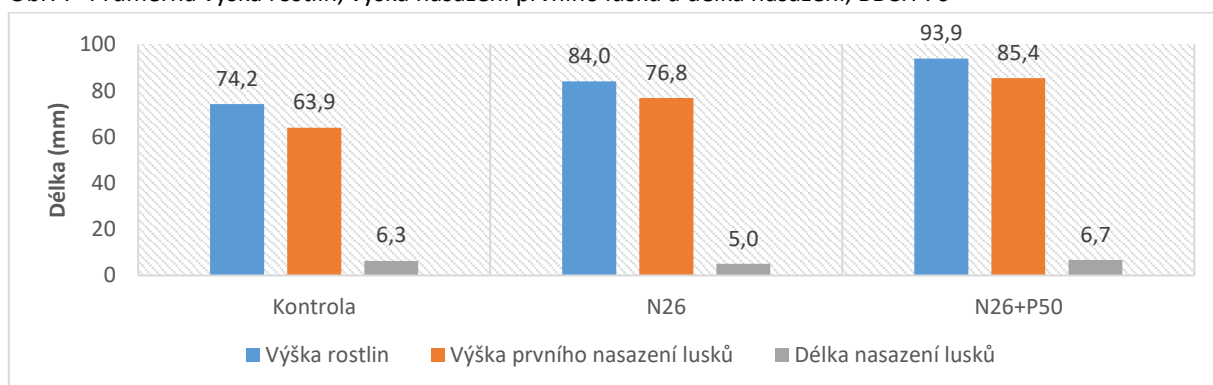
Obr. 9 zobrazuje průměrné hodnoty počtů lusků v jednotlivých třetinách nasazení. Tento obrázek vychází ze stejných dat jako předchozí obrázek a pouze jej doplňuje.

Na obr. 10 a 11 je znázorněna závislost hmotnosti semen na rostlině na hmotnosti její nadzemní části bez semen u pozemku Kontrola a N26+P50. U rostlin na pozemku Kontrola byla vyhodnocena střední závislost mezi sledovanými parametry a změna hmotnosti semen na rostlině je pouze z 28 % závislá na změně hmotnosti nadzemní biomasy. U rostlin na pozemku N26+P50 byla vyhodnocena silná závislost sledovaných parametrů a změna hmotnosti semen na rostlině je z 87 % závislá na změně hmotnosti nadzemní biomasy.

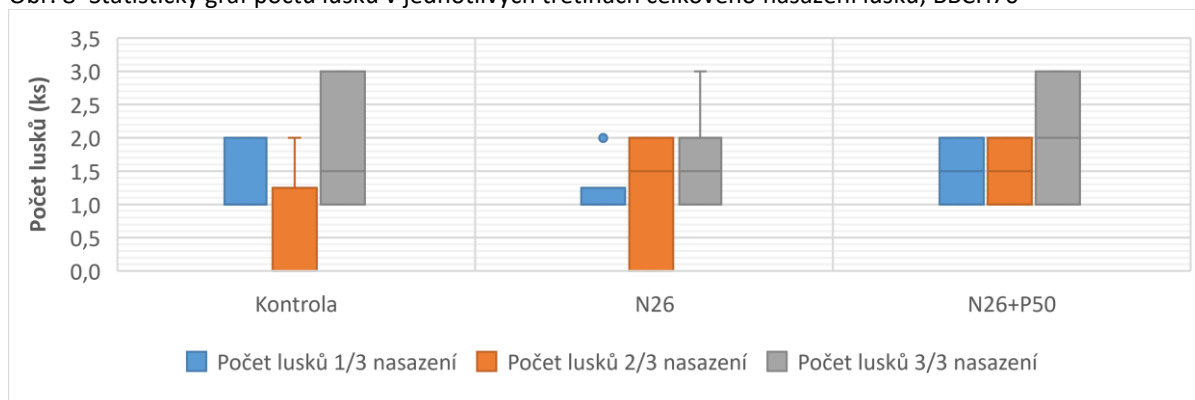
Tab. 13–Průměrné parametry rostlin, BBCH 70

Parametr/ pozemek	Výška rostliny (mm)	Výška nasazení nad povrchem (mm)	Délka nasazení (mm)	Počet lusků 1/3	Počet lusků 2/3	Počet lusků 3/3	Počet lusků na rostlině
Kontrola	74,2	63,9	6,3	1,3	0,6	1,8	3,7
N26	84,0	76,8	5,0	1,2	1,2	1,6	4,0
N26+P50	93,9	85,4	6,7	1,6	1,4	2,2	5,2

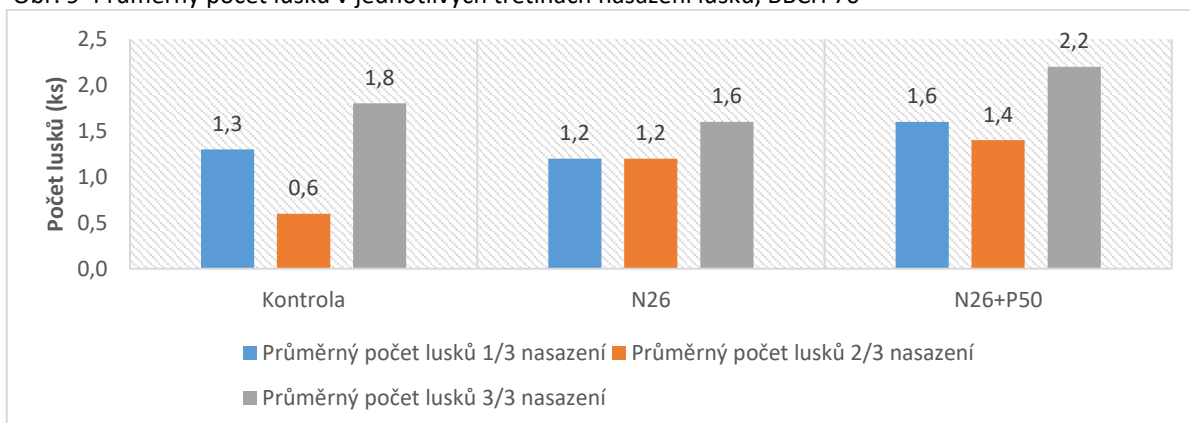
Obr. 7–Průměrná výška rostlin, výška nasazení prvního luku a délka nasazení, BBCH 70



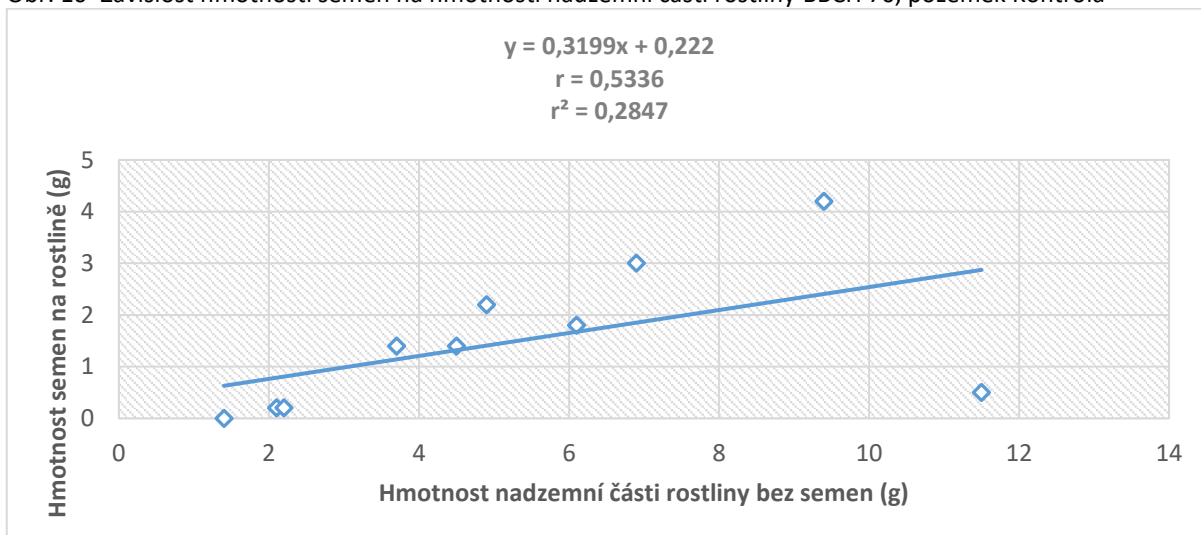
Obr. 8–Statistický graf počtu lusků v jednotlivých třetinách celkového nasazení lusků, BBCH70



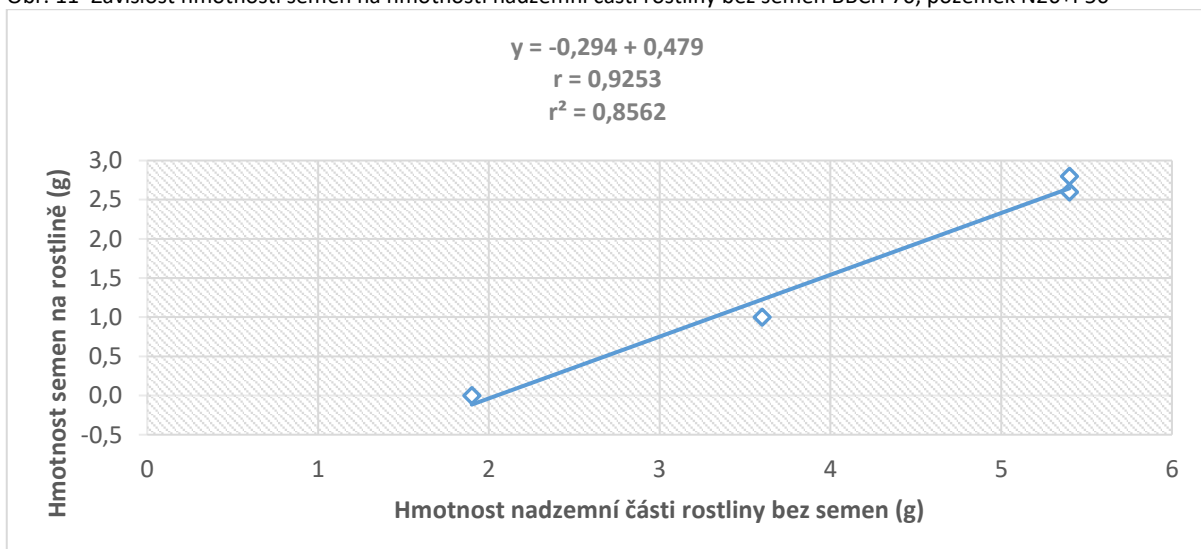
Obr. 9–Průměrný počet lusků v jednotlivých třetinách nasazení lusků, BBCH 70



Obr. 10–Závislost hmotnosti semen na hmotnosti nadzemní části rostliny BBCH 70, pozemek Kontrola



Obr. 11–Závislost hmotnosti semen na hmotnosti nadzemní části rostliny bez semen BBCH 70, pozemek N26+P50



5.2.3 Výsledky v růstové fázi BBCH 89

V této růstové fázi bylo zaznamenáno polehnutí rostlin. Nejvíce polehlé byly rostliny na pozemku N26+P50, méně polehlé byly rostliny na pozemku N26 a na pozemku Kontrola rostliny nepolehly.

