

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Hnojivo vyrobené z kalové vody jako zdroj makroprvků
pro špenát (*Spinacia oleracea*, L.)**

Diplomová práce

Autor práce: Ing. Alžběta Knotková

Obor studia: Zahradnictví

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

© 2026 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Hnojivo vyrobené z kalové vody jako zdroj makroprvků pro špenát (*Spinacia oleracea*, L.)" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala zejména panu doc. Ing. Martinovi Kulhánkovi, Ph.D. za jeho ochotu do toho jít se mnou i potřetí, trpělivost, čas, cenné rady, připomínky i podnětné komentáře. Poděkování patří také mé rodině, přátelům a kolegům za jejich podporu a motivaci.

Hnojivo vyrobené z kalové vody jako zdroj makroprvků pro špenát (*Spinacia oleracea*, L.)

Souhrn

V rámci diplomové práce bylo hodnoceno nové hnojivo vyrobené z kalové vody jako alternativní zdroj vybraných makroživin pro pěstování špenátu setého (*Spinacia oleracea* L.). Experiment byl realizován formou nádobových vegetačních pokusů na třech půdních typech pocházejících z lokalit Humpolec, Hartvíkov a Suchdol. Účinnost hnojiva byla porovnávána s minerálním hnojením NPK a nehnojenou kontrolou.

Výsledky prokázaly pozitivní vliv aplikace hnojiva z kalové vody na produkci biomasy špenátu. Na všech sledovaných stanovištích dosáhla varianta s kalovou vodou nejvyšších hodnot suché biomasy, přičemž nejvýraznější efekt byl zaznamenán v lokalitě Humpolec, kde výnos činil 1,08 g oproti 0,84 g u NPK a 0,37 g u kontrolní varianty. Významné zvýšení výnosu bylo zaznamenáno také v lokalitě Suchdol.

Aplikace hnojiva z kalové vody vedla ke zvýšení obsahu fosforu, draslíku a hořčíku v půdě, přičemž nejvyšší zásoba přístupného fosforu (73,2 mg/kg) a vápníku (734 mg/kg) byla zaznamenána u varianty s kalovou vodou v lokalitě Humpolec. U této varianty byl zároveň zpravidla nejvyšší i celkový odběr živin rostlinami, což souviselo s vyšší produkcí biomasy.

Naopak byla zaznamenána nižší schopnost tohoto hnojiva dodávat draslík a síru, jejichž obsah v půdě byl zpravidla nižší než u NPK. Přesto byl díky vyššímu výnosu u varianty s kalovou vodou v některých případech zaznamenán vyšší odběr rostlinami i u těchto prvků. Současně byl pozorován zřed'ovací efekt, kdy rostliny vykazovaly nižší koncentrace některých živin v sušině v důsledku intenzivního růstu biomasy.

Na základě dosažených výsledků je možné konstatovat, že hnojivo vyrobené z kalové vody představuje perspektivní alternativní zdroj živin s potenciálem pro využití v zemědělské praxi. Pro dosažení vyvážené výživy rostlin je však vhodné zvážit jeho doplnění o další zdroj draslíku.

Klíčová slova: Výživa rostlin; Makroprvky v rostlině; Výnosové parametry; Špenát; Kalová voda

Fertilizer produced from waste water as a source of macronutrients for spinach (*Spinacia oleracea*, L.)

Summary

As part of this diploma thesis, a new fertilizer produced from sludge water was evaluated as an alternative source of selected macronutrients for the cultivation of spinach (*Spinacia oleracea* L.). The experiment was conducted as a pot vegetation trial using three soil types originating from the localities of Humpolec, Hartvíkov, and Suchdol. The effectiveness of the fertilizer was compared with mineral NPK fertilization and an unfertilized control.

The results demonstrated a positive effect of sludge water fertilizer application on spinach biomass production. At all monitored sites, the sludge water treatment achieved the highest dry biomass values, with the most pronounced effect observed in Humpolec, where the yield reached 1,08 g compared to 0,84 g for the NPK treatment and 0,37 g for the control variant. A significant increase in yield was also recorded at the Suchdol site.

Application of the sludge water fertilizer led to increased phosphorus, potassium, and magnesium content in the soil, with the highest available phosphorus (73,2 mg/kg) and calcium (734 mg/kg) levels recorded in the sludge water treatment at the Humpolec site. This treatment also generally showed the highest total nutrient uptake by plants, which was associated with the greater biomass production.

In contrast, the fertilizer exhibited a lower capacity to supply potassium and sulfur, as their soil concentrations were generally lower compared to the NPK treatment. Nevertheless, due to the higher yield of sludge water treatment, higher uptake of these elements was observed in some cases. At the same time, a dilution effect was observed, whereby plants showed lower concentrations of certain nutrients in dry matter as a result of intensive biomass growth.

Based on the obtained results, it can be concluded that fertilizer produced from sludge water represents a promising alternative nutrient source with potential for use in agricultural practice. However, to achieve balanced plant nutrition, its supplementation with an additional source of potassium should be considered.

Keywords: Plant nutrition; Macroelements in plants; Yield parameters; Spinach; Sludge water

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Vědecká hypotéza a cíle práce	10
3 Literární rešerše	11
3.1 Špenát setý	11
3.1.1 Hnojení špenátu	12
3.2 Makroprvky v rostlinné výživě.....	13
3.2.1 Dusík	13
3.2.1.1 Dusík v rostlině	13
3.2.1.2 Dusík v půdě.....	14
3.2.2 Fosfor	15
3.2.2.1 Fosfor v rostlině	15
3.2.2.2 Fosfor v půdě	16
3.2.3 Draslík	16
3.2.3.1 Draslík v rostlině.....	17
3.2.3.2 Draslík v půdě.....	18
3.2.4 Vápník	19
3.2.4.1 Vápník v rostlině.....	19
3.2.4.2 Vápník v půdě	20
3.2.5 Hořčík.....	21
3.2.5.1 Hořčík v rostlině	21
3.2.5.2 Hořčík v půdě	22
3.2.6 Síra	23
3.2.6.1 Síra v rostlině	23
3.2.6.2 Síra v půdě	24
3.3 Využití odpadních materiálů v zemědělství	25
3.3.1 Čistírenské kaly	26
3.3.1.1 Definice, vznik a složení	26
3.3.1.2 Zpracování kalů	27
3.3.1.3 Nakládání s čistírenskými kaly	28
3.3.1.4 Využití v zemědělství	29
3.3.1.5 Kalová voda.....	32
4 Metodika.....	33
4.1 Vlastnosti hnojiva z kalové vody.....	33

4.2	Rozbory substrátů	35
4.3	Rozbory rostlin	35
4.4	Statistická analýza	35
5	Výsledky.....	36
5.1	Humpolec.....	36
5.1.1	Hodnocení výnosových parametrů špenátu	36
5.1.2	Obsahy sledovaných makroprvků v půdě.....	37
5.1.3	Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách	37
5.1.4	Odběry sledovaných makroprvků rostlinami.....	37
5.1.5	Krátké shrnutí pro stanoviště Humpolec.....	38
5.2	Hartvíkov	39
5.2.1	Hodnocení výnosových parametrů špenátu	39
5.2.2	Obsahy sledovaných makroprvků v půdě.....	39
5.2.3	Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách	40
5.2.4	Odběry sledovaných makroprvků rostlinami.....	40
5.2.5	Krátké shrnutí pro stanoviště Hartvíkov.....	41
5.3	Suchdol	41
5.3.1	Hodnocení výnosových parametrů špenátu	41
5.3.2	Obsahy sledovaných makroprvků v půdě.....	42
5.3.3	Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách	42
5.3.4	Odběry sledovaných makroprvků rostlinami.....	43
5.3.5	Krátké shrnutí pro stanoviště Suchdol	44
5.4	Celkové shrnutí	44
6	Diskuze.....	45
6.1	Vliv aplikace hnojiva z kalové vody na výnos a produkci sušiny	45
6.2	Vyhodnocení hnojiva z kalové vody jako zdroje makroprvků pro špenát	46
7	Závěr	49
8	Literatura	50

1 Úvod

Špenát setý (*Spinacia oleracea* L.) patří mezi významné druhy listové zeleniny, a to zejména díky své schopnosti poskytovat vysoké výnosy v krátkém vegetačním období. Z nutričního hlediska je ceněn pro vysoký obsah antioxidantů, vitamínů a minerálních látek. V České republice si dlouhodobě udržuje postavení mezi nejoblíbenějšími pěstovanými druhy listové zeleniny.

Pro dosažení optimálního výnosu a odpovídající kvality produkce je pěstování špenátu podmíněno dostatečným a vyváženým zásobením základními makroživinami, zejména dusíkem, fosforem a draslíkem. Dusík významně podporuje tvorbu nadzemní biomasy, fosfor je nezbytný pro správný vývoj kořenového systému a draslík přispívá k celkové vitalitě a odolnosti rostlin vůči stresovým podmínkám. Při nevhodném hnojení však může docházet ke zvýšené akumulaci dusičnanů v listech, což může nepříznivě ovlivnit kvalitu sklizené produkce.

V současné době roste zájem o využívání alternativních zdrojů živin, které by přispěly ke snížení spotřeby minerálních hnojiv a podpořily principy cirkulární ekonomiky. Perspektivní možnost představuje využití živin recyklovaných z odpadních materiálů, například z kalů a kalových vod z čistíren odpadních vod. Aplikace hnojiv na bázi čistírenských kalů však vyžaduje důkladné ověření jejich účinnosti i bezpečnosti v konkrétních půdně-klimatických podmínkách.

Cílem této diplomové práce je proto zhodnotit vliv nového hnojiva vyrobeného z kalové vody na výnosové parametry špenátu a zhodnotit ho jako zdroj vybraných makroprvků pro špenát. Praktická část práce vychází z nádobových vegetačních pokusů realizovaných na třech půdních typech ze stanovišť Humpolec, Hartvíkov a Suchdol. V rámci pokusu byla sledována produkce biomasy a současně obsah a odběr vybraných makroprvků v rostlině. Získané výsledky byly porovnávány s variantami minerálního hnojení NPK a nehnojenou kontrolou za účelem posouzení možnosti využití tohoto alternativního zdroje živin v zemědělské praxi.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Hypotézy

Aplikace nového hnojiva vyrobeného z kalové vody povede ke srovnatelným výnosům špenátu s relevantní dávkou minerálního NPK.

Aplikace hnojiva vyrobeného z kalové vody zajistí vyšší obsahy dalších makroprvků (Ca, Mg, S) ve srovnání s pozitivní kontrolou, kde budou aplikovány ve stejném množství (ve vztahu k hnojivu z kalové vody) pouze N, P a K.

Cíle práce

Zhodnotit výnosové parametry špenátu po aplikaci hnojiva vyrobeného z kalové vody.

Vyhodnotit nové hnojivo vzniklé z kalové vody jako zdroj makroprvků pro špenát.

3 Literární rešerše

Špenát je mezi zeleninou unikátní díky svému vysokému výnosu v relativně krátkém časovém období (Sorin & Tanaka 1991), a proto se v osevním postupu často pěstuje jako předplodina či následná plodina. Z důvodu krátké vegetační doby a vysokému transpiračnímu koeficientu je špenát navíc velmi náročný na dostatek vláhy v půdě. I jen krátké období sucha může vést k předčasnému vybíhání do květu (Petříková et al. 2006).

Zvýšení produkce špenátu v různých podmínkách vyžaduje lepší pochopení požadavků na živiny a volbu ekonomicky efektivních způsobů hnojení. Mezi klíčové makroživiny patří dusík, fosfor a draslík, které jsou nezbytné pro správný růst a vývoj rostlin. Dusík podporuje tvorbu nadzemní biomasy, fosfor se podílí na rozvoji kořenového systému a generativních orgánů a draslík přispívá k celkové vitalitě, odolnosti a kvalitě produkce (Ullah et al. 2024). Nedostatek kteréhokoli z těchto prvků může významně snížit výnos i kvalitu plodiny. Správné hospodaření s makroživinami je proto základním kamenem moderních agronomických postupů (Aamur et al. 2025).

3.1 Špenát setý

Špenát setý (*Spinacia oleracea* L.) je jednoletá dlouhodobní rostlina, která byla do Evropy pravděpodobně dovezena ve 14. století z jihozápadní Asie. Později se dostal i do Severní Ameriky a nyní se pěstuje ve všech mírných klimatických oblastech (George 1985).

Patří do čeledi laskavcovité (*Amaranthaceae*). Jeho křivý, málo větvený kořen sahá do hloubky 30–40 cm. Tvoří lesklé, středně až dlouze řapíkaté listy, které mohou být ploché až bublinaté, lehce zvlněné, oválné, zašpičatělé, hluboce vykrajované nebo laločnaté. Rozkládají se v přízemní růžici (Petříková et al. 2012).

Špenát je pěstitelsky nenáročná zelenina s ne příliš velkými nároky na světlo, ale vysokými nároky na vláhu. Nejčastěji se zařazuje do druhé trati a nesnese kyselé půdy. Pěstován je z přímých výsevů prováděných do dobře připravené půdy. V srpnu probíhá výsev pro podzimní sklizeň, pro jarní sklizeň brzy na jaře a k přezimování se vysévá v průběhu září (Melichar et al. 1997).

Nároky špenátu na teplotu jsou poměrně nízké – klíčí od 2 °C do 30 °C a pro růst mu nejlépe vyhovují teploty v rozmezí 5–24 °C, optimum se pak pohybuje mezi 15–18 °C. Jakmile teploty při klíčení klesnou pod 5 °C, může předčasně vybíhat do květu. Vzrostlé rostliny špenátu bez problému snášejí mrazy do -9 °C. Slabé či naopak přerostlé rostliny mohou být poškozovány dlouhotrvajícím mrazem (Petříková et al. 2006).

Morelock a Corell (2008) uvádějí, že je špenát spolu s brokolicí pravděpodobně nejvýživnější zeleninou v USA. Má vysoký obsah betakarotenu (provitamínu A), karotenoidu luteinu, antioxidantů a kyseliny listové. Je také dobrým zdrojem vitamínu C, vápníku, železa, fosforu, sodíku a draslíku.

Špenát společně se salátem patří mezi nejpěstovanější listovou zeleninu u nás. V loňském roce (2025) bylo v České republice oseto 475 ha špenátu, což je o 40 ha méně než v roce 2024, kdy bylo oseto 515 ha (ČSÚ 2026).

3.1.1 Hnojení špenátu

Správná volba způsobu hnojení špenátu je zásadní nejen pro dosažení odpovídajícího výnosu a kvality, ale i z hlediska ochrany vod. U přezimujících porostů zvyšují nízké teploty, nepravidelné srážky a mělký kořenový systém riziko vyplavování dusičnanů. Vyšší dávky minerálních hnojiv navíc mohou vést k větší akumulaci dusičnanů v listech (Canali et al. 2014).