Počet lusků a semen na rostlinu, hmotnost rostlin.

V tab. 16 jsou uvedeny průměrné hmotnosti semen a rostlin bez semen a průměrné počty semen a lusků. Dále je uvedena průměrná hmotnost tisíce semen (HTS).

Z obr. 13 je patrné, že rostliny na pozemku N26+P50 oproti rostlinám na pozemku Kontrola vytvořily o 19,5 % nižší hmotnost semen, o 16 % nižší hmotnost nadzemních částí rostlin bez semen a o 14,1 % nižší hmotnost jednoho semene (tisíce semen–HTS). Rostliny na pozemku N26 vytvořily oproti rostlinám na pozemku Kontrola o 8 % nižší hmotnost semen, o 19 % vyšší hmotnost nadzemní biomasy bez semen a o 3,1 % vyšší HTS.

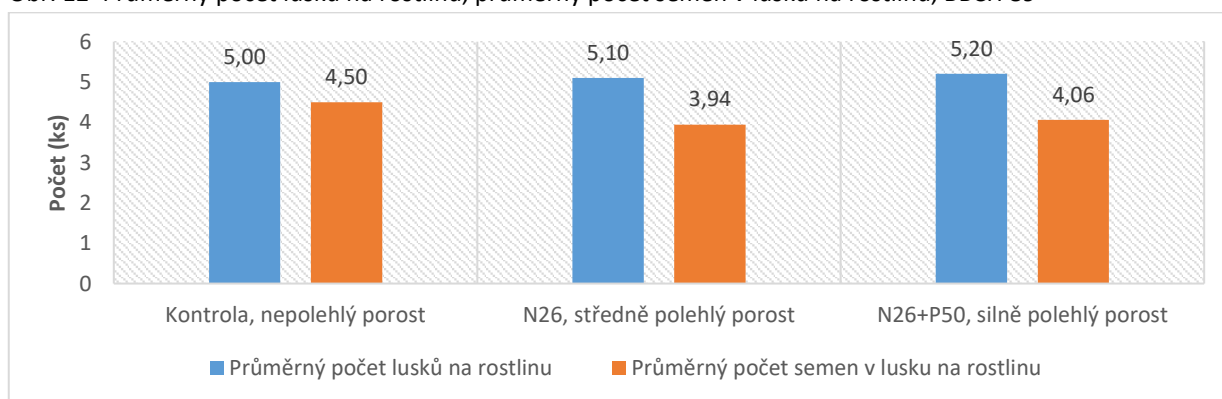
Z obr. 14 je patrný vývoj rostlin mezi BBCH 70 a BBCH 89. Nejvyšší nárůst hmotnosti semen byl zaznamenán u rostlin na pozemku Kontrola (+ 255 %), rostliny na pozemku N26 zvýšily hmotnost svých semen o 168 % a rostliny na pozemku N26+P50 zvýšily hmotnost svých semen o 101 %. Z dalších sledovaných parametrů byl zaznamenán především výrazný úbytek počtu semen na jedné rostlině u mírně polehlého porostu na pozemku N26 (-18,9 %) a u polehlého porostu na pozemku N26+P50 (-18 %).

Parametry jednotlivých rostlin a souhrnné výsledky jsou uvedeny v příloze 9a, 9b, 9c a 9d. Stav porostu před sklizní na jednotlivých pozemcích je zachycen v příloze 11a, 11b a 11c.

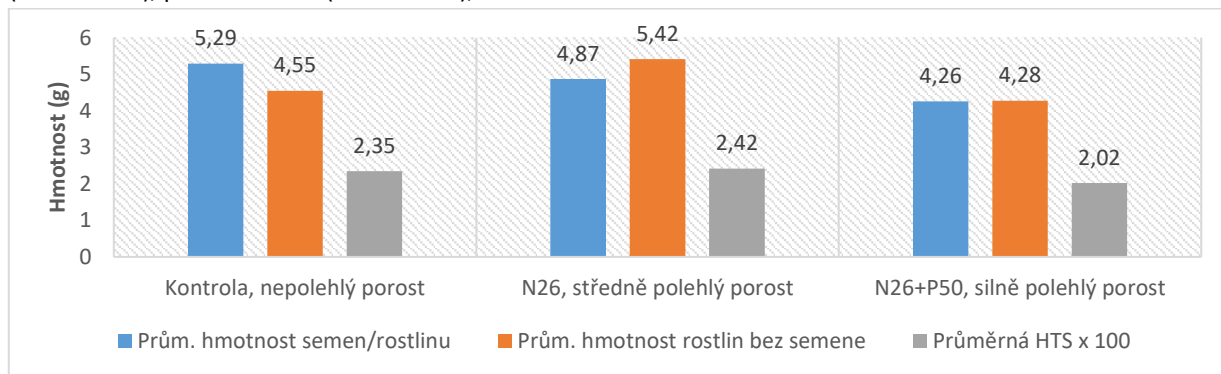
Tab. 14–Průměrné parametry rostlin, BBCH 89

Parametr	Kontrola	N26	N26 + P50
\bar{x} -počet lusků/1 rostlinu	5,00	5,10	5,20
\bar{x} -počet semen v lusku	4,50	3,94	4,06
\bar{x} -počet semen/1 rostlinu	22,50	20,10	21,10
\bar{x} -hmotnost semen/1 rostlinu (g)	5,29	4,87	4,26
\bar{x} -hmotnost 1 rostliny bez semen (g)	4,55	5,42	4,28
\bar{x} -hmotnost tisíce semen- HTS (g)	235,11	242,29	201,86

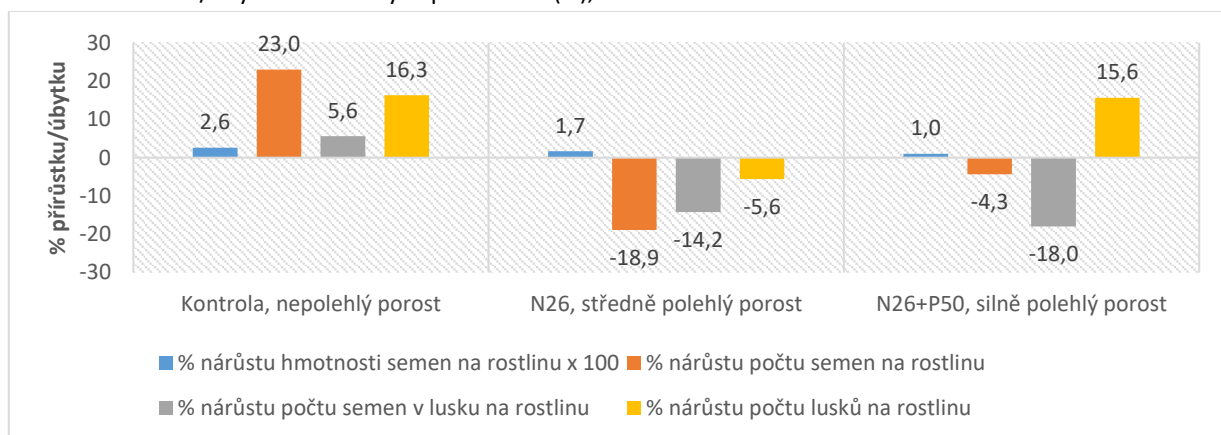
Obr. 12–Průměrný počet lusků na rostlinu, průměrný počet semen v lusku na rostlinu, BBCH 89



Obr. 13–Průměrné hmotnosti semen na rostlinu (sušina 88 %), průměrná hmotnost rostlin bez semen (sušina 90 %), průměrná HTS (sušina 88 %), BBCH 89



Obr. 14–Přírůstek/úbytek sledovaných parametrů (%), srovnání BBCH 70 a BBCH 89



Nasazení prvního luku, rozdělení lusků na rostlinách a délka rostlin

V tabulce č. 15 jsou uvedeny průměrné parametry rostlin, jednotlivé rostliny jsou hodnoceny v příloze č. 8.

Z obr. 15 je patrné, že nejvyšší rostliny se nacházely stále na pozemku N26+P50, zároveň měly také nejvýše nasazené první lusky a nejdelší nasazení lusků.

Na obr. 16 jsou statisticky znázorněny počty lusků v jednotlivých třetinách nasazení lusků u rostlin na všech sledovaných pozemcích. Z obrázku je především patrný vyšší rozptyl počtu lusků ve 2/3 nasazení u pozemku Kontrola a pozemku N26.