Dle publikace od Petříková et al. (2012) tunová produkce špenátu odebere z půdy přibližně 4,75 kg dusíku, 0,75 kg fosforu, 4 kg draslíku, 1 kg vápníku, 0,95 kg hořčíku a 0,4 kg síry. Plodina příznivě reaguje i na přihnojení mědí, manganem a železem, zatímco účinek aplikace bóru a molybdenu je spíše střední. Nevhodné je použití fyziologicky kyselé formy hnojiv; chloridová hnojiva však lze použít.

Špenát velmi dobře reaguje na dusík, a i v případě zvýšené celkové koncentrace aminokyselin akumuluje dusičnany, ale je také bohatý na oxaláty (soli kyseliny šťavelové), které jsou nebezpečné pro lidské zdraví (Elia et al. 1998). Studie od Zhang et al. (2014) též uvádí, že se obsah dusičnanů i oxalátů ve špenátu významně zvyšuje s používáním dusíkatých hnojiv a nízkým obsahem vody v půdě, což pak vede k nižší kvalitě rostlin špenátu.

Vyvážený přísun dusíku je pro špenát nezbytný, protože podporuje optimální růst a odpovídající hladinu dusičnanů pro lepší skladovatelnost. Správný výběr dusíkatého hnojiva a dávky je proto klíčový pro úspěšné pěstování špenátu. Ve studii od Gülüt & Şentürk (2024) autoři zjistili, že aplikace dusíkatého hnojiva výrazně ovlivnila parametry růstu špenátu i obsah dusičnanů. Ze čtyř aplikovaných hnojiv v pěti dávkách došli k závěru, že je pro rychlý raný růst a potenciálně vyšší výnosy vhodný síran amonný v mírné dávce (200 mg/kg). Síran amonný s pomalým uvolňováním (inhibitorem nitrifikace) nabízí vyváženější přístup, podporuje udržitelnější růst a zároveň potenciálně snižuje akumulaci dusičnanů ve srovnání se samotným síranem amonným.

Ve studii zaměřené na různé způsoby hnojení špenátu Vico et al. (2020) zjistili, že se výnosy pohybovaly mezi 32,2–50,5 t/ha, přičemž nejvyšších hodnot bylo dosaženo u vybraných typů hnojiv. Použití čerstvých organických materiálů (vyhnilé čistírenské kaly a kompostovaný kravský hnůj) vedlo k vyšším koncentracím dusičnanů v listech. Zároveň se ukázalo, že organická hnojiva dokážou zajistit srovnatelné výnosy jako konvenční hnojení, což naznačuje jejich potenciál pro udržení produkce. Při aplikaci organických odpadů však panují obavy zejména z hromadění rizikových látek. Dle Maftoun et al. (2005) jde především o možné zvyšování obsahu těžkých kovů, dusíku a fosforu v půdě a také o nadměrné množství rozpustných solí. Za nejproblematictější kovy jsou považovány kadmium (Cd), olovo (Pb), zinek (Zn) a měď (Cu).

U zavlažovaných porostů by dávka dusíku neměla přesáhnout 120 kg/ha a doporučuje se její jednorázová aplikace před začátkem vegetace. Základní hnojení P, K a Mg před setím se obvykle pohybuje v rozmezí 15–18 kg P/ha, 75–83 kg K/ha a přibližně 18 kg Mg/ha. V systému integrované produkce zeleniny je maximální přípustná dávka dusíku snížena na 75 kg/ha (Petříková et al. 2012).

Nadbytečná aplikace dusíku a fosforu vede k postupné akumulaci v půdě a ke ztrátám do vodního prostředí, kde mohou přispívat k eutrofizaci. Z toho důvodu je nezbytné dávky fosforu a dusíku optimalizovat s ohledem k produkčnímu i ekologickému hledisku (Daly et al. 2015).

3.2 Makroprvky v rostlinné výživě

Růst a vývoj rostlin je podmíněn celou řadou faktorů, zejména teplotou, zásobením vodou, světelnými podmínkami a dostupností živin v půdě. Již v polovině 19. století prokázal německý chemik Justus von Liebig, že minerální výživa je nezbytným předpokladem pro růst rostlin. Přestože je známo více než 100 chemických prvků, pouze 17 z nich je považováno za esenciální pro rostlinný organismus (Zewide 2021, Tripathi et al. 2014). Makroživiny jsou pro rostliny klíčové, protože zajišťují jejich správný růst a vývoj. Plní řadu funkcí – tvoří základní stavební složky rostlinných pletiv a zároveň se podílejí na důležitých biochemických procesech, včetně reakcí spojených s přenosem elektronů (redoxních dějů) (Nadeem et al. 2018).

Minerální živiny se dělí podle množství potřebného pro růst rostlin na makroprvky a mikroprvky. Mezi **makroživiny** patří dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg) a síra (S), které se v rostlinách obvykle vyskytují v koncentracích vyšších než 0,1 % sušiny. **Mikroživiny**, jako je železo (Fe), zinek (Zn), mangan (Mn), měď (Cu), bór (B), chlor (Cl), molybden (Mo) a nikl (Ni). Jsou přítomny v množstvích nižších než 0,01 % sušiny (Grusak 2001). Makroživiny jsou přijímány ve větším množství a jsou nezbytné pro klíčové fyziologické procesy, jako je fotosyntéza, dýchání a tvorba biomasy. Mezi hlavní makroprvky patří dusík, fosfor a draslík, zatímco vápník, hořčík a síra jsou řazeny mezi vedlejší makroživiny. Vyvážený obsah těchto prvků v půdě je zásadní pro zdravý růst a stabilní produkci rostlin (Monib et al. 2023).

Vaněk et al. (2012) uvádějí, že se za charakteristický znak rostlinné živiny považuje její **esenciálnost**, tedy nezbytnost pro růst a vývoj rostlin. Pokud tato živina v živném prostředí chybí, rostlina není schopna dokončit svůj životní cyklus. Dalším znakem je **nezastupitelnost**, což znamená, že její funkci nemůže plně nahradit jiná živina. Současně musí být živina **přímo zapojena do metabolismu rostliny**, například jako součást důležitých látek, jako jsou bílkoviny, enzymy či nukleové kyseliny, nebo se specificky podílet na určitých metabolických procesech.

3.2.1 Dusík

Dusík je esenciální prvek pro všechny živé organismy, protože je základní složkou bílkovin, nukleových kyselin i dalších významných organických látek. Byl izolován v roce 1772 Danielelem Rutherfordem, přičemž jeho existenci nezávisle popsali také Carl Wilhelm Scheele a Henry Cavendish. Název „dusík“ je odvozen z řeckého „nitron genes“, tedy „tvořící dusičnany“ (Ohyama 2010).

3.2.1.1 Dusík v rostlině

Rostliny přijímají dusík především ve formě **dusičnanových** (NO_3^-) a **amonných** (NH_4^+) iontů (Leghari et al. 2016). U některých druhů rostlin může být doplňkovým zdrojem dusíku atmosférický N_2 , který je zpřístupněn až prostřednictvím biologické fixace dusíku. Některé druhy, zejména luskoviny, N_2 získávají prostřednictvím symbiózy s půdními bakteriemi. (Grusak 2001; Ohyama 2010). Tento prvek je nezbytný pro správný růst a vývoj rostlin, protože se podílí na celé řadě klíčových biochemických a fyziologických procesů, čímž významně

ovlivňuje výši i kvalitu výnosu. Dusík je v rostlinné sušině zastoupen ve vysokých koncentracích (řádově 10 000 mg/kg a více) (Leghari et al. 2016).

Dusík (N) patří mezi základní makroživiny a z hlediska zastoupení v sušině rostlin je po uhlíku a kyslíku třetím nejvýznamnějším prvkem. Je primární složkou bílkovin, nukleových kyselin, fosfolipidů, chlorofylu, hormonů, vitamínů a alkaloidů, a proto se zásadně podílí na všech fázích růstu a vývoje rostlin (O'Brien et al. 2016). Dusík je rovněž součástí řady dalších sloučenin, včetně sekundárních metabolitů odvozených od aminokyselin. Tyto látky s nízkou molekulovou hmotností se uplatňují například při osmoregulaci (např. betain), ve stresových odpovědích rostlin (např. některé fytohormony) nebo při chelataci kovů (např. fyto siderofory) (Grusak 2001). Dle Wang et al. (2024) dusík významně ovlivňuje vodní režim rostlin, zejména jejich schopnost přijímat vodu z půdy. Absorpce dusíku (především ve formě dusičnanů a amonných iontů) je úzce spjata s aktivitou kořenového systému. Účinek anorganických forem N na příjem vody se může lišit dle druhu rostliny. Vztah mezi dusíkem a vodou může mít na rostliny synergický i antagonistický účinek. Reakce rostlin na dusíkaté hnojení v podmínkách sucha závisí na druhu plodiny, preferované formě dusíku, intenzitě vodního stresu, aplikované dávce i načasování hnojení.

Rostliny disponují specifickými mechanismy pro příjem anorganických forem dusíku, zejména prostřednictvím transportérů dusičnanů a amonných iontů. Tyto transportní systémy jsou řízeny komplexními regulačními mechanismy, které umožňují rostlinám reagovat na různé formy a koncentrace dusíku v půdním prostředí (Wang et al. 2024).

3.2.1.2 Dusík v půdě

Celkový obsah dusíku v půdách je značně variabilní a obvykle se pohybuje v rozmezí 0,05–0,5 %. V orniční vrstvě většiny půd České republiky činí jeho obsah přibližně 0,1–0,2 %. Převážná část (98–99 %) je přítomná v organické formě, zatímco minerální dusík tvoří jen malý podíl (Richter 2007).

Více než 80 % půdního dusíku je vázáno v polymerních organických formách, které nejsou přímo dostupné pro příjem kořeny ani půdními mikroorganismy. Tyto složité organické látky musí být nejprve rozloženy enzymatickými procesy a následně mineralizovány na anorganické formy dusíku, jež mohou být přijímány rostlinami nebo znovu imobilizovány mikroorganismy. Novější studie naznačují, že některé nízkomolekulární organické formy (např. aminokyseliny) mohou mikroorganismy využívat přímo (Geisseler et al. 2010 & Farzadfar et al. 2021).

Celkový dusík je tedy relativně stabilní složkou půdy, protože je vázán v obtížně rozložitelných organických sloučeninách (např. Aromatické struktury huminových kyselin, fulvokyselin a huminů). Jeho obsah se často hodnotí ve vztahu k organickému uhlíku (Cox) prostřednictvím poměru C:N. V našich podmínkách se průměrný poměr C:N pohybuje mezi 10–12:1, přičemž za dostatečné zásobení dusíkem je někdy považována i hodnota 15–18:1 (Richter 2007). Ve studii od Farzadfar et al. (2021) autoři uvádějí, že organické materiály s poměrem C:N kolem 25:1 nebo nižším zpravidla vedou k čisté mineralizaci dusíku, zatímco při vyšším poměru C:N převažuje imobilizace. Při mineralizaci je organicky vázaný dusík mikrobiálně přeměňován na amoniak (NH_3) a amonné ionty (NH_4^+), které jsou v zemědělských půdách často dále oxidovány nitrifikací na dusitany (NO_2^-) a dusičnany (NO_3^-). Dusík se však

může z půdy ztrácet denitrifikací (NO , N_2O , N_2), těkáním NH_3 , vyplavováním mobilních forem, zejména NO_3^- , povrchovým odtokem a erozí (Farzadfar et al. 2021).

S rostoucí hloubkou půdního profilu obsah dusíku klesá, takže v podorníční vrstvě je ho výrazně méně. Přeměna dusíku do forem přijatelných pro rostliny závisí na půdních a klimatických podmínkách, což komplikuje praktické využití minerálního a snadno mineralizovatelného dusíku ($\text{N}_{\min}$) při stanovení hnojení. Z ekonomického i ekologického hlediska je však vhodné vycházet z obsahu $\text{N}_{\min}$ v půdě (do hloubky 0–0,6 m). Na základě těchto údajů lze následně upravit základní i přihnojovací dávky dusíku během vegetace (Richter 2007).

3.2.2 Fosfor

Objev fosforu (P) se připisuje alchymistovi Henningovi Brandovi z Hamburku, který jej v roce 1669 získal při pokusech o výrobu kamene mudrců z moči. Při zahřívání moči a zachycování vznikajících par vznikla látka, jež svítila ve tmě a na vzduchu vzplanula. Název „fosfor“ pochází z řeckého „phosphoros“, což znamená „nositel světla“ (Corbridge 2013; Walsh 2020). Už v 18. století si fosfor získal pozornost vědců, když bylo odhaleno, že tvoří součást kostí a je nezbytný pro růst rostlin. V 19. století pak začala jeho průmyslová výroba (Brezak-Mazur & Stoinska 2013).

3.2.2.1 Fosfor v rostlině

Fosfor je pro rostliny klíčový prvek, který ovlivňuje růst, vývoj a buněčné procesy, včetně přenosu signálů (Rui et al. 2023). Jako esenciální živina se podílí na základních stavebních a metabolických procesech a jeho nedostatek může omezit výnos a kvalitu plodiny (Kunzová 2009; Schachtman et al. 1998). Fosfor tvoří přibližně 0,2 % suché hmotnosti rostlin a je nezbytný při tvorbě generativních orgánů a energetickém metabolismu (Cerozi & Fitzsimmons 2016). Ruttenberg (2003) uvádí, že je fosfor nepostradatelný pro všechny formy života, protože se podílí na syntéze nukleotidů (DNA, RNA), energetickém přenosu (ATP), stavbě membrán (fosfolipidy) a minerálních struktur (kosti).

Mezi organické formy fosforu patří estery kyseliny fosforečné, fosforylované sacharidy a pyrimidinové sloučeniny (např. fosfolipidy, fytin, nukleoproteiny a nukleové kyseliny). Tyto formy jsou stabilnější než anorganické fosfáty, které jsou naopak v rostlině velmi mobilní. Poměr anorganického a organického fosforu závisí na věku rostliny a intenzitě jeho příjmu (Ivanič et al. 1984).

Fosfor je rovněž součástí NADP a Calvinova cyklu a tvoří základ nukleových kyselin. Hořčíkové kationty stabilizují nukleové kyseliny díky negativnímu náboji fosfátových sloučenin. Fosfor je rovněž klíčový pro přenos buněčných signálů, který probíhá prostřednictvím signálních molekul inositol-1,4,5-trifosfát a diacylglycerol (Balík et al. 2008).

V rostlinách je fosfor rychle začleňován do organických sloučenin a transportován do míst s nejvyšší potřebou. Nejprve do mladých listů, poté do vegetačních vrcholů, a nakonec do květů a semen. V semenech je uložen především ve formě fytinu, který zároveň slouží jako zásoba fosforu a hořčíku (Vaněk et al. 2007). Během reprodukční fáze se tak 60–85 % fosforu v obilninách přesouvá do zrna, což vede k významnému odběru tohoto prvku při sklizni (Han et al. 2022).

Efektivní příjem fosforu je podmíněn dobře vyvinutým kořenovým systémem. Rostliny absorbují fosfor převážně ve formě aniontů H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} , jejichž koncentrace v půdním roztoku je velmi nízká, a proto je důležité jeho průběžné uvolňování z pevné půdní fáze (Vaněk et al. 2007).