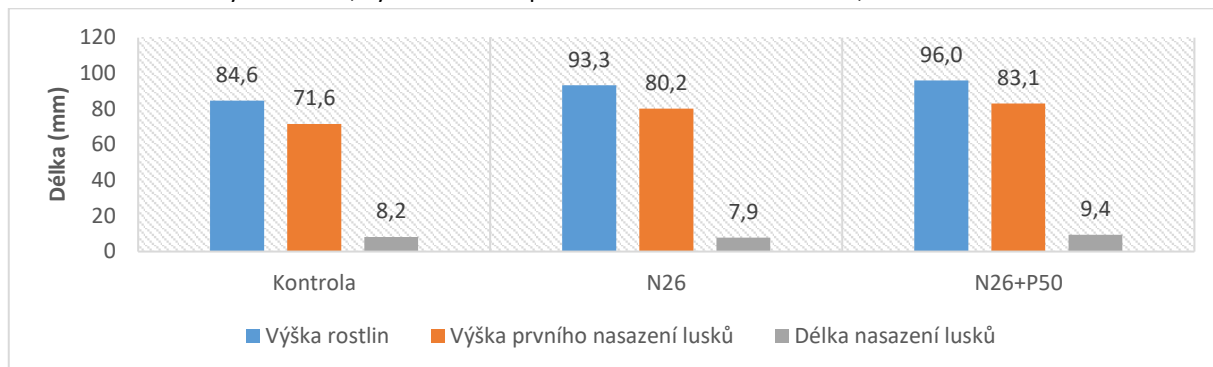
Obr. 16 byl sestaven z parametrů jednotlivých rostlin uvedených v příloze č. 10

Z obr. 17 je patrný vyšší průměrný počet lusků ve 3/3 nasazení u rostlin na pozemku N26+P50.

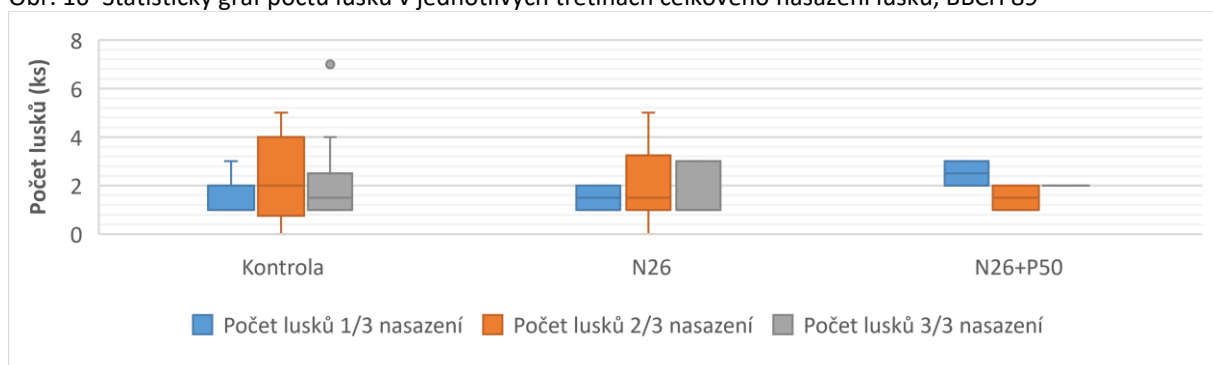
Tab. 15–Průměrné parametry rostlin, BBCH 89

Parametr/ pozemek	Výška rostliny (mm)	Výška nasazení nad povrchem (mm)	Délka nasazení (mm)	Počet lusků 1/3	Počet lusků 2/3	Počet lusků 3/3	Počet lusků na rostlině
Kontrola	84,6	71,6	8,2	1,7	2,2	2,2	6,1
N26	93,3	80,2	7,9	1,5	2,1	1,7	5,3
N26+P50	96,0	83,1	9,4	1,8	1,5	2,7	6,0

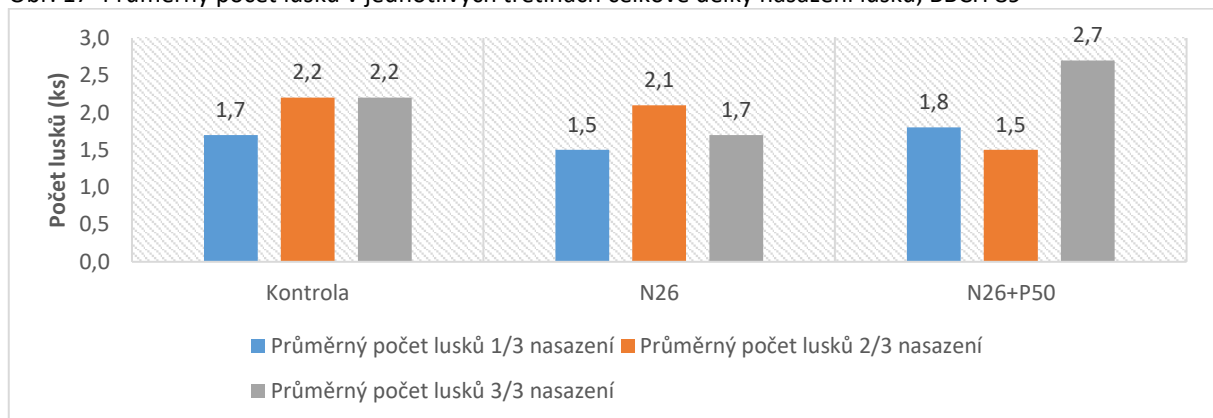
Obr. 15–Průměrná výška rostlin, výška nasazení prvního lusků a délka nasazení, BBCH 89



Obr. 16–Statistický graf počtu lusků v jednotlivých třetinách celkového nasazení lusků, BBCH 89



Obr. 17–Průměrný počet lusků v jednotlivých třetinách celkové délky nasazení lusků, BBCH 89



5.2.4 Výsledky sklizně

V tabulce č. 18 jsou uvedeny vypočtené výnosy semen z průměrné hmotnosti semen na rostlinu a počtu rostlin na 1 ha. Výpočet byl proveden ze semen odebraných v BBCH 89. V tabulce č. 19 je uveden skutečný výsledek sklizně a porovnání s vypočtenými hodnotami.

Tab. 16–Vypočtený výnos

Parametr/poselek	Průměrná hmotnost semen . rostlina ⁻¹ (g)	Počet vzešlých rostlin ks . ha ⁻¹ (polní vzcházivost 70 % z vyšetých zrn) (mil. ks)	Vypočtený výnos, sušina 88 %, čistota 100 % (t)
Kontrola	5,29	0,77	4,07
N26	4,87	0,77	3,75
N26+P50	4,26	0,77	3,28

Tab. 17–Skutečný výnos

Varianta	Sklizená plocha (ha)	Hmotnost (t)	Přepočet na ha, sušina 88 %, nečistoty do 5 % (t)	Podíl skutečného výnosu na vypočteném výnosu, nečistoty nezapočítány (%)
Kontrola	0,0614	0,17917	2,91808	71,7
N 26	0,0614	0,14817	2,41319	64,4
N 26 + P 50	0,0614	0,13798	2,24723	68,5

6 Diskuze

6.1 Navýšení obsahu rostlinám přístupného fosforu v půdě

Navýšení průměrného obsahu fosforu v orničním profilu

Na obr. 1 je znázorněno navýšení obsahu rostlinám přístupného fosforu průměrně v celém orničním profilu po sklizni rostlin hrachu. Toto navýšení bylo zaznamenáno i na fosforem nehnojených pozemcích.

Dle Vaňka et al. (2016) odeberou rostliny hrachu na vytvoření 1 t výnosu 6,6–6,8 kg P.ha⁻¹. Dle Škarpy et al. (2019) obsahují hrachová semena cca 4 kg P.t⁻¹ (0,39–0,43 % fosforu při sušině 88 %). V posklizňových zbytcích hrachu (sláma ponechána na poli) se tak do půdy může navrátit až cca 40 % z celkově odebraného fosforu rostlinou za vegetaci. Při průměrném výnosu semen 3 t.ha⁻¹ tak může být v posklizňových zbytcích obsaženo až 8 kg P.ha⁻¹.

Odběry půdních vzorků však proběhly 12.10.2019, kdy sláma a mohutnější kořeny nebyly plně mineralizovány (nebyl mineralizován organický P). Ha et al. (2007) uvádějí, že zapravením zralých rostlin hrachu do půd s nízkým obsahem rostlinám přístupných forem fosforu nedošlo k navýšení těchto forem fosforu v půdě a to ani po 61 dnech od zapravení (uvolnilo se jen tolik fosforu, kolik využily mineralizující mikroorganismy).

Faktorem, který by mohl dále zpomalit mineralizaci rostlinných zbytků hrachu je Kováříkem et al. (2015) uváděné snížené množství mikrobiální biomasy půdy v letním období, kdy díky vysoké teplotě v letních měsících klesl obsah uhlíku mikrobiální biomasy o více než ½ oproti období nejvyšší mikrobiální aktivity (duben až květen). Fosfor ve hrachových zbytcích by tak v tomto období měl v menší míře přecházet nejen do minerálních forem, ale i do labilních (snadno mineralizovatelných) forem.

Naopak faktorem urychlujícím mineralizaci posklizňových zbytků hrachu je přítomnost půdního mezo, makro a megaedafonu (chvostokoci, stejnonožci, mnohonožky, hmyz, žížaly–fosfatázy v jejich zažívacím traktu). Ha et al. (2007) uvádějí, že v jejich pokusu oddělili rostlinné zbytky od okolní půdy nylonovou sítí, fosfor tak mohly odštěpovat z organické hmoty pouze fosfatázy extracelulárně produkované půdními mikroorganismy, případně uvolňovat trávením predátoři těchto mikroorganismů (hlístice, draví roztoči). Dle Šarapatky (2014) však mezo, makro i megaedafon tvoří celkem pouze cca 5–10 % hmotnosti celkového edafonu v půdě. Podíl hmotnosti mohou dle stejného autora výrazně zvýšit jen žížaly (200 až 4 000 kg.ha⁻¹). Na dlouhodobě oraných, pesticidně ošetřovaných plochách bez výrazných dodávek kvalitní organické hmoty bude však jejich hmotnost pravděpodobně u dolní hranice rozmezí.

Při odběru půdních vzorků (12.10.2019) bylo subjektivně pozorováno malé množství žížal i jejich specifických, koprolity inkrustovaných chodbiček (teplá a suchá půda).

I přes vhodný poměr C:N (25:1) hrachové slámy tak byly nejspíše plně mineralizovány pouze jemné části kořenů (případně kořenové hlízky), které jsou dle Šarapatky (2014) plně rozloženy během 1–3 týdnů.

Určitá část rostlinám přístupných forem fosforu se mohla uvolnit do půdy mineralizací rostlinných zbytků předplodiny. Sláma předplodiny (pšenice) však byla z pozemku sklizena. Kolář & Kužel (1999) uvádějí, že kulturní plodiny vytvoří cca 3,5 t.ha⁻¹ kořenů. Spolu se strništěm (dělám vysoké) a nesebranými plevami tak mohlo zůstat na pozemku cca 4 t.ha⁻¹ rostlinných zbytků pšenice. Tyto zbytky obsahovaly cca 4 kg P.ha⁻¹ (0,11 %). Dle Černého et al. (2018) je z tohoto množství fosforu využito následující rok rostlinami 55 %. Rostlinné zbytky předplodiny tak mohly přispět k výživě rostlin hrachu cca 2,2 kg.ha⁻¹ (cca 0,5 mg P.kg⁻¹ ornice). Rostliny hrachu však odebraly během svého růstu přibližně desetinásobné množství fosforu (výnos semen cca 3 t.ha⁻¹).

Přes tento odběr a nejspíše i nízké uvolnění fosforu mineralizací hrachových zbytků však došlo i na fosforem nehnojených pozemcích k navýšení rostlinám přístupných forem fosforu. Na pozemku N26 průměrně o 2,5 mg P.ha⁻¹, na pozemku Kontrola o 0,6 mg P.ha⁻¹. Toto je ve shodě s tvrzením Duchoně (1948), Laholy et al. (1990) či Houby et al. (2009), kteří zmiňují schopnost rostlin hrachu exkretovat do půdního prostředí velké množství kyselin a enzymů (zvláště po plném rozběhnutí symbiotické fixace dusíku). Tím je ve zvýšené míře uvolňován fosfor nejen z minerálního podílu půdy, ale i z posklizňových zbytků předplodin. Uvolněné ortofosforečnany následně projdou metabolismem rostlin a fosfor je v nich nejen uložen, ale i průběžně uvolněn zpět do půdy exudáty.

Nárůst průměrného obsahu fosforu v celém půdním profilu (díky jeho importu v hnojivu) nebyl na pozemku N26+P50 (v porovnání s ostatními pozemky) zaznamenán (obr. 1).

Na tomto pozemku také nebyl zaznamenán konečný vyšší výnos semen či nadzemní biomasy rostlin oproti ostatním pozemkům, který by mohl zapříčinit vyšší odběr fosforu z půdy. Bilančně by se tak měl projevit vyšší obsah fosforu v půdním prostředí.

Příčinou „neprojevení“ mohla být nižší hodnota pH (5,66) na tomto pozemku. Dle Balíka et al. (2008) dosahuje v tomto prostředí chemická sorpce fosforu s železem a hliníkem téměř svého vrcholu. Pozemek Kontrola dosahoval pH 6,73 a pozemek N26 dosahoval pH 6,31. V těchto prostředích dle stejného autora ještě zvýšená sorpce fosforu s vápníkem neprobíhá.

Další příčinou mohla být Škarpou et al. (2019) uváděná vyšší fortifikace semen fosforem v případě jeho vyšší dostupnosti pro rostlinu. Tento autor uvádí, že po aplikaci 50 kg P.ha⁻¹ (aplikováno na povrch půdy, po vzejití porostu) v jednoduchém superfosfátu se zvýšil obsah fosforu v absolutní sušině semen hrachu odrůdy Eso o 7 %. K vyšší fortifikaci fosforem mohlo dojít i u posklizňových zbytků rostlin.

Hlavním faktorem však byla nejspíše heterogenita půdního prostředí, kdy se v průměrném vzorku půdy z celého orničního profilu promítl nižší obsah fosforu ve spodní vrstvě půdy.

Chemické rozbory půdních vzorků odebíraných na stejném pozemku, ale z jednotlivých vrstev půdy prokázaly výrazné navýšení obsahu fosforu především ve vrstvě půdy 0–0,1 m. Průměrný obsah fosforu v celém orničním profilu vypočtený z obsahů v jednotlivých vrstvách půdy byl pouze o 2 mg P.kg⁻¹ vyšší než obsah fosforu ve vzorku odebraném na stejném pozemku z celého orničního profilu. K záměně vzorků během externí analýzy tedy nejspíše nedošlo.

Navýšení obsahu fosforu v jednotlivých vrstvách půdy

Na obr. 2 je znázorněn pohyb fosforu půdním prostředím. K výraznému nárůstu obsahu fosforu došlo především ve vrstvě půdy 0–0,05 m (+118,4 %), ale také ve vrstvě půdy 0,05–0,1 m (+82,8 %). Fosforečné hnojivo bylo kombinací kultivátoru a výřivých bran zapraveno do hloubky cca 0,02–0,05 m. Následné spolupůsobení vyšší vlhkosti půdy při zapravení a difuzního spádu díky rychlému uvolnění vodorozpustného fosforu v aplikovaném hnojivu (omezené kapacitě rychle sorbujících koloidů v bezprostředním okolí) pak mohlo zapříčinit zvýšení obsahu rostlinám přístupného fosforu i v zóně cca 0,05 m pod aplikovaným hnojivem.

6.2 Reakce rostlin na hnojení fosforem

6.2.1 Parametry rostlin v růstové fázi BBCH 22

Hmotnost biomasy kořenů rostlin hrachu byla při tomto sledování hodnocena jen orientačně (příloha 6a). I přes rozmočení kořenového balu ve vodě se nepodařilo nedestruktivně separovat jemné kořenové vlášení z jílovitohlinité půdy tak, aby bylo identifikovatelné od vlášení ostatních rostlin.

Mírně vyšší hmotnost kořene a nadzemních částí rostlin byla zaznamenána na pozemcích N26 a N26+P50.

Procentické zastoupení hmotnosti kořene na hmotnosti celé rostliny včetně kořene bylo u hnojených pozemků také mírně vyšší (shodně 24 %) oproti rostlinám na pozemku Kontrola (19,7 %). Toto není ve shodě se zjištěním Wanga et al. (2016), který uvádí, že rostliny trpící nedostatkem fosforu tvoří v poměru k nadzemním částem vždy více kořenů, než rostliny fosforem dostatečně zásobené. V případě nedostatku fosforu se však navyšuje především tvorba jemného kořenového vlášení, které nebylo možné s dostatečnou přesností separovat. Subjektivně nebyla pozorována ani výraznější nodulace kořenů v důsledku hnojení fosforem. Možným vysvětlením byl nedostatek srážek od počátku růstu rostlin. Klimek–Kopyra et al. (2018) uvádějí, že navýšení počtu hlízek v důsledku hnojení fosforem bylo pozorovatelné pouze v případě vláhově příznivých podmínek.

Naopak záporný vliv na množství hlízek nebyl pozorován v důsledku dusíkatého hnojení, což je ve shodě s tvrzením Laholy et al. (1990), který uvádí, že předseťové hnojení do dávky 60 kg N.ha⁻¹ nevedlo k inhibici kolonizace či činnosti hlízkových bakterií.

Hmotnost nadzemní biomasy rostlin znázorněna na obr. 3 již byla stanovována z dostatečně průkazného vzorku rostlin (příloha 6c). Z obrázku je patrný nárůst průměrné hmotnosti nadzemních částí rostlin v závislosti na způsobu hnojení.

Rostliny hnojené pouze dusíkem vytvořily o 23,4 % vyšší hmotnost nadzemní biomasy než rostliny nehnojené. V této růstové fázi (48 dní po zasetí) se tak nejspíše potvrdil Škarpou et al. (2019) uváděný kladný vliv „startovací“ dávky dusíku na překonání počátečního „hladového

období“, které u luskovin končí přibližně 4–6 týdnů po jejich zasetí (plné rozběhnutí symbiotické fixace dusíku).

Rostliny hnojené kombinací dusíku a fosforu vytvořily o 42,6 % vyšší hmotnost nadzemní biomasy než rostliny nehnojené. Zde se nejspíše synergicky přidal i vliv aplikovaného fosforu. Potvrdilo se tak tvrzení Vaňka et al. (2016), že v případě nedostatku rostlinám přístupného fosforu v půdě jsou zvláště mladé rostliny po vyčerpání fyтинových zásob semen díky nevyvinutému kořenovému systému omezovány v růstu.

Na obr. 4 jsou statisticky zaznamenány hmotnosti jednotlivých rostlin. Rostliny nevykazovaly výraznější odchylky, což naznačuje vyrovnaný stav půdního prostředí na jednotlivých pozemcích, rovnoměrnou aplikaci hnojiv případně dobrou kvalitu osivového materiálu.

6.2.2 Parametry rostlin v růstové fázi BBCH 70

Shrnutím jednotlivých parametrů rostlin (obr. 5, 6, 7, 8) můžeme dojít k závěru, že rostliny na pozemku N26+P50 oproti rostlinám na pozemku Kontrola vytvořily delší lodyhy (o 26,5 %), vyšší hmotnost semen (o 42,3 %), která lokalizovaly výše na lodyze (o 33,5 %). Zároveň však vytvořily mírně nižší hmotnost nadzemní biomasy bez semen (o 4,4 %) než nehnojené rostliny. Slabší a delší lodyhy rostlin na pozemku N26+P50 tak musely nést výrazně těžší a výše umístěná semena než rostliny na pozemku Kontrola.

Tento stav byl nejspíše způsoben optimálnější zásobeností fosforem (pozemek N26+P50) v dřívějších fázích růstu rostlin. Rostliny začaly tvořit dříve květy a lusky. Dříve také začaly soupeřit o prostor a světlo a byly nuceny prodlužovat lodyhy.

Nedostatek světla a prostoru na pozemku N26+P50 by mohl vysvětlovat i mírně vyšší nasazení lusků ve 3/3 délky celkového nasazení (obr. 8, obr. 9).

Rostliny na pozemku Kontrola byly v mírném zpoždění a v reakci na délku dne (dlouhodobní až neutrální rostliny) nejspíše zpomalily vegetativní růst při kratších lodyhách a zvýšené intenzitě tvorby lusků.

Z obr. 5 a 6 je patrné, že rostliny na pozemku Kontrola vytvořily jen o něco méně lusků a semen v lusku než rostliny na ostatních variantách hnojení.