Transport fosforečnanů probíhá efektivně proti koncentračnímu gradientu, tedy za situace, kdy je jejich obsah v okolním prostředí nižší než v cytoplazmě buněk (Richter 2004). Příjem P je zajišťován specializovanými, vysoce afinitními transportními systémy, které umožňují přesun fosfátových aniontů přes plazmatickou membránu kořenových buněk. Tento proces je realizován zejména Pi/H^+ symportéry ze skupiny genů PHT1 (Shen et al. 2011).

3.2.2.2 Fosfor v půdě

Celkový obsah fosforu v půdách se obvykle pohybuje v rozmezí 0,01–0,15 % (Vaněk et al. 2007), přičemž obdobné hodnoty uvádí i Richter (2007), který udává rozpětí 0,03–0,13 %. V půdách mírného pásma bývá koncentrace fosforu zpravidla mezi 300–2000 mg/kg, v závislosti na matečné hornině, typu půdy, způsobu využívání i intenzitě hnojení (Leinweber et al. 2002). Vyšší obsah fosforu je typický pro půdy bohaté na organickou hmotu, zatímco lehké půdy s nízkým podílem organických látek bývají na fosfor chudší (Vaněk et al. 2007). Základ různých půdních forem fosforu tvoří sloučeniny kyseliny fosforečné, případně pyrofosforečné, které představují potenciální zdroj pro rostliny i mikroorganismy.

Celosvětové zásoby fosforu jsou značné – odhaduje se přibližně 10^{19} tun, z toho asi 10^{15} tun se nachází v zemské kůře, kde jeho průměrný obsah činí kolem 0,12 % (Ivanič et al. 1984). Přesto je biologicky dostupný fosfor v půdách často limitující, protože je vázán převážně v obtížně přístupných formách nebo mimo rhizosféru. Jen malá část nehnojených půd dokáže uvolňovat fosfor dostatečně rychle pro optimální růst rostlin (Schachtman et al. 1998; Yang et al. 2013). Z tohoto důvodu je aplikace fosforečných hnojiv běžnou součástí pěstební praxe, přičemž je nutné počítat s nízkou účinností. Až 80 % dodaného fosforu může být fixováno srážením či adsorpcí (Holford 1997).

Fosfor se v půdě vyskytuje v anorganických i organických formách. Hlavním minerálním zdrojem je apatit (fluor-, chlor- a hydroxylapatit) (Richter 2007), z něhož se fosfor uvolňuje postupným zvětráváním (Mehmood et al. 2018). V menší míře se vyskytují i další minerály, například fosforečnany železa a manganu (tripity), hliníku (wawelity) či vivianit, typický pro zamokřené půdy s nízkým obsahem kyslíku (Richter 2007). Další vstupy fosforu do půdy představují průmyslová hnojiva, čistírenské kaly a některé průmyslové odpady a zbytky (Werner et al. 2017). V přírodě se fosfor nejčastěji vyskytuje v oxidačním stupni V jako ortofosfátový anion (PO_4^{3-}) a z agronomického hlediska se rozlišuje na formy minerální a organické (Ivanič et al. 1984; Richter 2007).

3.2.3 Draslík

Draslík (K) je považován za jednu z klíčových minerálních živin nezbytných pro správný růst a metabolismus rostlin. Významně se podílí na udržení fyziologických funkcí a zvyšuje odolnost rostlin vůči biotickým a abiotickým stresovým faktorům. Dlouhodobě je zdůrazňován význam draselných hnojiv pro tvorbu výnosu i kvalitu produkce (Pettigrew 2008).

Draslík získal svůj název z novolatinského označení kalium, které je odvozeno od slova „*alkali*“, označujícího kalcinovaný popel. Jako chemický prvek byl draslík izolován v roce 1807 anglickým chemikem Humphry Davy. Jeho sloučeniny však byly využívány již od starověku, například při výrobě skla, mýdla či barviv (Ciceri et al. 2015; James 2025). V roce 1868 prováděl botanik Samuel William Johnson experimenty zaměřené na chemické složení rostlin. Spaloval rostlinný materiál a následně analyzoval vzniklý popel, aby stanovil obsah minerálních látek. Na základě těchto analýz prokázal, že rostliny obsahují významné množství draslíku a dalších esenciálních minerálních prvků. Jeho práce přispěla k rozvoji vědeckých poznatků o výživě rostlin a podpořila zavádění minerálních hnojiv do zemědělské praxe s cílem zvýšit výnosy plodin (Prajapati & Modi 2012).

3.2.3.1 Draslík v rostlině

Draslík představuje esenciální živinu a zároveň nejhojnější kationt v rostlinných buňkách. Koncentrace iontů K^+ v cytoplazmě se obvykle pohybuje v rozmezí 100–200 mM, zatímco v apoplastu může kolísat mezi 10–200 mM, v některých případech až do hodnot 500 mM (Wang et al. 2013; White & Karley 2010), a to zejména v buňkách stomat, kde plní osmotickou funkci (Richter 2004).

Jedná se o vysoce mobilní prvek v rostlině, který se transportuje jak akropetálně, tak bazipetálně (xylémem i floémem). Ionty K^+ se vyznačují vysokou permeabilitou přes buněčné membrány a jejich intracelulární koncentrace je relativně vysoká. Za stresových podmínek, jako je nízká teplota či sucho, může docházet k vyplavování K^+ z buněk. Vzhledem k výrazné reutilizaci je draslík přesouván ze starších pletiv do mladších, takže příznaky jeho nedostatku se typicky objevují nejprve na starších listech (Richter 2004).

Vyšší rostliny disponují dvěma mechanismy příjmu K^+ , jejichž aktivita závisí na jeho vnější koncentraci. Při nízkých koncentracích se uplatňuje systém s vysokou afinitou realizovaný především K^+/H^+ symportéry, jejichž činnost je poháněna protonovým gradientem vytvářeným transmembránovými protonovými pumpami. Naopak při vyšších koncentracích K^+ se aktivují nízkoafinitní iontové kanály (Bhardwaj et al. 2025). Doba příjmu draslíku se mezi jednotlivými druhy rostlin liší. Obecně však platí, že rostliny přijímají převážnou část draslíku již v raných fázích růstu, a to dříve než většinu dusíku a fosforu (Prajapati & Modi 2012).

Draslík plní v rostlinách řadu klíčových fyziologických funkcí. Podílí se na aktivaci enzymů, syntéze bílkovin a průběhu fotosyntézy i dýchání, významně ovlivňuje osmoregulaci a regulaci pohybu průduchů, účastní se přenosu energie a transportu asimilátů floémem. Dále přispívá k udržování rovnováhy mezi kationty a anionty a zvyšuje odolnost rostlin vůči různým typům stresu (Marschner 2011, Richter 2004). Nedostatek draslíku kromě celkového nízkého výnosu plodin negativně ovlivňuje i jejich morfologické a růstové parametry. Rostliny jsou náchylné k různým chorobám a napadení škůdci, což také zhoršuje jejich odolnost vůči různým stresovým faktorům (Bhardwaj et al. 2025).

Bayındır & Küçükyumuk (2025) prokázali, že aplikace draslíku zvyšuje odolnost rostlin vůči chorobám, podporuje růst kořenového systému celkově zlepšuje jejich vitalitu ve srovnání s nehnojenými variantami. Zvláště hnojení síranem draselným (K_2SO_4) může nepřímo posilovat zdravotní stav rostlin a tím přispívat ke snížení výskytu chorob u papriky. Nejvýraznější účinek byl zaznamenán při dávce 150 kg/ha K_2SO_4 .

3.2.3.2 Draslík v půdě

Celková zásoba draslíku v půdě obvykle převyšuje obsah dusíku i fosforu, ale zásoba je značně proměnlivá v závislosti na typu půdy a klimatických podmínkách. Vyšší obsahy jsou charakteristické pro obdělávané půdy mírného pásma, zatímco laterické a podzolové půdy patří k nejhudším. V podmínkách České republiky se celkový obsah K v ornici pohybuje v rozmezí 0,04–2,7 %. Nejvyšší koncentrace draslíku je u jílovitých půd, které mají vyšší sorpční kapacitu a schopnost ho poutat (Richter 2007). Zörb et al. (2014) uvádějí téměř totožné hodnoty obsahu draslíku v rozmezí 0,04–3 % K a dodávají, že se celkový obsah K v horních 0,2 m většiny zemědělských půd obecně pohybuje mezi 10–20 g/kg.

Draslík se v půdě vyskytuje v několika formách lišících se dostupností pro rostliny. Převážná část celkového obsahu K (přibližně 90–98 %) je vázána ve struktuře primárních minerálů, zejména živců a slíd, a je pro rostliny prakticky nedostupná. Menší podíl (1–10 %) představuje nevýměnný, respektive fixovaný draslík, který je spojen s jílovými minerály v poměru 2:1 a slouží jako potenciální zásobní zdroj. Bezprostředně přístupnou frakci tvoří vyměnitelný draslík (asi 1–2 %), vázaný na místech kationtové výměny a v půdním roztoku, odkud je přijímán kořeny a průběžně doplňován. Dalším, zpravidla méně významným zdrojem je draslík obsažený v organické hmotě a mikrobiální biomase.

Přestože celkový obsah K v půdách často přesahuje 20 g/kg, rozhodující část je strukturálně vázaná a pro výživu rostlin nepřístupná. Množství potenciálně využitelného draslíku se liší v závislosti na matečné hornině a stupni zvětrávání, což se odráží i v rozdílných nárocích na hnojení v různých oblastech (Prajapati & Modi 2012; Lalitha & Dhakshinamoorthy 2012; Zörb et al. 2014, Richter 2007; Mouhamad et al. 2016).

Z hlediska přístupnosti se tedy rozlišují tři základní formy draslíku v půdě: nevýměnný, výměnný a vodorozpustný.

Nevýměnný K zahrnuje formy, z nichž nelze K vytěsnit roztoky neutrálních solí, a tvoří více než 95 % celkového draslíku v půdě. Patří sem především K pevně vázaný v krystalové mřížce primárních a sekundárních silikátových minerálů, dále fixovaný a organicky vázaný draslík (Richter 2007).

Výměnný K představuje frakci půdního draslíku, která je elektrostaticky vázána na povrchu jílových minerálů a huminových látek ve formě komplexu. Tento draslík je schopen rychlé výměny s jinými kationty v půdním sorpčním komplexu a zároveň je relativně snadno přístupný pro příjem rostlin (Mouhamad et al. 2016).

Vodorozpustný K představuje frakci přítomnou v půdním roztoku ve formě volného kationtu, který je rostlinami snadno přijímán, ale zároveň náchylný ke ztrátám vyplavováním. Obvykle tvoří jen velmi malý podíl celkového K v půdě (0,1–0,2 %) (Lalitha & Dhakshinamoorthy 2012).

Odběr draslíku sklizní se obvykle pohybuje v rozmezí 80–250 kg K/ha ročně. Intenzita jeho vyplavování závisí především na sorpční kapacitě půdy a množství srážek. Roční ztráty jsou kolem 13–60 kg K/ha (Richter 2007).

3.2.4 Vápník

Vápník (Ca) představuje esenciální anorganickou živinu nezbytnou pro růst vyšších rostlin. Kromě svých strukturálních a metabolických funkcí se významně podílí také na zmírňování účinků solného stresu a detoxikaci iontů v zasoleném prostředí (Jin et al. 2007).

Orthofosforečnany vápenaté obsahují jako základní složky vápník (Ca) a fosfor (P), jejichž historie sahá hluboko do minulosti. Sloučeniny vápníku byly známy již ve starověku. Například staří Římané připravovali pálené vápno (CaO) z vápence. Sádra (CaSO₄) byla využívána ještě dříve. Elementární vápník byl však izolován až v roce 1808, kdy jej Humphry Davy získal elektrolýzou směsi vápna a oxidu rtuťnatého (Dorozhkin 2013).

3.2.4.1 Vápník v rostlině

Vápník plní v rostlinách především dvě klíčové role – strukturální a regulační. Zatímco strukturální funkce souvisí s podílem na stabilizaci buněčných stěn a membrán, regulační úloha spočívá v jeho působení jako intracelulárního signálního prvku (tzv. druhého posla) (Černý et al. 2021). Vápník patří mezi makroprvky a rostliny jej vyžadují ve značném množství. Jeho obsah ve zdravých pletivech se obvykle pohybuje v rozmezí 0,1–1 % sušiny (White 2001).

Obsah vápníku v rostlinách je výrazně ovlivněn stanovištními podmínkami, zejména jeho koncentrací v půdě a půdním roztoku, dále druhem rostliny, jejím stářím a distribucí vápníku v jednotlivých orgánech. Na příjem má vliv i půdní vlhkost, sorpční kapacita půdy a přítomnost dalších kationtů (především K⁺). Celková potřeba vápníku se mezi plodinami značně liší. Obecně platí, že vyšší nároky vykazují dvouděložné rostliny oproti jednoděložným.

Vzhledem k omezené translokaci do semen zůstává většina vápníku ve vegetativních částech rostlin a po sklizni se zpravidla vrací zpět do půdy. Významnější odsun vápníku nastává pouze u plodin, u nichž je odvážena celá nadzemní biomasa (např. víceleté pícniny, silážní kukuřice). Přestože je jeho ukládání do semen omezené, podílí se na tvorbě některých zásobních látek, například fytinu (Černý et al. 2021).

Příjem vápníku probíhá především v oblasti kořenových vlásků, které díky značnému zvětšení absorpčního povrchu zajišťují efektivní kontakt s půdním roztokem. Ionty Ca²⁺ vstupují do epidermálních buněk prostřednictvím specifických membránových kanálů, přičemž nejvyšší intenzita jejich příjmu byla zaznamenána v apikálních částech kořenových vlásků (Yang & Jie 2005).

Vápník je po příjmu rostlinou transportován převážně xylémem. Jeho pohyblivost je však omezená, protože se snadno váže na anionty a další vazebná místa v pletivech. Ve floému je prakticky nepohyblivý, což znemožňuje jeho efektivní přerozdělování mezi orgány. Z tohoto důvodu se vápník v rostlině významně nereutilizuje a vyžaduje průběžný přísun z půdního prostředí během celé vegetace (Richter 2004).

Vápník je považován za klíčový prvek podílející se na procesech buněčného dělení a elongace buněk. V rostlinách je jeho nejvyšší koncentrace v listech, přičemž starší listy obsahují více vápníku než mladší pletiva. U řady druhů se vyskytuje ve formě nerozpustných krystalů šťavelanu vápenatého, též vytváří soli s organickými kyselinami a interaguje s bílkovinami. Významnou roli hraje také v metabolismu dusíku, zejména při redukci dusičnanů v rostlinných pletivech (Prasad & Shivay 2020). Dle Richter (2004) má zásadní

význam pro metabolismus rostlin. Jeho nedostatek se nejprve projevuje na kořenech, a to omezením tvorby kořenových vlásků, zahníváním a rozpadem pletiv. Podílí se na stabilizaci a konformaci bílkovin, zpevňuje buněčné stěny a je nezbytný pro růst některých buněk. Kromě toho také váže organické kyseliny, ovlivňuje stabilitu pletiv a aktivitu řady enzymů.