Toto zbrždění růstu v prospěch tvorby generativních orgánů by mohla potvrdit i na obr. 10 a 11 znázorněná závislost hmotnosti semen na hmotnosti nadzemní biomasy rostlin bez semen. U rostlin na pozemku Kontrola změny hmotnosti semen z 28 % kopírovaly změny hmotnosti nadzemní biomasy bez semen. U pozemku N26+P50 změny hmotnosti semen z 86 % kopírovaly změny hmotnosti nadzemní biomasy bez semen. Toto zjištění naznačuje, že rostliny na pozemku Kontrola tvořily semena s menším ohledem na stav své nadzemní biomasy, tedy tvořily je přednostně.

Až do této růstové fáze vykazovaly rostliny hnojené pouze dusíkem vyšší hodnoty všech sledovaných parametrů než nehnojené rostliny. Tento stav může dokazovat mnohými autory zmiňovanou inhibici kolonizace kořenů rhizobiálními bakteriemi v důsledku nízké koncentrace ortofosforečanů v půdním roztoku. Například Jin et al. (2014) uvádějí zvýšení kolonizace kořenů bakteriemi o 133 % při změně obsahu přístupného fosforu v půdě z 15 mg.kg⁻¹ na

60 mg.kg⁻¹. Rostliny nehnojené dusíkem tak pravděpodobně nedisponovaly dostatečným množstvím rhizobií pro zásobení svého metabolismu dusíkem.

6.2.3 Parametry rostlin v růstové fázi BBCH 89

V této růstové fázi se parametry rostlin v porovnání mezi jednotlivými variantami hnojení oproti růstové fázi BBCH 70 výrazně změnily. Příčinou nejspíše bylo polehnutí porostu na pozemku N26 a především na pozemku N26+P50 (zaznamenáno v příloze 11a, 11b a 11c).

Z obr. 13 je zřejmé, že snižování především výnosových parametrů rostlin bylo v přímé návaznosti na stupeň polehnutí. Zároveň se nejvíce polehlý porost (pozemek N26+P50) stal z výnosově nejnadhlednějšího (BBCH 70) nejméně výnosově perspektivním. Snížení sledovaných parametrů v důsledku polehnutí mohlo být způsobeno vyšším napadením houbovými chorobami (kontakt se zemí), dále omezením fotosyntetické aktivity v důsledku vzájemného zastínění přilehlých rostlin a také omezením průchodnosti xylémových či floémových cest.

Na obr. 14 je tento stav znázorněn v porovnání mezi BBCH 70 a BBCH 89. U nepolehlého porostu (pozemek Kontrola) došlo k 255% nárůstu hmotnosti semen, 168% nárůst hmotnosti semen byl zaznamenán u středně polehlého porostu (pozemek N26) a pouze 101% nárůst hmotnosti semen byl zaznamenán u nejvíce polehlého porostu (pozemek N26+P50). Zároveň došlo u pozemků N26 a N26+P50 k poklesu průměrného počtu semen na rostlinu a průměrného počtu semen v lusku, kdy patrně v důsledku nedostatečné výživy malá semena zanikla.

Z obr. 13 je dále patrná nižší hmotnost semen (HTS) u polehlého porostu (pozemek N26+P50). Dále je patrné, že spolu s omezením tvorby semen byla omezena i tvorba zbylé nadzemní hmoty (její hmotnosti, prodlužování lodyh pokračovalo).

Z obr. 15 je patrné, že rostliny na kontrolní variantě zvětšily délku lodyh, ale stále byly o 10 % kratší než částečně polehlé (N26) i polehlé (N26+P50) rostliny.

Mezi BBCH 70 a BBCH 89 došlo u rostlin na všech sledovaných pozemcích k výraznému navýšení počtu lusků. Nejvíce polehlé rostliny na pozemku N26+P50 navýšily v tomto mezidobí počet lusků o 15,6 %. Zjištění, že v pozdějších fázích vývoje rostliny (po BBCH 70) vznikne ještě poměrně velký počet lusků, je ve shodě s tvrzením Houby et al. (2009), který uvádí, že doba kvetení u luskovin může trvat i více než měsíc a souvisí s jejich indeterminantním (neukončeným) charakterem růstu.

U pozemku N26 byl zaznamenán pokles průměrného počtu lusků na rostlinu. Toto může být dáno především způsobem hodnocení rostlin (rostliny byly z pozemku odebrány a v následném BBCH se odebíral odlišný soubor rostlin). Houby et al. 2009 však zmiňuje i možný opad mladých lusků v případě stresových podmínek.

Z obr. 16 a obr. 8 je patrné, že v BBCH 89 i BBCH 70 více kolísaly počty lusků ve 2/3 a 3/3 nasazení, což může značit poškození porostů divokou zvěří (spásání lusků).

Na vysokém polehnutí rostlin na pozemku N26+P50 se mohl spolupodílet nižší obsah vápníku (příloha 4, pH 5,66, 2 370 mg Ca.kg⁻¹). Lahola et al. (1990) uvádí, že vápník zvyšuje odolnost

luskovin k polehnutí a k houbovým chorobám. Zvýšený výskyt chorob způsobujících polehnutí však pozorován nebyl.

V průběhu celého vegetačního období panoval velký nedostatek srážek (tab. 7), polehnutí rostlin tak nejspíše nemohlo být způsobeno uvolněním živin z vyšší KVK jílovitohlinité půdy, která se na pokusných pozemcích nachází.

V případě příznivějších vláhových a výživových podmínek by nejspíše zvolený výsevek 1,1 mil. semen.ha⁻¹ vedl k růstu mohutnějších rostlin, jejich vzájemné konkurenci o prostor (světlo), iniciaci dlouhivého růstu, a tím zvýšení rizika polehnutí porostu.

6.2.4 Výsledky sklizně

V tab. 18 je uveden předpokládaný výnos dle průměrného počtu vzešlých rostlin na jednotce plochy. Tato hodnota je ve shodě s údaji Houby et al. (2009), který uvádí vzcházivost luskovin dle vitality osiva a přírodních podmínek i méně než 70 %.

Sklizeň proběhla bez větších komplikací, polehlý porost nebyl prorostlý plevelnými druhy rostlin. Předpokládaný výnos byl zhruba o 30 % vyšší než skutečný, což naznačuje vysoké zklizňové ztráty. Toto mohlo být způsobeno vypadáváním semen (pukání lusků), nedokonalým sběrem polehnutých rostlin a poškozením divokou zvěří.

7 Závěry

- Po předseťové aplikaci hnojiva s vyšším obsahem vodorozpustných forem fosforu a jeho zapravení do hloubky cca 0,02–0,05 m byl po sklizni plodiny zaznamenán zvýšený obsah rostlinám přístupného fosforu ve vrstvě půdy 0–0,1 m.
- V prostředí, ve kterém byl stanoven obsah přístupného fosforu rostlinám dle metody Mehlich 3 ve výši $10,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ reagovaly rostliny na dodání $50 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ a $26 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ následujícím způsobem. Do růstové fáze BBCH 22 vytvořily výrazně vyšší hmotnost nadzemní biomasy v porovnání s rostlinami nehnojenými. Do růstové fáze BBCH 70 vytvořily výrazně vyšší hmotnost semen, délku lodyh a vyšší nasazení prvního lisku. Ve hmotnosti nadzemní biomasy, množství lusků na rostlinu a množství semen na rostlinu se výrazně neodlišovaly od nehnojených rostlin. Do růstové fáze BBCH 89 hnojené rostliny v důsledku vyšší délky lodyh, výše nasazených semen a vyšší hmotnosti semen polehly. Tento stav se projevil především na snížení hmotnosti semen a zastavením vývinu nových lusků a semen. Poskytnutý výnos semen následně kopíroval stupeň polehnutí porostu. Rostliny hnojené pouze dusíkem poskytly o cca 10 % a rostliny hnojené dusíkem a fosforem o cca 20 % nižší výnos než nehnojené rostliny.
- Rostliny na pozemku hnojeném pouze dusíkem v dávce $26 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ vykazovaly až do růstové fáze BBCH 70 vždy vyšší sledované parametry než nehnojené rostliny a zároveň nižší parametry než rostliny hnojené kombinací dusíku a fosforu. Pro prostředí s nízkou zásobou rostlinám přístupného fosforu tak mohlo omezit činnost hlízkových bakterií. Tato skutečnost však nebyla dostatečně průkazně potvrzena.
- I relativně nízké, předseťově aplikované dávky fosforu a dusíku mohou způsobit u rostlin hrachu setého výrazný nárůst hmotnosti semen, ale i bujný dlouhý růst lodyh. Tyto lodyhy nejsou následně schopny hmotnost semen unést. I po aplikaci takto nízkých dávek živin je proto vhodné použít chemickou regulaci růstu rostlin. V případě příznivějších vláhových a výživových půdních podmínek není vhodné u rostlin hrachu setého odrůdy Eso volit horní hranici doporučeného počtu jedinců na jednotku plochy.
- Předpoklad, že jarní předseťová aplikace fosforu zvýší výnos semen hrachu setého na půdách s nízkým obsahem přístupného fosforu, se touto prací nepodařilo prokázat. V růstové fázi BBCH 70 (před polehnutím porostu) však rostliny hnojené fosforem a dusíkem vytvořily o 42,3 % vyšší hmotnost semen, než rostliny nehnojené a o 16,5 % vyšší hmotnost semen, než rostliny hnojené pouze dusíkem (hmotnost fotosynteticky aktivního aparátu byla zhruba shodná). Do této růstové fáze byl fosforečným hnojením výše uvedeným způsobem pravděpodobně pozitivně ovlivněn možný budoucí výnos.

8 Seznam literatury a použitých zdrojů

Ahokas H, Heikkilä E, Ramstedt L. 2011. Pea roots affect immobilisation and solubilisation of phosphorus depending on genotype, stage and phosphorous source. *Hereditas* **148**:85–92.

Balík J, Kulhánek M, Pavlíková D, Tlustoš P, Wisniowska–Kielian B. 2008. Fosfor v půdě. Stránky 23–30 ve Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník ze 14. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, Vaňek V, Pavlík M. 2008. Mobilita prvků a látek v rhizosféře. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Balík J, Tlustoš P, Pavlíková D. 2009. Využití živin při foliární aplikaci. *Úroda* **57**:69–72.

Balík J, Vaněk V, Pavlíková D, Kulhánek M, Jakl M. 2002. Fosfor v půdě a jeho koloběh v přírodě. Stránky 26–34 ve Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z 8. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Bethenfalvay GJ, Yoder JF. 1981. The Glydne–Glomus–Rhizobium symbiosis. *Physiol. Plant* **52**:141–145.

Clarkson DT, Scattergood CB. 1982. Growth and phosphate transport in barley and tomato plants during the development of, and recovery from, phosphate-stress. *Journal of Experimental Botany*, **33.5**:865–875.

Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O, Javor T. 2017. Bilance P, K, Mg v rostlinné výrobě a korelace s obsahem živin v půdách. Stránky 41–48 ve Vaněk V, Balík J, Tlustoš P, editoři. Sborník z 23. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na význam agrochemických rozborů půd. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O. 2018. Hnojení ozimé řepky před setím a na podzim. *Agromanuál* **13**:70–73.

Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O. 2020. Hnojení jarního ječmene fosforem na jaře? *Úroda* **68**:10–14.

Černý J, Balík J, Kulhánek M, Vašák F, Vaňek V. 2014. Využití kalů z čistíren odpadních vod. Stránky 19–26 ve Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z 20. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na zdroje živin a využití odpadních látek v zemědělství. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Černý J, Kulhánek M, Sedlář O, Balík J. 2015. Hnojení obilnin na podzim. *Úroda* **63**:59–61.

Čvančara F. 1962. Zemědělská výroba v číslech. Státní zemědělské nakladatelství Praha, Praha.

Dolejšková J, Marek Z, Hejtmánková A, Mader P. 2000. Chemie I. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Dostál J, Lošák T, Javor T, Hajzlerová L, Hlušek J, Linhart M. 2014. Dosavadní zkušenosti s aplikací digestátu z bioplynových stanic na zemědělskou půdu. Stránky 27–35 ve Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z 20. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na zdroje živin a využití odpadních látek v zemědělství. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Duffková R, Mühlbachová G, Fučík P, Zajíček A, Hejduk T, Káš M, Diviš P, Skála J, Štyx J. 2016. Metodický postup pro snížení rizika vyplavení fosforu ze zemědělských půd do povrchových a podzemních vod pomocí agrotechnických opatření s využitím metody P-indexu. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha

Duchoň F. 1948. Výživa a hnojení kulturních rostlin zemědělských. Československá akademie zemědělská, Praha.

Finck A. 1982. Fertilizers and fertilization: introduction and practical guide to crop fertilization. Verlag Chemie, German Federal Republic.

Gardner WK, Barber DA, Parbery DG. 1982. Effect of microorganisms on the formation and activity of proteoid roots of *Lupinus albus* L. *Australian Journal of Botany* **30.3**:303–309.

Geneva M, Zehirov G, Djonova E, Kaloyanova N, Georgiev G, Stancheva I. 2006. The effect of inoculation of pea plants with mycorrhizal fungi and *Rhizobium* on nitrogen and phosphorus assimilation. *Plant Soil Environ* **52**:435–440.

Grant CA, Flaten BN, Tomasiewicz DJ, Sheppard SC. 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science* **81.2**:211–224.

Grindler M, Baláž M, Hršelová H, Jansa J, Vosátka M. 2004. Mykorhizní symbióza O soužití hub s kořeny rostlin. Nakladatelství Akademie věd České republiky, Praha.

Ha KV, Marschner P, Bünemann EK, Smernik RJ. 2007. Chemical changes and phosphorus release during decomposition of pea residues in soil. *Soil Biology and Biochemistry* **39**:2696–2699.

Hosnedl V, Hochman M. 1994. Základy pěstování hrachu. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství ČR v Praze, Praha.

Houba M, Dostálová R. 2018. Luskoviny: charakteristika, pěstování, využití. Profi Press s.r.o., Praha.

Houba M, Hochman M, Hosnedl V. 2009. Luskoviny pěstování a užití. Nakladatelství Kurent s.r.o., České Budějovice

Hejnák V, Zámečnicková B, Zámečník O, Hnilička F. 2005. Fyziologie rostlin. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Jan J, Borovec J, Kopáček J. 2015. Assessment of phosphorus associated with Fe and Al (hydr) oxides in sediments and soils. *Journal of soils and sediments* **15.7**:1620–1629.

Javot H, Penmetsa RV, Terzaghi N, Cook DR, Harrison MJ. 2007. A *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**:1720–1725.

Jin J, Lauricella D, Armstrong R, Sale P, Tang C. 2014. Phosphorus application and elevated CO₂ enhance drought tolerance in field pea grown in a phosphorus-deficient vertisol. *Annals of botany* **116**:975–985.

Jung A. 2009. Carl Sprengel—The founder of agricultural chemistry: A re-appraisal commemorating the 150th anniversary of his death. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172.5**:633–636.

Klimek-Kopyra A, Rebilas K. 2018. Dependence of pea root mass distribution on weather conditions under varying levels of phosphorus application. *International Agrophysics* **32**:365–372

Kolář L, Kužel S. 1999. Organická hmota v půdě. Stránky 15–19 ve Vaňek V, Kolář L., Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z konference Racionální používání hnojiv zaměřené na problematiku půdní organické hmoty, použití organických hnojiv a potřeby hnojení minerálními hnojivy. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Koontz H, Biddulph O. 1957. Factors affecting absorption and translocation of foliar applied phosphorus. *Plant Physiology* **32.5**:463.

Kovar JL, Pierzynsky GM. 2009. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters second edition. Southern cooperative series bulletin **408**: 1–122

Kovářík J, Černý J, Holečková Z, Tichá A, Balík J. 2015. Vliv stanoviště a termínu odběru půdy na obsah uhlíku mikrobiální biomasy. Stránky 103–106 ve Vaňek V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z 21. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na půdu a půdní úrodnost. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Kubát K, Hrouda L, Chrtěk J, Kaplan Z, Kirschner J, Štěpánek J. 2002. Klíč ke květeně České republiky. Nakladatelství *Academia*, Praha.

Lahola J, et al. 1990. Luskoviny: Pěstování a využití. Státní zemědělské nakladatelství Praha, Praha.

Lošák T. 2019. Možnosti využití hnojiv s polyfosfáty pro mimokořenovou výživu rostlin. *Úroda* **67**:38-39.

Lefèvre W. 2018. The Méthode de nomenclature chimique (1787): A Document of Transition. *Ambix* **65**:9–29. DOI: 10.1080/00026980.2017.1418233.

Li XL, George E, Marschner H. 1991. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant and Soil* **136.1**:41–48.

Marečková H. 1983. Biologická fixace dusíku a její využití. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, Praha.

Matula J. 2012. Inovace metod kontroly výživného stavu zemědělských půd fosforem z konsensu produkčního a environmentálního aspektu šetrného využívání přírodních zdrojů. 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**:3086–3091.

Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, **15**:1409–1416.

Ministerstvo zemědělství České republiky. 2019. Situační a výhledová zpráva MZE Luskoviny 2018. Ministerstvo zemědělství České republiky, Praha.

Ning J, Cumming JR. 2001 Arbuscular mycorrhizal fungi alter phosphorus relations of broomsedge (*Andropogon virginicus* L.) plants. *Journal of experimental botany* **52.362**:1883–1891.

Pavlíková D, Pavlík M, Balík J. 2008. Úloha fosforu v rostlinách. Stránky 31–42 ve Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník ze 14. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Ploeg RR, Rienk R, Kirkham MB. 1999. On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum. *Soil Science Society of America* **63**:1055–1062.

Read DWL, Cambell CA. 1981. Bio-cycling of phosphorus in soil by plant roots. *Canadian Journal of Soil Science* **61.4**:587–589.

Richter R. 1997. Půdní úrodnost. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR v Praze, Praha.

Richter R, Hlušek J. 1996. Průmyslová hnojiva, jejich výroba a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR v Praze, Praha.

Richter R, Hlušek J. 1999. Výživa a hnojení rostlin: I. obecná část. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno.

Richter R, Římovský K. 1996. Organická hnojiva, jejich výroba a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR v Praze, Praha.

Rob H. 1983. Vztah kořenového systému a aktivity mikroorganismů k úrodnosti půdy. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, Praha.

Sandaña P, Pinochet D. 2014. Grain yield and phosphorus use efficiency of wheat and pea in a high yielding environment. *Journal of soil science and plant nutrition* **14**:973–986.

Schneider J, Veselý J, Duchoň F, Fabian J, Hampl J. 1959. Výroba průmyslových hnojiv. Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Praha.

Sirový V, Damaška J. 1985. Faktory ovlivňující mobilizaci a migraci živin v zemědělských půdách. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství Praha, Praha.

Slavík F. 1918. O fosforu v železných rudách českého siluru. Tiskárna František Vonka, Praha.

Staddon PL, Ramsey CB, Ostle N, Ineson P. 2003. Rapid turnover of hyphae of mycorrhizal fungi determined by AMS microanalysis of 14 C. *Science* **300.5622**:1138–1140.

Šarapatka B. 2014. Pedologie a ochrana půdy. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc.

Škarpa P, Dostálová R, Školníková M, Antošovský J. 2019. Vliv Hnojení na výnos a obsah živin hrachu a pelušky. *Úroda* **67**:55–59.

Tlustoš P, Száková J, Budňáková M, Hendrych K, Michalík J, Trakal L. 2008. Zdroje fosforu a výroba fosforečných hnojiv. Stránky 42–51 ve Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník ze 14. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Tlustoš P, Švehla P, Pavlík M, Hanč A. 2016. Agrochemie. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

U.S. Geological Survey. 2019. Mineral commodity summaries 2019. U.S. Geological Survey, United States of America. DOI: [org/10.3133/70202434](https://doi.org/10.3133/70202434)

Wang YS, Jensen LS, Magid J. 2016. Differential responses of root and root hair traits of spring wheat genotypes to phosphorus deficiency in solution culture. *Plant, Soil and Environment* **62**:540–546.

Vaňek V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press s.r.o., Praha.

Vaňek V, Štípek K, Šilha J, Balík J. 2002. Systém hnojení fosforem. Stránky 26–34 ve Vaňek V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z 8. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Vostal J. 1994. *Základy výživy a hnojení hlavních plodin*. Agrofert a.s., Praha.