3.2.4.2 Vápník v půdě

Obsah vápníku v půdě je podmíněn především matečným substrátem a intenzitou zvětrávání. V tropických půdách dosahuje obvykle 0,1–0,3 %, zatímco ve vápenatých půdách může kolísat od méně než 1 % do 25 %. Hodnota kolem 3 % zpravidla signalizuje přítomnost volného CaCO_3 (Prasad & Shivay 2020). Richter (2007) uvádí, že je celkový obsah vápníku v půdách značně variabilní a pohybuje se v rozmezí 0,15–6 %, přičemž průměrná hodnota je kolem 2 %. Jeho nižší obsah je typický pro písčité půdy ve vlhčích oblastech. Jílovité půdy mají vyšší kationtovou výměnnou kapacitu, díky které zadržují kladně nabitě ionty, včetně Ca, a proto obvykle obsahují více vápníku. Vyrovnané množství Ca se běžně vyskytuje v hlinitých půdách. Vápník je rostlinám snáze dostupný v mírně kyselém až alkalickém prostředí, a proto alkalické půdy zpravidla vykazují vyšší koncentrace Ca (Jing et al. 2024).

Dle Vaněk et al. (2012) jsou nejběžnějšími sloučeninami vápníku v půdách především vápence a dolomity, případně také minerál anortit. Richter (2007) uvádí, že **nevýměnný vápník** je v půdě vázán jako součást krystalové mřížky některých málo rozpustných horninotvorných minerálů. Kromě výše uvedených mezi ně patří i apatity a v menší míře také některé jílové minerály, jako je montmorillonit. Vápník zabudovaný v krystalové mřížce těchto minerálů se uvolňuje velmi pomalu v průběhu zvětrávání, a proto má pro okamžitou výživu rostlin jen omezený význam. **Výměnný vápník** tvoří v půdě jen malé množství (1–2 % nevýměnného Ca) a v sorpčně nasycených půdách představuje významnou část výměnných kationtů (60–80 %). Je vázán především fyzikálně-chemicky na povrchu půdních koloidů, dle jejich sorpční kapacity. V této formě je Ca pro rostliny dobře dostupný a zároveň přispívá k tvorbě stabilní drobtovité půdní struktury. Pouze malá část půdního vápníku se nachází **ve vodorozpustné formě**. Tvoří ji především různé soli vápníku s anionty některých kyselin, například chloridy nebo dusičnany, dále hydrogenuhličitan vápenatý, dihydrogenfosforečnan vápenatý, rozpustné Ca-cheláty a také rozpustné podíly síranu či uhličitanu vápenatého.

Rozpustnost uhličitánových sloučenin je výrazně ovlivněna reakcí půdy (pH). V kyselejším prostředí se jejich rozpustnost zvyšuje. Významnou roli zde hraje rovněž obsah oxidu uhličitého, jehož množství je dáno intenzitou biologických procesů probíhajících v půdě. Působením CO_2 dochází k rozpouštění vápence za vzniku hydrogenuhličitanu vápenatého. Tento hydrogenuhličitan je ve vodě rozpustný, a proto se může poměrně snadno pohybovat v půdním profilu. Tím pádem může docházet i k jeho vyplavování do hlubších vrstev půdy, což v humidních oblastech může způsobovat významné ztráty vápníku z půdy. Současná přítomnost vápence a hydrogenuhličitanu vápenatého v půdě přispívá ke stabilizaci neutrální reakce a zvyšuje schopnost půdy odolávat změnám pH (tedy její pufrční kapacitu) (Vaněk et al. 2012).

3.2.5 Hořčík

Hořčík (Mg) není jen základní makroživinou, ale hraje také klíčovou roli pro vitalitu a kvalitu zahradních plodin. Jeho význam se projevuje v široké škále fyziologických procesů rostlin, včetně fotosyntézy, metabolismu živin, stability buněčných membrán, aktivace enzymů a schopnosti rostlin odolávat různým stresovým faktorům (Ahmed et al. 2023, Chen et al. 2018).

Byl objeven na počátku 19. století při pokusech s elektrolýzou, které prováděl Humphry Davy. Využíval k tomu velké Voltovy články složené z mnoha galvanických článků zapojených do série, díky nimž mohl dosahovat vysokého napětí a proudu. Pomocí elektrolýzy roztavených látek tak dokázal izolovat několik nových prvků, mezi nimi také hořčík, spolu s draslíkem, sodíkem, vápníkem či stronciem (Ackland et al. 2025). Jedná se o prvek, který je v přírodě poměrně rozšířený. Nachází se ve značném množství v různých horninách a minerálech a významně je také zastoupen v mořské vodě (Ferreira et al. 2023).

3.2.5.1 Hořčík v rostlině

Hořčík je sice v rostlinných pletivech zastoupen v poměrně malém množství, ale i tak patří mezi nezbytné makroživiny. Má zásadní význam pro řadu fyziologických procesů rostlin a ovlivňuje jejich růst, vývoj, výnos i schopnost vyrovnávat se nepříznivým podmínkám prostředí (Ahmed et al. 2023).

Obsah hořčíku v listech se výrazně liší podle druhu rostliny (Hauer-Jákli & Tränkner, 2019). U obilnin, jako jsou rýže, pšenice, kukuřice, ječmen nebo čirok, a také u brambor se optimální koncentrace Mg v sušině listů obvykle pohybuje mezi 0,1–0,2 %. Vyšší nároky mají například bavlník, sója či arašíd (0,2–0,3), zatímco u plodin, jako jsou slunečnice, vojtěška nebo rajčata, může optimální obsah dosahovat přibližně 0,35 %. Obecně se optimální koncentrace Mg na základě tvorby sušiny pohybuje u dřevin mezi 0,09–0,40 %, u jednoděložných rostlin 0,07–0,21 % a u dvouděložných 0,10–0,70 %. Pro zajištění optimální fotosyntetické aktivity se přitom požadované koncentrace Mg u těchto skupin rostlin pohybují přibližně v rozmezí 0,10–0,5 %, 0,15–0,41 % a 0,10–0,72 % (Hauer-Jákli & Tränkner, 2019).

Jedinou formou hořčíku, kterou mohou rostliny přímo přijímat je iont Mg^{2+} . Tento iont má nejmenší iontový poloměr, ale zároveň největší hydratovaný poloměr mezi kationty, což způsobuje, že se slabě váže na půdní koloidy a kořenové buněčné stěny (Grzebisz 2011; Chen et al. 2018). Nadměrné hnojení K^+ a NH_4^+ navíc snižuje jeho příjem, což zvyšuje riziko nedostatku, zvláště v kyselých půdách (Gransee & Fuhrs 2013).

Hořčík je centrální součástí chlorofylu v chloroplastech, a proto má zásadní význam pro fotosyntézu a asimilaci CO_2 . Přibližně 15–35 % hořčíku přijatého rostlinami je vázáno v chlorofylových pigmentech, zatímco většina zbývajících množství je ukládána ve vakuolách nebo využívána při syntéze bílkovin a dalších metabolických procesech (Ishfaq et al. 2022).

Dle Černý et al. (2012) se hořčík též podílí na řadě důležitých metabolických procesů v rostlinách. Ovlivňuje například tvorbu ATP při fotofosforylaci v chloroplastech, fixaci uhlíku z CO_2 během fotosyntézy, syntézu bílkovin a vznik chlorofylu. Dále se uplatňuje při transportu látek v rostlině, ukládání asimilátů i při procesech spojených s tvorbou reaktivních forem kyslíku a fotooxidací v listových pletivech. Zároveň působí jako aktivátor řady enzymů zapojených do metabolismu. Mezi nejvýznamnější patří ribulóza-1,5-bisfosfát karboxyláza

(RuBisCO), což je klíčový enzym fotosyntézy a zároveň jeden z nejrozšířenějších enzymů v biosféře. Poláková (2026) dodává, že je též nedílnou součástí energetického metabolismu, zajišťuje transport asimilátů floémem. Zároveň ovlivňuje příjem a využití dalších živin, jako jsou N, P, K, Ca a S, a přispívá ke stabilitě buněčných membrán i vyšší odolnosti rostlin vůči stresovým podmínkám.

Typickými projevy nedostatku hořčíku jsou zpomalení růstu rostlin a interveinální chloróza, která se nejprve objevuje na starších listech. Vzhledem k tomu, že je hořčík v rostlině dobře mobilní, tak dochází při jeho nedostatku k jeho přesunu ze starších listů do mladších částí rostliny, a proto se první viditelné příznaky objevují právě na starších listech a postupně se mohou šířit i na mladší. Chloróza se obvykle začíná projevovat při poklesu koncentrace Mg pod cca 1–2 mg/g sušiny listu (Chaudhry et al. 2021).

3.2.5.2 Hořčík v půdě

Dle Richter (2007) se obsah hořčíku v půdě může značně lišit a vyskytuje se v různých formách. Ferreira et al. (2023) uvádějí, že je obsah hořčíku v půdě ovlivněn hlavně strukturou půdy a obsahem organické hmoty, které určují její kationtovou výměnnou kapacitu. V písčitých půdách je koncentrace Mg v roztoku obvykle vyšší než v jílovitých, kde jeho uvolňování často nestačí pokrýt potřeby rostlin. Průměrné množství celkového hořčíku se pohybuje přibližně mezi 0,4–0,6 % a je do značné míry ovlivněno minerálním složením matečné horniny. Mezi minerály s vyšším obsahem hořčíku patří například serpentín (hadec), magnezit, olivín, kieserit, dolomit, kainit, vermikulit či chlorit (Richter 2007).

Rozložení hořčíku v půdě je podobné jako u draslíku a vápníku a obvykle se rozlišuje do tří forem: nevyměnitelná (fixovaná), vyměnitelná a rozpustná. Hlavní část Mg je přítomna v **nevyměnitelné formě**, která zahrnuje veškerý Mg v primárních minerálech a většinu Mg v sekundárních minerálech. Z primárních minerálů se uvolňuje velmi pomalu postupným zvětváním a většina (90–95 %) je obsažena v silikátech, alumosilikátech, pyroxenech, biotitu, serpentinu a dalších minerálech. **Vyměnitelný Mg** tvoří asi 5 % celkového Mg a spolu s rozpustným Mg je klíčový pro zásobování rostlin touto živinou (Ferreira et al. 2023). Richter (2007) uvádí, že výměnná forma tvoří zhruba 5–10 % z celkového Mg a představuje nejdůležitější formu Mg dostupnou pro rostliny. V sorpčním komplexu tvoří přibližně 10–15 % z celkově vázaných kationtů. Jeho sorpční schopnost je vyšší než u draslíku, ale nižší než u vápníku. Optimálně by měl tvořit přibližně trojnásobek podílu draslíku (poměr by neměl klesnout od 2:1). **Rozpustný hořčík** se v půdě vyskytuje v různých solích, které tvoří část půdního roztoku a jsou rostlinami snadno přijímány jako Mg^{2+} . Některé ionty však mohou pronikat do krystalové mřížky minerálů (například montmorillonitu) a stát se tak pro rostliny nedostupnými. (Richter 2007).

Hodnota pH půdy výrazně ovlivňuje uvolňování hořčíku z jílových minerálů a jeho dostupnost pro rostliny. Senbayram et al. (2015) uvádějí, že hořčík, který je vyměnitelný při $pH < 6,0$, se při zvýšení pH nad 6,5 stává nevyměnitelným. Přičemž vyšší koncentrace rozpustného Mg v půdním roztoku nemusí vždy znamenat jeho dostupnost pro rostliny, protože příjem může být omezen nadměrnou koncentrací jiných kationtů (například H^+).

V rámci pěstování rostlin se hořčík do půdy nejčastěji dodává prostřednictvím vápenatých hnojiv, ale může být aplikován také ve formě síranu hořečnatého, oxidu

hořečnatého nebo magnezitu, který představuje jeden z hlavních přírodních zdrojů hořčíku (Ferreira et al. 2023).

3.2.6 Síra

Znalost síry v dávných dobách dokládají zmínky v nejstarších jazycích, zejména sanskrtu. Podle Erica Holmyarda pochází latinské označení pro síru ze sanskrtského slova *sulvari*, které znamená ‚nepřítel mědi‘. To naznačuje, že síru lidé znali již před více než 5000 lety (Szydlo 2023).

Síra je jednou z nezbytných živin pro rostliny a její role ve výživě rostlin je dobře zdokumentována. Hraje zásadní roli v primárním metabolismu vyšších rostlin a podílí se na syntéze sekundárních metabolických produktů u určitých skupin rostlin. Její význam je srovnatelný s dusíkem a fosforem při tvorbě bílkovin. Ovlivňuje výnos a zlepšuje kvalitu plodin (Sutar al. 2017).

3.2.6.1 Síra v rostlině

Síra je nezbytná makroživina, která je životně důležitá pro růst a fungování rostlin. Celkový obsah síry v rostlinných buňkách se pohybuje od 0,3 % do 7,6 %. Síra má významnou roli ve struktuře bílkovin i ve funkci enzymů, protože je součástí aminokyselin cysteinu a methioninu. Kromě toho se podílí i na tvorbě oligopeptidů, některých vitamínů kofaktorů. Je též součástí různých sekundárních metabolitů rostlin, a proto se podílí na řadě biochemických procesů (Zenda et al. 2021). Potřeba síry u různých druhů rostlin se může pohybovat přibližně mezi 2–10 $\mu\text{mol/g}$ čerstvé hmotnosti za den. Většina přijaté anorganické síry je v rostlině rychle redukována a přeměněna na organické sloučeniny potřebné pro růst (De Kok et al. 2002).

Příjem síry probíhá především ve formě síranových iontů, jejichž transport z půdy i v rámci rostlinných buněk zajišťují specifické membránové transportéry. Přesun síranů přes plazmatickou membránu je umožněn protonovým gradientem udržovaným protonovou ATPázou, přičemž transport probíhá mechanismem symportu, při kterém vystupují ionty H^+ společně se síranem (Narayan et al. 2022). Většina přijatého síranu je transportována xylémem do nadzemních částí rostliny transpiračním proudem. V rostlinách dochází k jeho redukcí v chloroplastech a dalšímu metabolickému využití (De Kok et al. 2002). Síra může být rostlinami přijímána také z ovzduší, avšak vzhledem k výraznému snížení emisí je dnes atmosférická depozice jen málo významným zdrojem. Proto se jako vhodný způsob doplnění síry využívá také mimokořenová aplikace ve formě listových hnojiv (Škarpa et al. 2020)

Rai et al. (2020) popisují, že je síra velmi důležitá pro vyváženou výživu rostlin, protože je součástí dvou aminokyselin podílejících se na syntéze bílkovin, a tím přispívá i ke zlepšení využití dusíku. S rostoucími výnosy plodin se zároveň zvyšuje i množství síry odčerpané z půdy, což může vést k jejímu postupnému úbytku. Její doplňování je důležité zvláště u plodin s vysokou potřebou dusíku. N i S jsou totiž nezbytné prvky pro syntézu bílkovin a průběh fotosyntézy. Smatanová et al. (2004) doplňují, že s rostoucí produkcí biomasy se úměrně zvyšuje i celková spotřeba dusíku a síry rostlinami, což potvrzuje jejich význam pro intenzivní růst a tvorbu biomasy. Ve studii od Shah et al. (2022) došli autoři k závěru, že síra podporuje růst a celkovou vitalitu rostlin, zlepšuje průběh fotosyntézy a přispívá k vyššímu výnosu i lepší

kvalitě produkce. Zároveň zjistili, že její aplikace může zmírňovat negativní vliv abiotického stresu a zvyšovat produktivitu významných zemědělských plodin.

Typickým projevem nedostatku síry je žloutnutí listů, které se na rozdíl od nedostatku dusíku objevuje nejprve na mladších listech a při dlouhodobém deficitu se může rozšířit i na další části rostliny. U vikvovitých rostlin může nedostatek síry omezit nebo zcela zastavit fixaci vzdušného dusíku (Richter 2004).

3.2.6.2 Síra v půdě

Celkový obsah síry v půdě se pohybuje mezi 0,01–0,1 %, přičemž většina je podobně jako u dusíku vázána v půdní organické hmotě. Organická forma přitom představuje přibližně 90–95 % celkového množství síry (Černý et al. 2012). Dle Richter (2007) celkový obsah síry v půdách kolísá v rozmezí od 0,01 do 2 %.

Přírodním zdrojem síry v půdě jsou sulfidy, jako jsou pyrit, markasit, chalkopyrit, sádrovec, anhydrit či baryt. V aerobních podmínkách je síra převážně ve formě síranů, v anaerobních podmínkách pak v podobě siřníků. V běžných půdách je nejvíce síry obsaženo v sádře, která i přes nízkou rozpustnost ve vodě dokáže během vegetace pokrýt potřeby rostlin. Při vysychání půdy však koncentrace síranů v roztoku rychle klesá (Richter 2007).

Pro výživu rostlin jsou však nejdůležitější anorganické formy síry, zejména síranový anion SO_4^{2-} , který tvoří asi 1 % celkového obsahu síry v půdě. Dalším možným zdrojem jsou sírany adsorbované na povrchu půdních částic nebo částečně síra uzavřená v síranech vápníku a hořčíku. Sírany v půdním roztoku jsou v rovnováze se sírany v pevné fázi a podobně jako fosforečnany se mohou vázat na oxidy železa a hliníku (Černý et al. 2012). Dle Kertesz & Mirleau (2004) tvoří anorganické sírany v zemědělských půdách obvykle méně než 5 % celkového obsahu síry, což však neznamená, že je síry v půdě málo. Více než 95 % síry je vázáno v organických sloučeninách, a proto není pro rostliny přímo dostupná. Tato organická síra se nachází částečně v mikrobiální biomase a částečně v půdní organické hmotě.

Organické sloučeniny síry se vyskytují v mikroorganismech, rostlinách i živočiších, a proto se mohou do půdy dostávat během jejich života i po jejich odumření. Tyto sloučeniny však tvoří velmi heterogenní směs, přičemž jejich přesné chemické složení není dosud dostatečně poznáno. Protože jsou uhlík, dusík a síra základními složkami půdní organické hmoty, množství organické síry úzce souvisí s obsahem organického uhlíku a celkového dusíku v půdě (Scherer 2009).

Hlavní přeměny síry v půdě zahrnují imobilizaci, mobilizaci a mineralizaci. Síra je imobilizována začleněním do organické hmoty mikroorganismů. Přidaný síran se může vázat nebo přeměňovat na nízkomolekulární organické sloučeniny, čímž dochází k jeho zadržování v půdě. Mobilizace rozkládá složité organické sloučeniny na menší, dostupné formy a řídí rychlost mineralizace, při níž se organická síra mění na anorganickou. Dostupnost síry je značně ovlivněna fyzikálně-chemickými vlastnostmi půdy (Ghani et al. 1992).

3.3 Využití odpadních materiálů v zemědělství

Podle prognóz by měla světová populace do roku 2050 dosáhnout přibližně 9,7 miliardy obyvatel a do roku 2100 asi 10,4 miliardy. V současnosti má planeta zdroje pro zajištění výživy přibližně 8 miliard lidí, a proto je nutné hledat vhodná politická i ekonomická řešení, která by pomohla zvládnout stále rostoucí poptávku po potravinách. Rozšiřování zemědělské půdy na úkor lesů, křovin či méně úrodných oblastí často finančně náročné a může mít negativní dopady na životní prostředí i fungování ekosystémů (Barlóg 2023, Gomiero 2016).

Za nejvhodnější směr rozvoje zemědělství se proto považuje zvyšování výnosů na již využívané zemědělské půdě (Pradhan et al. 2015). K tomu přispívá zejména pokrok ve šlechtění rostlin, efektivní využívání minerálních hnojiv, ochrana rostlin a dostatečné odborné znalosti zemědělců.

Podle publikace Haque et al. (2023) je nutné hledat způsoby, jak zajistit dlouhodobě udržitelnou produkci. Jednou z možností je přejít k cirkulární ekonomice, která usiluje o opětovné využívání a recyklaci materiálů. Přírodní zdroje jsou totiž omezené a jejich nadměrné využívání může vést k jejich postupnému vyčerpání. Międażys et al. (2016) uvádějí, že se principy cirkulární ekonomiky projevují především využíváním odpadních materiálů jako zdroje živin. Různé druhy biomasy (například zbytky po sklizni či živočišná hnojiva) mohou být zpracovány na hnojiva bohatá na živiny, jako je dusík, fosfor nebo draslík. Tím lze snížit závislost na syntetických hnojivech a zároveň zajistit efektivní nakládání se zemědělskými odpady prostřednictvím jejich zpětného využití. Awasthi et al. (2015) popisují i možnost využití biomasy jako zdroj energie, například ve formě biopaliv, což ve finále přispívá ke snížení spotřeby fosilních paliv a omezení množství odpadu na skládkách. Součástí tohoto přístupu je také snaha o efektivnější využívání zdrojů, například prostřednictvím precizního zemědělství, které umožňuje aplikovat různé druhy hnojiv ve správném množství, čase i místě (Preethi et al. 2024; Yaqot et al. 2023).

V Evropské unii roste potřeba zadržování a recyklace odpadů, a to zejména s cílem omezit znečištění životního prostředí a efektivněji využívat omezené přírodní zdroje. Významnou roli v tomto směru představují především odpady živočišného a komunálního původu, které mohou být po vhodné úpravě využity jako hnojiva v zemědělství. Organické odpady určené pro zemědělské využití lze rozdělit do tří hlavních skupin: odpady živočišného původu (např. hnůj), rostlinné materiály využívané ve formě zeleného hnojení nebo kompostů a komunální organické odpady, mezi které patří zejména kaly z čistíren odpadních vod a biologicky rozložitelný odpad z domácností (Case et al. 2017).

Organické odpady určené k výrobě hnojiv lze upravovat různými technologiemi, jejichž cílem je zachovat co nejvyšší obsah živin, zejména dusíku a fosforu, a zároveň zvýšit jejich vhodnost pro zemědělské využití (Rigby et al. 2016). Zpracování může zahrnovat například separaci jednotlivých složek anaerobní digestí za účelem produkce energie, spalování nebo úpravy vedoucí k odstranění patogenů a stabilizaci živin. V závislosti na použité technologii lze tímto způsobem zlepšit vlastnosti výsledného produktu, zejména jeho manipulovatelnost, hnojivý účinek a schopnost zlepšovat půdní vlastnosti, což následně zvyšuje jeho ekonomickou i environmentální hodnotu (Case et al. 2017).

Z hlediska využití organických odpadů je důležité zdůraznit i čištění odpadních vod, které představuje důležitý nástroj pro snížení spotřeby fosforu. Každý člověk totiž denně produkuje

přibližně 2 gramy fosforu (například z detergentů či potravinového odpadu). Odstraňování fosforu při čištění odpadních vod je primárně určeno k ochraně vod před eutrofizací a dodržení vypouštěcích limitů (Verstraete et al. 2009). Zároveň však tento fosfor může být znovu využit v zemědělství, čímž částečně nahrazuje fosforečná hnojiva a podporuje uzavřený cyklus živin (Cornel & Schaum 2009).

3.3.1 Čistírenské kaly

V odborné literatuře se pro upravené čistírenské kaly často používá také označení biosolidy. Tento termín obvykle označuje organické materiály bohaté na živiny, které vznikají při čištění komunálních odpadních vod a mohou být po vhodné úpravě využívány například v zemědělství (Usman et al. 2012).

3.3.1.1 Definice, vznik a složení

Čistírenský kal představuje heterogenní směs pevných a koloidních částic rozptýlených ve vodě, přičemž jeho složení je ovlivněno především charakterem odpadní vody přiváděné do komunální čistírny odpadních vod. Obvykle obsahuje organické i anorganické látky, například zbytky rostlinného a živočišného původu, různé soli, enzymy a pevné částice, jako jsou písek nebo skořápky (Ministerstvo životního prostředí 2023).

Ve velkých městech vzniká odpadní voda ve značném množství a je obvykle čistěna v čistírnách odpadních vod (ČOV), které využívají biologické procesy a produkují kaly z čistíren odpadních vod. Hlavní zdroje těchto kalů jsou primární sedimentační nádrže a sekundární dočišťovací jednotky. Další kaly mohou vznikat také při chemickém srážení, třídění, mletí nebo filtraci (Sugurbekova et al. 2023).

Čistírenské kaly jsou vedlejším produktem čištění odpadních vod, bohatým na organické i anorganické složky. Obsažená organická hmota může příznivě ovlivňovat vlastnosti půdy. Přispívá ke zlepšení půdní struktury, podporuje tvorbu půdních agregátů a zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu. Tím vytváří i vhodnější podmínky pro rozvoj kořenového systému rostlin. Zároveň dochází ke zvýšení mikrobiální aktivity v půdě, která hraje důležitou roli v koloběhu živin a podporuje půdní biodiverzitu. Tyto procesy jsou významné pro udržení půdní úrodnosti, včetně omezení výskytu některých půdních chorob (Balkrishna et al. 2025). Mohou však zároveň vykazovat znečišťující účinky. Kaly obsahují také rozmanitou mikrobiální populaci a enzymy, což zvyšuje jejich biologickou hodnotu. Mnoho organických odpadů obsahuje významné množství fosforu v různých formách, přičemž čistírenské kaly představují druhý největší zdroj fosforu po kostní moučce. Díky jejich vysoké dostupnosti jsou dnes považovány za perspektivní alternativní zdroj fosforu pro zemědělství (Cordell et al. 2011; Havukainen et al. 2016). Usman et al. (2012) též uvádí, že kaly z čistíren odpadních vod vznikají jako vedlejší produkt procesu čištění odpadních vod. Představují směs vody a anorganických i organických látek, které jsou z odpadních vod odstraňovány během fyzikálních, biologických a chemických procesů. Tyto látky mohou pocházet z různých zdrojů, například z domácích a průmyslových odpadních vod nebo srážkových vod odtékajících z komunikací a jiných zpevněných ploch.

Dle studie od Ahmed et al. (2010) kaly z čistíren odpadních vod představují nerozpustný zbytek z procesu čištění odpadních vod, a to po aerobním či anaerobním rozkladu organických

látek. Obsahují významné množství organické hmoty (přibližně 65 %) a živin, zejména dusík (asi 3 %) a fosfor (kolem 0,9 % P). Dále se v nich nacházejí i další makroživiny, například draslík (0,4 % K), vápník (3,6 % Ca) a hořčík (0,9 % Mg), a také různé stopové prvky. Podle publikace Kacprzak et al. (2017) obsahuje kal 30–50 % minerální složky (včetně 1–4 % anorganického uhlíku). Tabulka 1 přehledně shrnuje obecnou charakteristiku kalů z městských čistíren odpadních vod.

Tabulka 1: Charakteristika kalů z městských čistíren odpadních vod (Kacprzak et al. 2017)

Parametr	Typ kalu		
	Neupravený kal	Vyhníly kal	Sekundární kal
Celková sušina (%)	2,0–8,0	6,0–12	0,8–1,2
Těkavé pevné látky (% z celku)	60–80	30–60	59–88
Tuky a mastné kyseliny (% z celku)	7,0–35	neuvedeno	5,0–12
Bílkoviny (% z celku)	20–30	15–20	32–41
Celulóza (% z celku)	8,0–15	8,0–15	7,0–9,7
Fosfor (% z celku)	0,8–2,8	1,5–4,0	2,8–11,0
Dusík (% z celku)	1,5–4,0	1,6–6,0	2,4–5,0
Draslík (% z celku)	0,0–1,0	0,0–3,0	0,5–0,7
pH	5–8	6,5–7,5	6,5–8

3.3.1.2 Zpracování kalů

Zpracování kalů z čistíren odpadních vod představuje významnou součást provozu čistíren. Odhaduje se, že přibližně polovina provozních nákladů sekundárních čistíren odpadních vod v Evropě souvisí právě s úpravou a likvidací kalů. Na výsledné vlastnosti kalu proto nepůsobí pouze složení surového kalu, ale také jednotlivé technologické procesy, které probíhají během jeho úpravy v čistíreně odpadních vod. Zpracování kalů dle Kacprzak et al. (2017) obvykle zahrnuje několik na sebe navazujících kroků:

- Předběžné ošetření – odstranění hrubých nečistot pomocí prosévání nebo drcení.
- Primární zahušťování – snížení objemu kalu a zvýšení koncentrace sušiny (gravitačním, flotačním či odstředivým zahušťováním).
- Stabilizace kalu – biologické nebo chemické procesy (např. anaerobní či aerobní digesce, případně přidavek vápna), které omezují rozklad organické hmoty, zápach a množství patogenů.
- Sekundární zahušťování – další zvýšení koncentrace sušiny pomocí podobných metod jako u primárního zahušťování.
- Úprava kalu – doplňkové procesy (například chemická, tepelná nebo jiná úprava), které zlepšují vlastnosti kalu pro další zpracování.
- Odvodňování – mechanické odstranění vody pomocí speciálních zařízení (lisy, odstředivky a podobně).
- Konečné zpracování – další využití nebo stabilizace kalu (například kompostování, sušení, spalování, mokrá oxidace, pyrolýza či dezinfekce).

- Skladování – uchování kalu v různých formách (kapalný kal, odvodněný kal, kompost nebo popel).
- Doprava – přeprava kalu na místo využití nebo odstranění, nejčastěji silniční dopravou.
- Konečné využití nebo odstranění – například aplikace v zemědělství či zahradnictví, využití při rekultivaci půd, lesnictví nebo uložení na skládku.