Wei-Dong K, Yong-Guan Z, Bo-Jie F. 2008. Effect of long-term application of chemical fertilizers on microbial biomass and functional diversity of a black soil. *Pedosphere* **18.6**: 801–808.

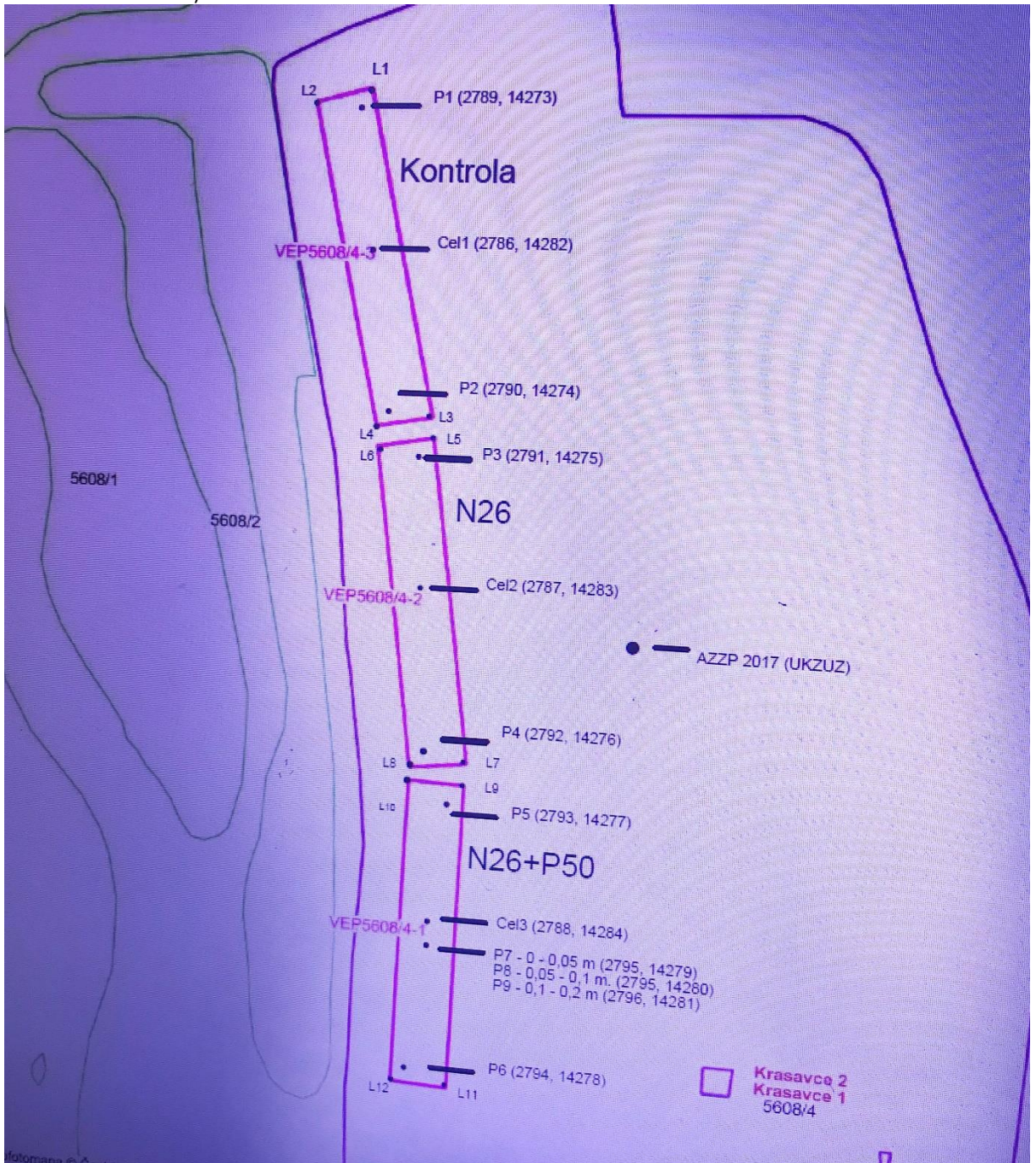
Zámečnicková H, Bazalová M, Száková J. 2013. Analytické aspekty stanovení mobilního fosforu v půdě s použitím metody Mehlich III. Stránky 165–168 ve Vaňek V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editoři. Sborník z 19. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku vápníku a vápnění. Katedra agrochemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

9 Samostatné přílohy

Příloha 1–Odběrná místa a lomové body

Odběrné místo	GPS souřadnice	Lomový bod	GPS souřadnice
P1	49°35.81695'N 13°22.08013'E	L1	49°35.82159'N 13°22.08178'E
P2	49°35.76616'N 13°22.09837'E	L2	49°35.81644'N 13°22.06499'E
P3	49°35.75970'N 13°22.11458'E	L3	49°35.76949'N 13°22.11371'E
P4	49°35.70531'N 13°22.12384'E	L4	49°35.76455'N 13°22.09552'E
P5	49°35.69973'N 13°22.14002'E	L5	49°35.76385'N 13°22.11685'E
P7, P8	49°35.67610'N 13°22.13887'E	L6	49°35.75771'N 13°22.09858'E
P6	49°35.64949'N 13°22.13510'E	L7	49°35.70886'N 13°22.14005'E
Cel1	49°35.78611'N 13°22.09090'E	L8	49°35.70147'N 13°22.12138'E
Cel2	49°35.72949'N 13°22.12261'E	L9	49°35.70393'N 13°22.14159'E
Cel3	49°35.67812'N 13°22.13865'E	L10	49°35.69785'N 13°22.12234'E
		L11	49°35.64971'N 13°22.15046'E
		L12	49°35.64829'N 13°22.13131'E

Příloha 2–Mapa pokusných pozemků, v závorce u odběrových bodů jsou uvedeny identifikátory jednotlivých rozborů dle E.L. Empla Hradec Králové, spol. s.r.o. (první číslo–rozbor z odběrů 1.3.2019, druhé číslo–rozbor z odběrů 12.10.2019)



Příloha 3–Kompletní výsledky rozborů půdy, odběr vzorků 1.3.2019

odb. místo	pH (CaCl ₂)	Organická hmota (%)	KVK (mmol/kg)	P (mg/kg) Mehlich 3	K ⁺ (mg/kg) Mehlich 3	Mg ²⁺ (mg/kg) Mehlich 3	Ca ²⁺ (mg/kg) Mehlich 3
P1				10,50			
P2				10,50			
P3				8,67			
P4				10,90			
P5				7,62			
P6				10,60			
P7 0-0,05 m				8,76			
P8 0,05-0,1 m				8,76			
P9 0,1-0,2 m				9,57			
Cel 1	6,62	0,73	151,20	13,70	147,00	306,00	2 450
Cel 2	6,54	1,04	180,50	9,95	79,50	440,00	2 850
Cel 3	5,95	1,26	147,10	14,50	103,00	312,00	2 380

Příloha 4–Výsledky rozborů půdy, odběr 12.10.2019

Vzorek/ živina	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7 0- 0,05 m	P8 0,05- 0,1 m	P9 0,1- 0,2 m	Cel1	Cel2	Cel3
P (mg.kg ⁻¹)	15,00	12,80	6,74	14,20	13,20	13,20	19,00	15,90	12,70	14,90	16,10	12,90
K ⁺ (mg.kg ⁻¹)										217,00	182,00	162,00
Mg ²⁺ (mg.kg ⁻¹)										351,00	344,00	326,00
Ca ²⁺ (mg.kg ⁻¹)										3 340,00	3 300,00	2 370,00
Ph CaCl ₂										6,73	6,31	5,66

Příloha 5a–Záměrné setí při hraniční (vyšší) vlhkosti půdy



Příloha 5b–Zaseté pokusné plochy



Příloha 6a–Orientační hmotnosti rostlin BBCH 22

Parametr/ pozemek	Průměrná hmotnost kořene (g)	Průměrná hmotnost nadzemní části (g)	Průměrná hmotnost celé rostliny (g)	Podíl hmotnosti kořene z cekové hmotnosti rostliny (%)	Podíl hmotnosti nadzemní části z celkové hmotnosti rostliny (%)
Kontrola	0,13	0,53	0,66	19,70	80,30
N26	0,17	0,53	0,70	24,00	76,00
N26+P50	0,17	0,53	0,70	24,00	76,00

Příloha 6b–Orientační porovnání rostlin BBCH 22



Příloha 6c–Hmotnosti nadzemních částí rostlin, BBCH 22

Rostliny/ pozemek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
Kontrola	0,5	0,6	0,4	0,5	0,7	0,3	0,5	0,5	0,3	0,4	0,47
N26	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5	0,7	0,9	0,5	0,5	0,58
N26+P50	0,5	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,5	0,8	0,6	0,8	0,67

Příloha 7a–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 70, Kontrola

Rostl./ Počet lusků	0 sem.	1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.	5 sem.	6 sem.	7 sem.	8 sem.	Lusků / rostl.	Semen/ rostl.	Hmotnost semen (g)	Hmotnost rostliny bez semen (g)
1		1		1	2	1	1	1		7	30	3,0	6,9
2				1	2	1				4	16	1,4	4,5
3				1	2	4	1			8	37	4,2	9,4
4										0	0	0	1,4
5						1				1	5	0,2	2,1
6	1						1			2	6	0,2	2,2
7	1	1	1		1	1				5	13	0,5	11,5
8						3	3			6	33	1,8	6,1
9			1	1	1	2				5	19	1,4	3,7
10					2	2	1			5	24	2,2	4,9

Příloha 7b–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 70, N26

Rostl./ Počet lusků	0 sem.	1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.	5 sem.	6 sem.	7 sem.	8 sem.	Lusků / rostl.	Semen / rostl.	Hmotnost semen (g)	Hmotnost rostliny bez semen (g)
1			1		1	2	1			5	24	1,8	4,5
2					1	3	3			7	37	3,5	7,7
3			1			2	1			4	18	0,3	4,4
4					2	1		2		5	25	2,2	4,6
5				2	2		1	1		6	27	2,8	7,2
6				1	1	1				3	12	1,0	2,6
7			1	2	1	1				5	15	1,4	4,7
8					1		1	3	1	6	39	2,9	8,1
9				1						1	3	0,1	0,9
10	2			2	2	3	2	1		12	48	2,2	6,0