3.3.1.3 Nakládání s čistírenskými kaly

Čistírenské kaly mohou být po vhodné úpravě využívány nebo odstraňovány různými způsoby. Mezi nejčastěji uváděné patří zejména:

- **termické zpracování** a energetické využití, například spalování, spoluspalování s jinými palivy v teplárnách, elektrárnách nebo spalovnách komunálního odpadu, spalování v cementárenských pecích či pokročilé technologie, jako je pyrolýza nebo zplyňování
- **skládkování**, tedy ukládání kalu na zabezpečené skládky
- **kompostování**, při kterém dochází k biologickému rozkladu organické hmoty a vzniku stabilního organického materiálu
- **aplikace na zemědělskou půdu**, kde mohou být kaly využity jako zdroj živin a organické hmoty pro půdu (Černý et al. 2014).

Podle údajů Českého statistického úřadu (ČSÚ) bylo za rok 2024 vyprodukováno 218 583 tun sušeného kalu. Téměř polovina (46,9 %, konkrétně 102 493 t) z tohoto množství bylo kompostováno, 9,5 % bylo odstraněno skládkováním, 11,2 % spalováním, 12,7 % bylo použito na rekultivace a přímo aplikováno v zemědělství bylo 19,7 % (ČSÚ, 2026). Produkce a využití kalů v jednotlivých krajích jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Kaly v roce 2024 (ČSÚ 2025)

Území, kraj	Kaly produkované v ČOV celkem (t sušiny)	Způsob zneškodnění kalu (t sušiny)				
		přímá aplikace	rekultivace	kompostování	skládkování	spalování
Jihočeský	10017	3070	1581	5248	40,3	77,4
Plzeňský	26330	631	5613	19210	595	282
Karlovarský	3174	0,28	1483	122	1268	300
Ústecký	31604	0	56	9435	1784	20329
Liberecký	5719	5,9	0	5457	256	0
Královéhradecký	6817	2307	0	4455	54,6	0
Pardubický	7035	1363	170	2852	2650	0
Vysočina	10188	1703	0	8444	41,0	0
Jihomoravský	17750	1513	0	12820	597	2821
Olomoucký	14639	5342	34,2	8158	927	177
Zlínský	15714	1915	1920	2916	8907	55
Moravskoslezský	18044	5,45	14733	2778	514	13,029
celkem (t sušiny)	218 583	43 067	27 699	102 493	20 862	24 461
celkem (%)	100	19,7	12,7	46,9	9,5	11,2

3.3.1.4 Využití v zemědělství

Biosolidní čistírenský kal představuje vysoce hydratovaný organický odpad vznikající při procesu čištění odpadních vod v čistírnách odpadních vod. Tento materiál obsahuje látky s hnojivým potenciálem, zároveň však může zahrnovat také mikrobiální a chemické kontaminanty. Celosvětová produkce biosolidů se odhaduje přibližně na 125–150 milionů tun ročně a předpokládá se, že v následujících letech ještě poroste (Kowalski et al. 2024).

Zemědělská aplikace čistírenských kalů představuje jednu z nejjednodušších a ekonomicky nejméně náročných metod jejich využití. Tento způsob nakládání zároveň umožňuje navracení cenných živin i organické hmoty zpět do půdy, čímž přispívá k jejich recyklaci (Elmi et al. 2020).

Zhang et al. (2022) zkoumali vliv čistírenských kalů na růst salátu a došli k závěru, že aplikace kalu v nízké dávce (0,2 g/kg) zvýšila výnos o 15–50 % oproti kontrole, přičemž nejvyšší nárůst vykazovala skupina RS (bez předúpravy kalu). Rozdíly mezi jednotlivými úpravami však nebyly statisticky významné. Při vysoké dávce (8 g/kg) se biomasa salátu ve většině druhů úprav snížila oproti kontrole. Celkově byla účinnost kalu závislá na dávce a metodě předúpravy. Nejlepší výsledky byly dosaženy u kalu bez předúpravy a kalu po anaerobní digestci.

Autoři studie od Černý et al. (2010) uvádějí, že aplikace samotných organických hnojiv ve vysokých dávkách obvykle nevede k tak vysokým výnosům jako rovnoměrné minerální hnojení. Nejlepších výsledků je zpravidla dosaženo při kombinaci organických a minerálních hnojiv. Zároveň bylo zjištěno, že rozdíl ve vlivu statkového hnoje a čistírenského kalu na výnos plodin byl minimální.

Výroba organominerálních hnojiv na bázi čistírenských kalů tedy představuje perspektivní způsob využití kalů, zejména v oblastech s nižší úrovní industrializace. Tato hnojiva se vyznačují vysokou agronomickou účinností, což bylo potvrzeno i v nádobových pokusech od Kominko et al. (2022). Aplikace hnojiva určeného pro řepku vedla ve srovnání s kontrolním vzorkem ke zvýšení biomasy o 75–138 % (v závislosti na použité dávce). Pozitivní vliv na růst biomasy byl zaznamenán také u hnojiv aplikovaných na kukuřici a slunečnici. Výsledky studie naznačují, že hnojiva na bázi čistírenských kalů mohou rostlinám poskytovat potřebné živiny a podporovat jejich růst a vývoj.

Kompostování je aerobní rozklad organických substrátů, podporuje rozvoj mikroorganismů, které mění fyzikálně-chemické vlastnosti směsi. Tento proces snižuje objem až o 40–50 %, účinně ničí patogeny a degraduje řadu nebezpečných organických polutantů (Cesaro et al. 2015). Kompostované čistírenské kaly poskytují rostlinám živiny, organickou hmotu a prospěšné mikroorganismy. Jejich použití může snížit spotřebu hnojiv i pesticidů a zlepšit fyzikální a biologické vlastnosti půdy, avšak nadměrná aplikace může vést k hromadění těžkých kovů v povrchové vrstvě (Liu et al. 2007). Dle studie od Vaca et al. (2011), kteří zkoumali vlivy kalů a kompostů z kalů z čistíren odpadních vod na vlastnosti půdy a rostliny kukuřice autoři došli k závěru, že je výsledný kompost cenným zdrojem organické hmoty, pomalu uvolňujících se živin a stopových prvků. Kompostování zároveň snižuje dostupnost těžkých kovů, které ovlivňují jejich přístupnost rostlinám.

Výsledky dvouletého experimentu prokázaly, že aplikace městských čistírenských kalů v dávkách přibližně 15–25 t/ha na zemědělskou půdu využívanou pro pěstování sóji a pšenice

vede ke zvýšení výnosů plodin, aniž by docházelo k překročení koncentrací těžkých kovů v půdě či rostlinách. Současně dochází ke zlepšení fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy, což potvrzuje vhodnost kalů jako hnojiva zejména pro degradované půdy. Vyšší dávky lze uplatnit především na těžších a vlhčích půdách, zatímco u běžných půd jsou vhodnější nižší dávky z důvodu intenzivnější nitrifikace a možných ztrát dusíku (Marin & Rusănescu 2023).

V publikaci od Marzougui et al. (2022) autoři uvádějí, že je i z hlediska rizik aplikace čistírenských kalů v Tunisku možné je využít jako organické hnojivo zejména pro pícniny, technické plodiny nebo plodiny, jejichž konzumní části nepřicházejí přímo do kontaktu s půdou a jsou sklizeny nejméně 6 měsíců po jejich aplikaci. Naopak použití kalů u zeleniny a ovoce určeného ke konzumaci bezprostředně po sklizni se nedoporučuje, protože by mohlo představovat zdravotní riziko v důsledku možné mikrobiální kontaminace. Arrohas et al. (2024) jako modelovou plodinu zvolili salát, ze kterého však nelze jednoznačně vyvodit, zda jsou přímo konzumované plodiny vhodné pro aplikaci čistírenských kalů. Autoři upozorňují, že i přes prokázaný hnojivý potenciál mohou představovat určité riziko, zejména v souvislosti s možným obsahem toxických organických látek. Z tohoto důvodu se jako vhodnější jeví spíše plodiny, které nejsou konzumovány v čerstvém stavu, například obiloviny.

V České republice je problematika nakládání s čistírenskými kaly upravena souborem právních předpisů, které stanovují podmínky jejich zpracování, využití a odstranění. Mezi základní legislativní rámec patří:

- zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech,
- zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd,
- vyhláška č. 474/2000 Sb., kterou se stanovují požadavky na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů,
- vyhláška č. 377/2013 Sb., upravující skladování a způsob používání hnojiv,
- vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, včetně souvisejících změn dalších právních předpisů týkajících se nakládání s odpady, biologicky rozložitelnými odpady a jejich ukládání či využívání na povrchu terénu (Wanner 2019).

Širšímu uplatnění čistírenských kalů v zemědělství brání především jejich potenciální obsah rizikových látek, zejména zvýšené koncentrace těžkých kovů, patogenních mikroorganismů a toxických organických sloučenin. Tyto kontaminanty mohou negativně ovlivňovat půdní prostředí, ekosystémy i lidské zdraví. Míra kontaminace přitom významně závisí na charakteru přiváděných odpadních vod do městských čistíren odpadních vod (Arrobas 2024).

Evropská legislativa proto stanovuje přísné podmínky pro aplikaci kalů na zemědělskou půdu, včetně limitních hodnot obsahu těžkých kovů v kalech i půdě, požadavků na způsob a dobu aplikace, omezení podle typu pěstovaných plodin a povinnosti předchozí úpravy kalů před jejich využitím (Evropská komise 2023).

Mezní (maximální) hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech (mg/kg sušiny) jsou uvedeny níže v tabulce č. 3. A podmínky použití upravených čistírenských kalů na zemědělské půdě stanovuje vyhláška č. 382/2001 Sb., která mimo jiné určuje limitní hodnoty rizikových látek v půdě a kalech. Přehled těchto hodnot je uveden v tabulce č. 4.

Tabulka 3: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech (mg/kg sušiny) (MŽP 2001)

Riziková látka	Mezní hodnoty koncentrací v kalech (mg/kg sušiny)
As – arsen	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb – olovo	200
Zn – zinek	2500
AOX	500
PCB (suma 7 kongenerů: 28 + 52 + 101 + 118 + 138 + 153 + 180)	0,6
PAU (suma 12 PAU: antracen, chrysen, fenantren, fluoranten, pyren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)antracen, benzo(a)pyren, benzo(ghi)perylen, indeno(123cd)pyren a naftalen)	10

Tabulka 4: Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě (MŽP 2001)

Kategorie kalů	Přípustné množství mikroorganismů (KTJ) v 1 g sušiny aplikovaných kalů		
	termotolerantní koliformní bakterie	enterokoky	Salmonella sp.
I.	$<10^3$	$<10^3$	negativní nález
II.	10^3-10^6	10^3-10^6	nestanovuje se

- I. kaly, které je možno obecně aplikovat do půdy využívané v zemědělství
- II. kaly určené k aplikaci na půdy využívané pro pěstování technických plodin nebo na pozemky, kde se po dobu minimálně tří let nepěstují plodiny určené k přímé konzumaci, a to za dodržení stanovených hygienických a legislativních podmínek

Vzhledem k variabilitě původu čistírenských kalů i způsobů jejich zpracování a s tím souvisejícím rizikům je však nezbytné provádět další výzkumy, které by umožnily stanovit

bezpečné a optimální podmínky pro využití čistírenských kalů v zemědělství, a to i přes jejich nesporný přínos z hlediska obsahu živin (Arrohas 2024).

3.3.1.5 Kalová voda

Kalová voda představuje kapalnou frakci vznikající během technologických procesů zahušťování a následného mechanického odvodňování čistírenského kalu (Švehla et al. 2026, Witek-Krowiak et al. 2022). Vlastnosti kalové vody jsou velmi proměnlivé a závisí zejména na složení přitékající odpadní vody a na použité technologii stabilizace kalu (Švehla et al. 2026; Meena 2025).

Z pohledu cirkulární ekonomiky a využití živin má zásadní význam kalová voda vznikající při zpracování anaerobně stabilizovaného kalu. V průběhu anaerobní stabilizace dochází k rozkladu organické hmoty, což vede k uvolnění dříve vázaných prvků, zejména dusíku, fosforu a draslíku do kapalné fáze. V důsledku toho dosahují koncentrace živin v kalové vodě výrazně vyšších hodnot než v surové odpadní vodě přiváděné na čistírnu (Švehla et al. 2026, Witek-Krowiak et al. 2022). Zatímco koncentrace fosforu v běžné odpadní vodě se pohybují přibližně v rozmezí 4–15 mg/l, v kalové vodě běžně dosahují stovek mg/l. U amoniakálního dusíku se pak jedná o koncentrace v řádu stovek až tisíců mg/l (Meena 2025; Švehla et al. 2026). Švehla et al. (2026) uvádějí, že experimentální měření na městské čistírně odpadních vod prokázala hodnoty pH okolo 8,0, koncentraci fosforu 134 mg/l a celkového dusíku 643 mg/l.

V polovině 20. století došlo k prudkému nárůstu znečištění vod fosforem, což mělo vážné důsledky pro lidské zdraví, ekosystémy i ekonomiku. Tento alarmující stav vedl k zavádění sofistikovanějších metod čištění, včetně sekundárního stupně pro snížení biochemické spotřeb kyslíku a terciálního čištění zaměřeného specificky na odstranění fosforu (Carrillo et al. 2024). Tradiční způsob nakládání s kalovou vodou, spočívající v jejím vracení zpět na začátek čistírenského procesu, je z dnešního pohledu problematický. Vysoké zatížení živinami totiž může negativně ovlivňovat účinnost biologického čištění a komplikovat dodržení požadovaných odtokových parametrů. Z tohoto důvodu se stále více prosazuje koncept odděleného čištění kalové vody, který umožňuje nejen snížení zatížení hlavní linky čistírny, ale také efektivní využití obsažených živin (Švehla et al. 2026, Abdoli et al. 2024).

Kalová voda je zároveň považována za významný sekundární zdroj fosforu vhodný pro výrobu alternativních hnojiv (Švehla et al. 2026). Fosfor lze z této vody získávat například chemickým srážením nebo krystalizací, nejčastěji ve formě struvitu či fosforečnanů vápenatých (Witek-Krowiak et al. 2022; Abdoli et al. 2024).

Experimentální výsledky dále ukazují, že vhodně zvoleným chemickým srážením lze z kalové vody odstranit více než 90 % fosforu, přičemž výsledný produkt představuje pouze přibližně 1,5 % původního objemu upravované vody (Švehla et al. 2026). Takto získaná hnojiva se vyznačují vysokou agronomickou účinností a nízkým obsahem rizikových prvků, což z nich činí bezpečnou a udržitelnou alternativu k tradičním minerálním hnojivům vyráběných z neobnovitelných fosfátových zdrojů (Švehla et al. 2026, Witek-Krowiak et al. 2022).

4 Metodika

4.1 Vlastnosti hnojiva z kalové vody

Pro vegetační testy byla využita kalová voda produkovaná v objektu městské ČOV. V rámci výroby použitého hnojiva bylo zpracováno 297 l kalové vody, přičemž bylo získáno 4,5 l výsledného produktu. Za účelem produkce hnojiva byl aplikován následující postup jeho přípravy: úprava pH pomocí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na hodnotu 8,5, koagulace s dávkováním MgSO_4 v délce 1 min (přídavek 2,14 molárního přebytku Mg vůči P), 15minutová flokulace, 15minutová separace sraženiny prostou sedimentací, po které byla slita veškerá odsazená voda, závěrečné gravitační zahuštění s postupným sléváním odsazené vody. V produktu zpracování kalové vody byly provedeny prvkové analýzy s důrazem na obsah základních živin, resp. makroprvků.

Za obsah rostlinám okamžitě dostupných prvků byl považován obsah zjištěný v kapalně frakci dané suspenze (v zásadě výluh materiálu ve vodě).

Obsah potenciálně přístupných prvků byl stanoven výluhem v 0,2 mol/l kyselině octové, kdy byl zvolen poměr 1:10 (hmotnost:objem) a doba třepání po dobu 60 min. Poté byl vzorek odstředěn po dobu 5 min. při 5 000 g a následovala analýza supernatantu prostřednictvím optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

Celkový obsah P, K, Ca, Mg a S byl stanoven extrakcí lučavkou královskou ($\text{HCl}:\text{HNO}_3$ – 3:1), konkrétně modifikovanou metodou ISO: 11466 (1995). Modifikace spočívala ve využití vysokotlakého mikrovlnného rozkladu, pozdějšího odpaření vzorků pomocí topné desky (150 °C) a následném kvantitativním převedení destilovanou vodou do skleněné zkumavky o konečném objemu 25 ml. Následovalo měření přístrojem ICP-OES.

Celkový i okamžitě přístupný dusík byl stanoven dle Klejdahla – extrakce koncentrovanou kyselinou sírovou za přítomnosti katalyzátoru (síran měďnatý, síran draselný a selen) po dobu jedné hodiny při 400 °C. Poté byl přístrojem Gerhard VapoDest dusík destilován, jímán v roztoku kyseliny borité a stanoven titračně na základě změn pH. Charakteristika vzniklého hnojiva je uvedena v tabulce 5.

Tabulka 5: Obsah makroprvků v hnojivu (mg/l); podíl sušiny 14,2 %

Prvek	N	P	K	Ca	Mg	S
Celkový obsah	3180	8690	246	42900	6060	523
Okamžitě dostupný	347	5,56	157	111	20,4	304
Potenciálně dostupný	-	703	90,6	11000	2960	110

Nádobové pokusy se špenátem byly založeny ve skleníku Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU v Praze. Celkem byly testovány 3 půdy z různých půdně klimatických podmínek (Hartvíkov, Humpolec a Suchdol). Obsah vybraných přístupných makroprvků stanovených metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984) je uveden v tabulce 6. Analýza proběhla u daných zemín smíchaných s pískem v poměru 2:1 (zemina:písek).

Tabluka 6: Vstupní rozborů zemin smíchaných s pískem – průměrný obsah přístupných živin (metoda Mehlich 3, hodnoty v mg/kg)

	P	K	Ca	Mg	S
Humpolec, 49°33'23"N,14°58'39"E	59,0	67,7	674	63,7	8,81
Směrodat. odch.	3,79	9,10	43,0	6,29	0,74
Hartvíkov, 49°27'12"N 14°51'30"E	40,7	113,3	794	51,0	6,83
Směrodat. odch.	2,42	27,56	102	7,92	0,04
Suchdol, 50°7'40"N,14°22'33"E	81,8	95,5	3112	104	7,07
Směrodat. odch.	0,95	7,86	174,23	4,75	0,59

Do 0,6 litrových plastových nádob bylo naváženo vždy 600 g směsi (400 g zeminy a 200 g křemičitého písku, vše proseté sítím s velikostí otvorů 2 mm). Vegetační pokus byl založen dne 29.5.2025 zamícháním NPK a hnojiva z kalové vody do substrátu. Poté byla zaseta 4 semena špenátu na nádobu. Rostliny vzešly pouze v substrátu ze stanoviště Humpolec. Zde byly po 14 dnech ponechány 2 rostliny na nádobu a dopěstovány do sklizně. Pro zbývající nádoby byly nové rostliny předpěstovány v běžném substrátu od 17.6. do 8.7. Poté byly rostliny přesazeny do testovaných substrátů (Hartvíkov, Suchdol) v počtu jedné rostliny na nádobu. Pokusy se zeminou z Humpolce byly sklizeny 15.7. a pokusy se zeminami ze Suchdola a Hartvíkova 8.8. Všechny varianty byly realizovány ve 4 opakováních. V tabulce 7. jsou uvedeny jednotlivé varianty hnojení a příslušné dávky hlavních živin. Dusík byl do varianty minerální NPK aplikován ve formě NH_4NO_3 , fosfor v KH_2PO_4 a draslík v KCl . Dávky N, P a K byly k této variantě zvoleny tak, aby odpovídaly dávkám aplikovaných hnojivem z kalové vody.

Tabulka 7: Schéma hnojení pokusu s dávkami hlavních živin v g na nádobu (600 g substrátu)

Varianta	N	P	K
Kontrola (kon)	0	0	0
Minerální NPK (NPK)	0,05	0,01	0,05
Hnojivo z kalové vody (KV)	0,05	0,01	0,05

4.2 Rozbory substrátů

Vzorky substrátů byly odebrány v den sklizně pokusů, usušeny a přesety přes síto s velikostí ok 2 mm. Obsah přístupného P, K, Ca a Mg byl stanoven metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Stručně: extrakční roztok složený z CH_3COOH ($c=0,2 \text{ mol/l}$), NH_4F ($c=0,015 \text{ mol/l}$), HNO_3 ($c=0,013 \text{ mol/l}$), NH_4NO_3 ($c=0,25 \text{ mol/l}$) a ethylendiamintetraoctové kyseliny (EDTA) ($c=0,001 \text{ mol/l}$) byl smíchán se vzorkem v poměru 1:10 (3 g substrátu, 30 ml vyluhovadla). Třepání probíhalo po dobu 5 min. Suspenze byla následně zfiltrována. Ve filtrátu byl měřen obsah přístupných makro- a mikroprvků pomocí ICP-OES.

4.3 Rozbory rostlin

Rostliny byly v den sklizně ušříženy těsně nad substrátem a zváženy na obsah čerstvé hmoty. Poté byly usušeny a následně byl stanoven obsah sušiny. Po namletí na velikostní frakci 1 mm a analyzovány následovně: Bylo naváženo 0,5 g ($\pm 0,005\text{g}$) namletého rostlinného materiálu. Ten byl převeden do roztoku rozkladem na mokré cestě s pomocí mikrovlnné digesce (Ethos 1; MLS GmbH, Švýcarsko) v prostředí kyseliny dusičné a peroxidu vodíku. Získaný vzorek byl poté kvantitativně převeden do roztoku (finální objem 50 ml). V roztoku byl následně měřen obsah sledovaných prvků přístrojem ICP-OES. V některých případech nebylo množství rostlinného materiálu dostačující pro uvedenou analýzu, a proto byly vytvořeny směsné vzorky z opakování 1 a 2, resp. 3 a 4.

4.4 Statistická analýza

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky vypočtené v programu Microsoft Excel a pokročilé statistické vyhodnocení ANOVA, Tukey test při hladině významnosti $p<0,05$ bylo realizováno prostřednictvím programu Statistica 14.

5 Výsledky

Tato část diplomové práce se zaměřuje na hodnocení výnosových parametrů špenátu na třech stanovištích: Humpolec, Hartvíkov a Suchdol (grafy 1., 2., 3.) a kapitoly 5.1.1., 5.2.1. a 5.3.1. Na každém stanovišti jsou porovnávány 3 varianty: nehnojená kontrola (kon), minerální NPK (NPK) a hnojivo vyrobené z kalové vody (KV). Výnos byl hodnocen na základě produkce suché biomasy a pro doplnění bylo sledováno i procento sušiny.

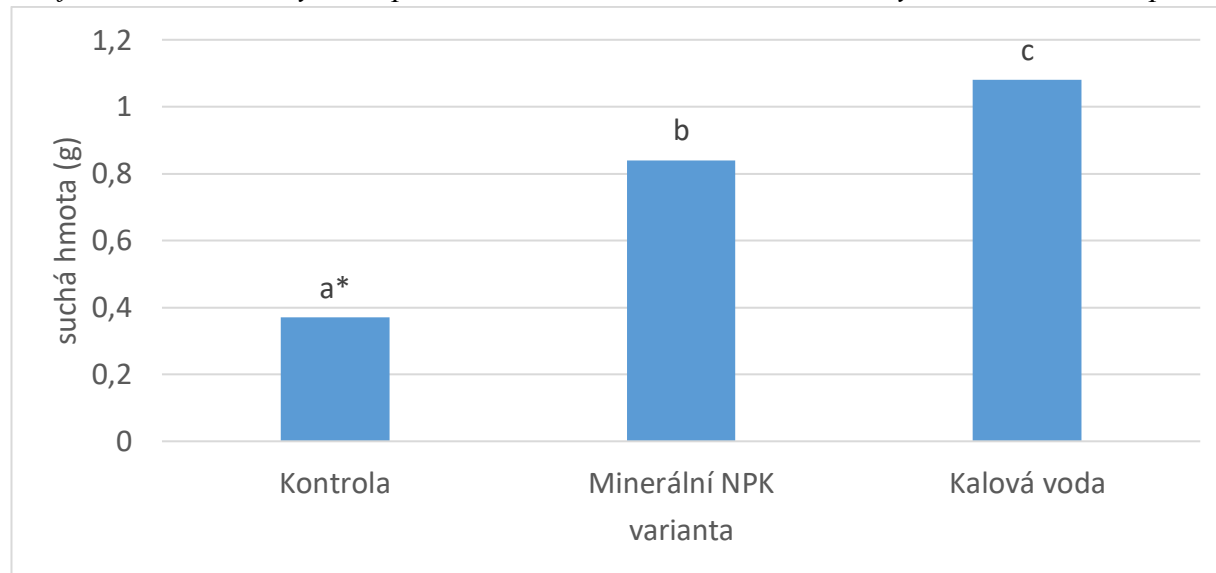
Kapitola se také zabývá vyhodnocením nového hnojiva vzniklého z kalové vody jako potenciálního zdroje makroprvků pro špenát. Dále jsou hodnoceny obsahy makroprvků (P, K, Ca, Mg a S) v půdě, jejich koncentrace v rostlinách a odběr těchto prvků rostlinami špenátu. Tyto výsledky jsou pro jednotlivá stanoviště shrnuty v souhrnných tabulkách č. 8, 9 a 10.

5.1 Humpolec

5.1.1 Hodnocení výnosových parametrů špenátu

V grafu č. 1 je znázorněn výnos špenátu na základě obsahu suché biomasy (g). Nejnižší produkce suché biomasy byla zaznamenána u kontrolní varianty (0,37 g). Aplikace minerálního hnojiva (NPK) vedla k výraznému zvýšení výnosu (0,84 g), přičemž nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u varianty s aplikací kalové vody (KV), kde bylo naměřeno 1,08 g. Mezi jednotlivými variantami byly zjištěny statisticky významné rozdíly. Z hlediska výnosu se tedy kalová voda jeví jako nejefektivnější varianta.

Graf č. 1: Hodnocení výnosu špenátu na základě obsahu suché biomasy na stanovišti Humpolec



* Rozdílná písmena znamenají statisticky významné rozdíly mezi variantami (Tukey test; $p < 0,05$)

Obsah sušiny byl nejvyšší u kontrolní varianty (17,1 %) a nižší u hnojených variant (13,7 % u NPK a 15,7 % u KV), což může souviset s vyšším obsahem vody v rostlinách s vyšší produkcí biomasy.

5.1.2 Obsahy sledovaných makroprvků v půdě

Obsahy makroprvků v půdě ze stanoviště Humpolec jsou znázorněny v souhrnné Tabulce č. 8. Je patrné, že se obsah přístupných makroprvků v půdě mezi jednotlivými variantami lišil v závislosti na aplikovaném hnojení. Nejvyšší obsah fosforu byl zjištěn u varianty s kalovou vodou (73,2 mg/kg), zatímco nejnižší u kontrolní varianty (63,4 mg/kg), přičemž u nehnojené kontroly a varianty NPK v porovnání s KV byl zaznamenán statisticky významný rozdíl. U draslíku dosahovala nejvyšších hodnot varianta NPK (68,4 mg/kg), zatímco mezi kontrolou (59,1 mg/kg) a kalovou vodou (61,7 mg/kg) byly rozdíly méně výrazné. Obsah vápníku byl nejvyšší u varianty KV (734 mg/kg) a nejnižší u varianty NPK (569 mg/kg). Statisticky významný rozdíl byl zjištěn v případě porovnání KV varianty s nehnojenou kontrolou a NPK. U hořčíku byla nejvyšší hodnota zaznamenána u kontrolní varianty (56,7 mg/kg), srovnatelná s variantou KV (51,0 mg/kg), zatímco nejnižší byla u NPK (36,1 mg/kg). Statisticky významné rozdíly byly pozorovány u obsahu síry. Nejvyšší hodnoty vykazovala kontrolní varianta (9,32 mg/kg), poté KV (8,22 mg/kg) a nejnižší varianta s NPK (7,50 mg/kg).

5.1.3 Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách

Obsahy makroprvků v rostlinách vykazovaly odlišné trendy než půdní zásoba. Nejvyšší koncentrace fosforu byla zjištěna u kontrolní varianty (5 947 mg/kg), kde byl i zaznamenán statisticky významný rozdíl oproti hnojeným variantám. Varianta NPK měla nejnižší koncentraci (3 804 mg/kg) a KV vychází uprostřed (4 464 mg/kg). Podobný trend se statisticky významným rozdílem byl zaznamenán i u draslíku, kde kontrola dosáhla nejvyšší hodnoty (50 955 mg/kg) a kalová voda nejnižší (45 137 mg/kg). Obsah vápníku byl také nejvyšší u kontrolní varianty (25 359 mg/kg) a postupně klesal u NPK (22 412 mg/kg) a kalové vody (18 908 mg/kg), přičemž mezi kontrolní variantou a KV byl zaznamenán statisticky významný rozdíl. Naopak u hořčíku byl zaznamenán opačný trend. Nejvyšší obsah byl u varianty s kalovou vodou (12 278 mg/kg), následovaný NPK (10 637 mg/kg) a nejnižší hodnoty byly u kontroly (7 758 mg/kg). Mezi kontrolou a hnojenými variantami byl zjištěn statisticky významný rozdíl. Obsah síry byl nejvyšší u kontrolní varianty (3 042) a nejnižší u varianty s NPK (1 814 mg/kg), přičemž kalová voda dosahovala středních hodnot (2 160 mg/kg). Statisticky významné rozdíly byly též zaznamenány u hnojených variant v porovnání s nehnojenou kontrolou.

5.1.4 Odběry sledovaných makroprvků rostlinami

Odběr makroprvků rostlinami byl ve většině případů nejvyšší u varianty s kalovou vodou. U fosforu byl nejvyšší odběr a zároveň statisticky významný rozdíl zaznamenán u kalové vody (4,84 mg), následované NPK (3,42 mg) a kontrolou (2,23 mg).