Příloha 7c–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 70, N26+P50

Rostl./ poč. lusků	0 sem.	1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.	5 sem.	6 sem.	7 sem.	8 sem.	Lusků/ rostl.	Semen / rostl.	Hmotnost semen (g)	Hmotnost rostliny bez semen (g)
1			1			2	2	1		6	31	3,3	6,0
2	2				1	2		2	1	8	36	2,9	8,0
3					2	3		2		7	37	3,8	9,1
4			1		1	1		1		4	18	1,4	3,1
5					1	2		2		5	28	2,6	5,8
6		1		1	1					3	8	0,8	2,1
7					1	2	2			5	26	2,6	5,4
8					1	1	1	1		4	22	2,8	5,4
9					1		1	1		3	17	1,0	3,6
10										0	0	0	1,9

Příloha 7d–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 70 souhrn

Parametr	Kontrola	N 26	N 26 + P 50
\bar{x} –počet lusků/rostlina	4,3	5,4	4,5
\bar{x} –počet semen/rostlina	18,3	24,8	22,3
\bar{x} –hmotnost semen/rostlina (g)	1,49	1,82	2,12
\bar{x} –hmotnost semene (g)	0,081	0,073	0,095
\bar{x} –hmotnost rostliny bez semen (g)	5,27	5,07	5,04
\bar{x} –počet semen v lusku/rostlina	4,26	4,59	4,95
\hat{x} –počet lusků/rostlina	2-6	4-6	3-6
\hat{x} –počet semen/rostlina	6-30	15-37	17-31
\hat{x} –hmotnost semen/rostlina (g)	0,2-2,2	1-2,8	1-2,9
\hat{x} –hmotnost rostliny bez semen (g)	2,2-6,9	4,4-7,2	3,1-6,0
\hat{x} –počet semen v lusku/rostlina	1	1	1
\bar{x} –počet lusků/rostlina	5	5	4,5
\bar{x} –počet semen/rostlina	17,5	24,5	24,0
\bar{x} –hmotnost semen/rostlina	1,4	2	2,6
\bar{x} –hmotnost rostliny bez semen (g)	4,70	4,65	5,40
\bar{x} –počet semen v lusku/rostlina	2	2	2

Příloha 8–Nasazení lusků a délka rostliny BBCH 70

Výška, délka, počty lusků/ pozemek		Výška nasazení nad povrchem (mm)	Výška rostliny / nasazení (mm)	Počet lusků 1/3 nasazení	Počet lusků 2/3 nasazení	Počet lusků 3/3 nasazení
Kontrola	1	56	76/11	2	2	3
	2	64	68/4	1	0	1
	3	63	74/9	1	1	2
	4	60	72/6	1	0	2
	5	71	74/2	1	0	1
	6	74	80/2	2	0	1
	7	54	62/3	1	0	1
	8	63	76/12	1	0	3
	9	65	84/10	1	2	3
	10	69	76/4	2	1	1
	\bar{x}	63,9	74,2/6,3	1,3	0,6	1,8
N 26	1	72	80/4	1	0	2
	2	75	79/1	2	0	1
	3	74	80/2	1	1	1
	4	88	94/5	1	2	2
	5	81	88/4	1	2	1
	6	85	98/11	2	2	3
	7	69	77/7	1	2	2
	8	73	80/7	1	0	2
	9	76	86/6	1	2	1
	10	75	78/3	1	1	1
	\bar{x}	76,8	84,0/5	1,2	1,2	1,6

Příloha 8–pokračování tabulky

Výška, délka, počty lusků/ pozemek		Výška nasazení nad povrchem (mm)	Výška rostliny / nasazení (mm)	Počet lusků 1/3 nasazení	Počet Lusků 2/3 nasazení	Počet lusků 3/3 nasazení
N 26 + P 50	1	83	90/6	2	2	1
	2	79	95/14	1	1	3
	3	86	91/4	1	1	3
	4	87	96/6	1	0	4
	5	85	92/6	2	2	2
	6	90	94/4	1	2	1
	7	84	92/6	2	1	3
	8	87	101/12	2	2	1
	9	85	93/5	2	1	2
	10	88	95/4	2	2	2
	\bar{x}		85,4	93,9/6,7	1,6	1,4

Příloha 9a–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 89, Kontrola

Rostl./ Počet lusků	0 sem.	1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.	5 sem.	6 sem.	7 sem.	8 sem.	Lusků/ rostl.	Semen/ rostl.	Hmotnost semen (g)	Hmotnost rostliny bez semen (g)
1					1	1				2	9	2,0	1,9
2					1	1	1	1	1	5	30	7,1	5,7
3				1	1		1	1		4	20	4,6	3,7
4			1	2	1	1				5	17	4,3	4,6
5				1		1	1			3	14	3,3	3,1
6				1	3	2	1			7	31	7,3	5,9
7				2	2	2	1			7	30	7,4	6,4
8				1	3	3	1			8	36	8,3	6,3
9	1		1	1	1					4	9	1,5	1,6
10					1	1	2		1	5	29	7,1	6,3

Příloha 9b–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 89, N26

Rostl./ Počet lusků	0 sem.	1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.	5 sem.	6 sem.	7 sem.	Lusků/ rostl.	Semen/ rostl.	Hmotnost semen (g)	Hmotnost rostliny bez semen (g)
1			1	1	1	4			7	29	6,9	6,8
2		1	1	2		1			5	14	3,7	4,1
3			1		1	1			3	11	3,1	4,1
4	1			1	1	2	2		7	29	7,1	7,5
5	1				1	5			7	29	6,3	7,4
6				3	1				4	13	2,6	3,0
7				1	3	2	1		7	31	7,9	8,5
8						2	1		3	16	3,5	3,6
9		1	1		2				4	11	3,0	3,8
10	1				3		1		4	18	4,6	5,4

Příloha 9c–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 89, N26+P50

Rostl./Počet lusků	0 sem.	1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.	5 sem.	6 sem.	7 sem.	8 sem.	Lusků/rostl.	Semen/rostl.	Hmotnost semen (g)	Hmotnost rostliny bez semen (g)
1					2	3				5	22	5,1	4,5
2			1	1	1	2	1	1		7	32	3,5	5,1
3			1			1	1	2		5	27	6,3	5,2
4				1	2	2	1			6	27	7,1	5,3
5										0	0	0	1,1
6				1		1	1			3	14	3,0	2,8
7					6	1				7	29	6,9	5,7
8		1	1	1	3	2				8	28	6,4	6,5
9		1		1	1	1				4	13	2,5	2,7
10	2	1			2	2				7	19	1,8	3,9

Příloha 9d–Parametry jednotlivých rostlin BBCH 89 souhrn

Parametr	Kontrola	N26	N26 + P50
\bar{x} –počet lusků/rostlina		5	5,1
\bar{x} –počet semen/rostlina		22,5	20,1
\bar{x} –hmotnost semen/rostlina (g)		5,29	4,87
\bar{x} –hmotnost rostliny bez semen (g)		4,55	5,42
\bar{x} –počet semen v lusku/rostlina		4,50	3,94
\hat{x} –počet lusků/rostlina		4-7	4-7
\hat{x} –počet semen/rostlina		14-30	13-29
\hat{x} –hmotnost semen/rostlina (g)		3,3-5,3	3,1-6,9
\hat{x} –hmotnost rostliny bez semen (g)		3,1-6,3	3,8-7,4
\hat{x} –počet semen v lusku/rostlina		6,00	4,14
\bar{x} –počet lusků/rostlina		5,0	4,5
\bar{x} –počet semen/rostlina		24,5	17,0
\bar{x} –hmotnost semen/rostlina		5,85	4,15
\bar{x} –hmotnost rostliny bez semen (g)		5,15	4,75
\bar{x} –počet semen v lusku/rostlina		4,90	3,78

Příloha 10–Nasazení lusků a délka rostliny BBCH 89

Výška, délka, počty lusků/posevek		Výška nasazení nad povrchem	Délka rostliny / nasazení	Počet lusků 1/3 nasazení	Počet lusků 2/3 nasazení	Počet lusků 3/3 nasazení
Kontrola	1	77	100/16	1	4	7
	2	73	89/6	2	4	1
	3	67	76/5	2	0	1
	4	71	72/1	1	0	1
	5	67	80/5	1	1	2
	6	74	87/12	2	2	4
	7	64	71/7	1	2	2
	8	80	98/12	3	5	2
	9	66	78/7	2	2	1
	10	77	95/11	2	2	1
\bar{x}		71,6	84,6/8,2	1,7	2,2	2,2

Příloha 10–pokračování tabulky

Výška, délka, počty lusků/pozemek		Výška nasazení nad povrchem	Délka rostliny / nasazení	Počet lusků 1/3 nasazení	Počet lusků 2/3 nasazení	Počet lusků 3/3 nasazení
N 26	1	72	85/7	2	2	1
	2	96	105/4	2	0	3
	3	88	101/8	2	4	1
	4	93	100/1	2	1	1
	5	80	98/11	1	3	2
	6	80	92/6	1	3	1
	7	67	74/4	1	1	1
	8	67	92/17	1	1	3
	9	84	90/3	1	1	1
	10	75	96/18	2	5	3
	\bar{x}	80,2	93,3/7,9	1,5	2,1	1,7
N 26 + P 50	1	102	110/7	2	2	2
	2	85	101/14	3	1	2
	3	85	100/10	3	1	3
	4	81	91/8	1	1	4
	5	83	89/6	1	2	2
	6	85	96/7	2	1	2
	7	78	91/9	1	1	3
	8	75	94/14	2	4	3
	9	83	97/8	2	2	3
	10	74	91/11	1	0	3
	\bar{x}	83,1	96/9,4	1,8	1,5	2,7

Příloha 11a–Pozemek Kontrola, nepolehlý porost



Příloha 11b–Pozemek N26, mírně polehlý porost



Příloha 11c–Pozemek N26+P50, polehlý porost



Příloha 12a–Sklizeň pokusných ploch



Příloha 12b–Sklizené pokusné plochy