Podobný trend byl pozorován i u draslíku, kde kalová voda vykazovala nejvyšší odběr (48,8 mg), následovaná NPK (42,3 mg) a kontrolou (19,1 mg). Mezi hnojenými variantami a kontrolou byl zaznamenán statisticky významný rozdíl. U vápníku byly hodnoty u hnojených variant srovnatelné (20,4 mg u KV a 20,2 mg u NPK), zatímco kontrola vykazovala průkazně nižší hodnotu (9,50 mg). U hořčíku byly v porovnání všech variant zjištěny statisticky významné rozdíly. Nejvyšší odběr byl zaznamenán u kalové vody (13,2 mg), následované NPK

(9,57 mg) a kontrolou (2,91 mg). Stejný trend byl zaznamenán i u síry, kde kalová voda vykazovala nejvyšší odběr (2,35 mg), střední odběr měla varianta NPK (1,63 mg) a nejnižší kontrola (1,14 mg).

Tabulka 8: Souhrnná tabulka pro stanoviště Humpolec – výnosové parametry, obsah makroprvků (P, K, Ca, Mg a S) v půdě, rostlinách a jejich odběr rostlinami.

HUMPOLEC		varianta		
		Kontrola	Minerální NPK	Kalová voda
Obsah v půdě (mg/kg)	P	63,4 ^{a*}	66,4 ^a	73,2 ^b
	K	59,1 ^a	68,4 ^b	61,7 ^{ab}
	Ca	624 ^a	569 ^a	734 ^b
	Mg	56,7 ^a	36,1 ^b	51,0 ^a
	S	9,32 ^c	7,50 ^a	8,22 ^b
Obsah v rostlinách (mg/kg)	P	5 947 ^b	3 804 ^a	4 464 ^a
	K	50 955 ^b	47 031 ^{ab}	45 137 ^a
	Ca	25 359 ^b	22 412 ^{ab}	18 908 ^a
	Mg	7 758 ^b	10 637 ^a	12 278 ^a
	S	3 042 ^b	1 814 ^a	2 160 ^a
Odběr rostlinami (mg)	P	2,23 ^a	3,42 ^{ab}	4,84 ^b
	K	19,1 ^b	42,3 ^a	48,8 ^a
	Ca	9,50 ^b	20,2 ^a	20,4 ^a
	Mg	2,91 ^a	9,57 ^b	13,2 ^c
	S	1,14 ^a	1,63 ^a	2,35 ^a

* Rozdílná písmena znamenají statisticky významné rozdíly mezi variantami v rámci sledovaného parametru (Tukey test; $p < 0,05$)

5.1.5 Krátké shrnutí pro stanoviště Humpolec

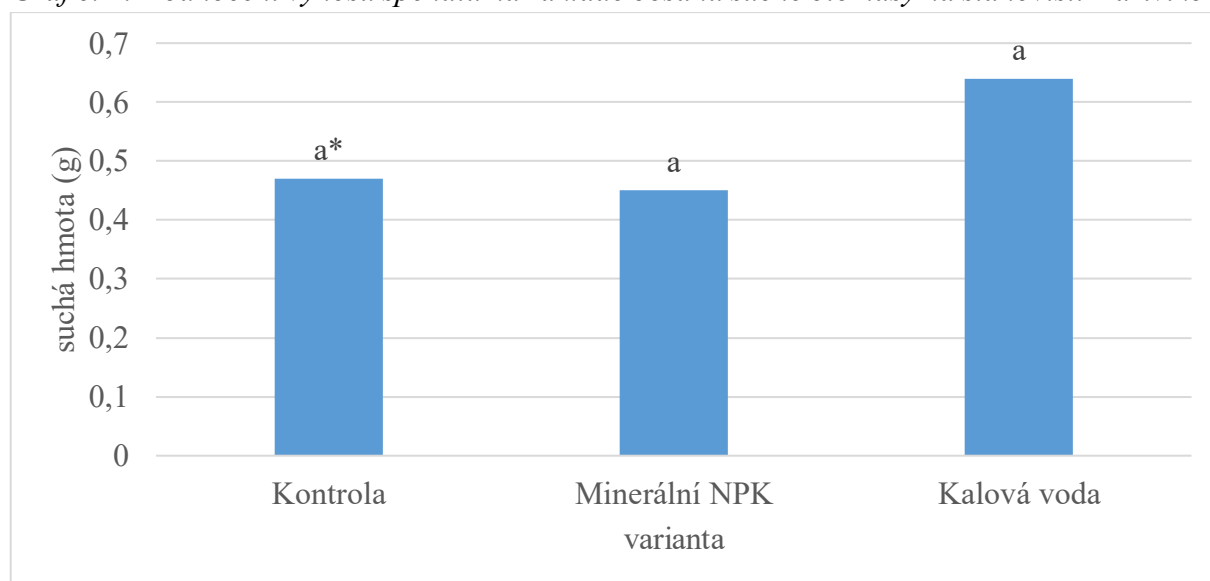
Celkově se ukazuje, že aplikace kalové vody vedla ve většině případů k nejvyššímu odběru makroprvků rostlinami, což souvisí i s vyšší produkcí biomasy. Rovněž obsahy prvků v půdě byly u této varianty často vyšší. Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách byly u varianty KV naopak zpravidla nejnižší. To bylo pravděpodobně způsobeno tzv. zřed'ovacím efektem, kdy hnojené rostliny vytvoří více biomasy a tím se sníží podíl odebraných prvků.

5.2 Hartvíkov

5.2.1 Hodnocení výnosových parametrů špenátu

Dle souhrnné tabulky č. 9 lze konstatovat, že na stanovišti Hartvíkov nebyly mezi variantami zjištěny statisticky významné rozdíly v produkci suché biomasy, přesto však byla nejvyšší hodnota zaznamenána u varianty kalová voda (0,64 g), zatímco kontrola (0,47 g) a varianta s NPK (0,45 g) dosahovaly nižších hodnot. Obsah suché biomasy je přehledně znázorněn v Grafu č. 2.

Graf č. 2: Hodnocení výnosu špenátu na základě obsahu suché biomasy na stanovišti Hartvíkov



* Rozdílná písmena znamenají statisticky významné rozdíly mezi variantami (Tukey test; $p < 0,05$)

Obsah sušiny byl nejnižší u varianty s kalovou vodou (10,3 %) a nejvyšší u varianty s NPK (13,3 %), přičemž kontrola vykazovala střední hodnotu (12,3 %).

5.2.2 Obsahy sledovaných makroprvků v půdě

Obsahy makroprvků v půdě ze stanoviště Hartvíkov jsou znázorněny v souhrnné Tabulce č. 9. Obsah fosforu v půdě vykazoval statisticky významný nárůst mezi jednotlivými variantami. Nejnižší hodnota byla zjištěna u kontrolní varianty (34,4 mg/kg), vyšší u varianty NPK (38,3 mg/kg) a nejvyšší u varianty s kalovou vodou (40,0 mg/kg). U draslíku byla situace odlišná. Nejvyšší obsah byl zaznamenán u varianty s NPK (107 mg/kg), která se statisticky významně lišila od kontrolní varianty (60,7 mg/kg). Varianta s kalovou vodou (75,3 mg/kg) dosahovala středních hodnot. Obsah vápníku byl nejnižší u kontroly (519 mg/kg) a postupně narůstal u varianty s NPK (555 mg/kg) až po kalovou vodu (603 mg/kg), přičemž rozdíl mezi kontrolou a kalovou vodou byl statisticky významný. U hořčíku nebyly mezi variantami zjištěny statisticky významné rozdíly, přesto byl patrný mírný nárůst hodnot patrný od kontroly (38,8 mg/kg), přes NPK (45,7 mg/kg), po kalovou vodu (49,8 mg/kg). Obsah síry se mezi variantami statisticky významně nelišil. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u variant s NPK

(7,13 mg/kg), zatímco kontrola (6,07 mg/kg) a kalová voda (6,51 mg/kg) vykazovaly nižší, avšak statisticky srovnatelné hodnoty.

5.2.3 Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách

Obsah fosforu v rostlinách se mezi variantami statisticky významně nelišil. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u varianty s kalovou vodou (2 595 mg/kg), zatímco kontrola (2 489 mg/kg) a NPK (2 251 mg/kg) dosahovaly mírně nižších hodnot. U draslíku byl zaznamenán nárůst obsahu v závislosti na hnojení. Nejnižší koncentrace byla u kontrolní varianty (56 284 mg/kg), vyšší u NPK (70 454 mg/kg) a nejvyšší u kalové vody (74 577 mg/kg), přičemž rozdíl mezi kontrolou a kalovou vodou byl statisticky významný. Obsah vápníku se mezi variantami statisticky významně nelišil. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty NPK (18 926 mg/kg). Kontrola (14 188 mg/kg) a kalová voda (14 798 mg/kg) vykazovaly nižší hodnoty. U hořčíku nebyly rovněž zjištěny statisticky významné rozdíly. Nejvyšší obsah byl zaznamenán u kontrolní varianty (12 966 mg/kg), zatímco NPK (9 563 mg/kg) a KV (10 868 mg/kg) vykazovaly nižší hodnoty. Obsah síry byl statisticky významně vyšší u kontroly (3 804 mg/kg) ve srovnání s oběma hnojenými variantami (2 868 u NPK a 2 841 mg/kg z KV).

5.2.4 Odběry sledovaných makroprvků rostlinami

Odběr fosforu byl nejnižší u varianty s NPK (0,53 mg), zatímco kontrola (1,37 mg) a zejména kalová voda (1,67 mg) dosahovaly vyšších hodnot. Rozdíl mezi variantou NPK a kalovou vodou byl statisticky významný. U draslíku byl odběr výrazně ovlivněn variantou hnojení. Nejnižší hodnota byla zaznamenána u NPK (16,3 mg), zatímco kontrola (3,60 mg) vykazovala střední hodnoty a kalová voda dosahovala nejvyššího odběru (48,2 mg), přičemž rozdíl mezi NPK a kalovou vodou byl statisticky významný. Odběr vápníku se mezi variantami statisticky významně nelišil, přesto byl nejvyšší u kalové vody (9,55 mg), následovaný kontrolou (7,68 mg) a nejnižší u NPK (4,42 mg). U hořčíku byl odběr statisticky významně nižší u varianty s NPK (2,26 mg) ve srovnání s kontrolou (7,03 mg) a kalovou vodou (7,04 mg), které dosahovaly srovnatelných hodnot. Odběr síry byl také nejnižší u NPK (0,68 mg), zatímco kontrola (2,08 mg) a kalová voda (1,83 mg) vykazovaly vyšší hodnoty, přičemž rozdíl mezi NPK a nehnojenou kontrolou s kalovou vodou byl statisticky významný.

Tabulka 9: Souhrnná tabulka pro stanoviště Hartvíkov – obsah makroprvků (P, K, Ca, Mg a S) v půdě, rostlinách a jejich odběr rostlinami.

HARTVÍKOV		varianta		
		Kontrola	Minerální NPK	Kalová voda
Obsah v půdě (mg/kg)	P	34,4 ^{a*}	38,3 ^b	40,0 ^c
	K	60,7 ^a	107 ^b	75,3 ^{ab}
	Ca	519 ^a	555 ^{ab}	603 ^b
	Mg	38,8 ^a	45,7 ^a	49,8 ^a
	S	6,07 ^a	7,13 ^a	6,51 ^a
Obsah v rostlinách (mg/kg)	P	2 489 ^a	2 251 ^a	2 595 ^a
	K	56 284 ^a	70 454 ^{ab}	74 577 ^b
	Ca	14 188 ^a	18 926 ^a	14 798 ^a
	Mg	12 966 ^a	9 563 ^a	10 868 ^a
	S	3 804 ^b	2 868 ^a	2 841 ^a
Odběr rostlinami (mg)	P	1,37 ^{ab}	0,53 ^a	1,67 ^b
	K	30,6 ^{ab}	16,3 ^a	48,2 ^b
	Ca	7,68 ^a	4,42 ^a	9,55 ^a
	Mg	7,03 ^a	2,26 ^b	7,04 ^a
	S	2,08 ^a	0,68 ^b	1,83 ^a

* Rozdílná písmena znamenají statisticky významné rozdíly mezi variantami (Tukey test; $p < 0,05$)

5.2.5 Krátké shrnutí pro stanoviště Hartvíkov

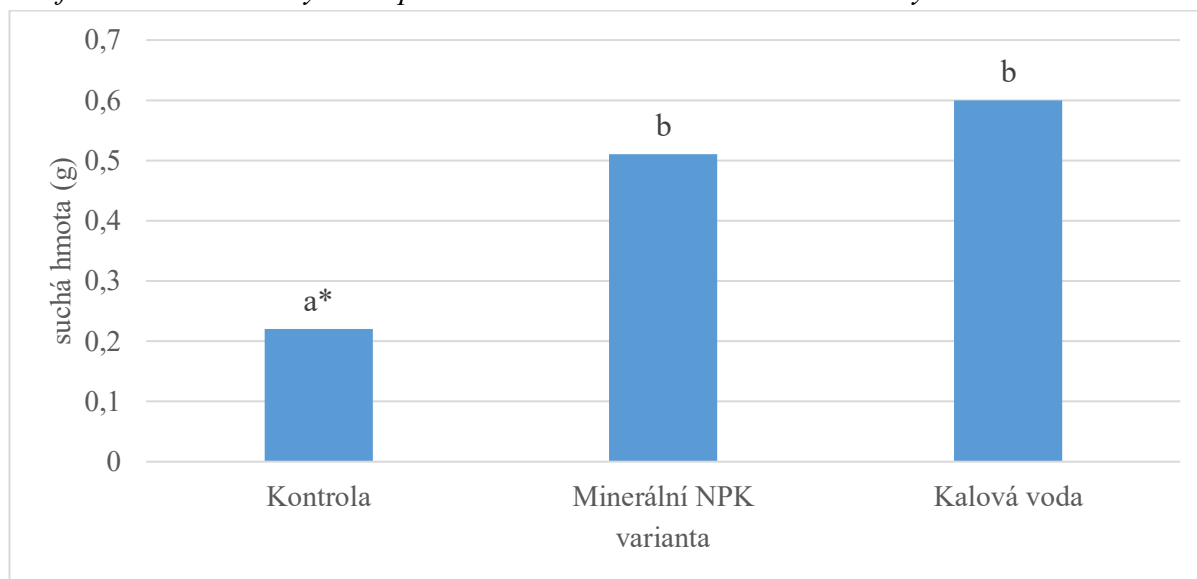
V lokalitě Hartvíkov vedla aplikace kalové vody k nejvyšší produkci suché biomasy a současně k nejvyššímu odběru většiny sledovaných makroprvků, zejména fosforu a draslíku. Minerální hnojení se projevilo především zvýšením obsahu K v půdě, ale nevedlo k odpovídajícímu zvýšení jeho odběru rostlinami. Obsahy makroprvků v rostlinách nebyly vždy nejvyšší u hnojených variant. Celkově se jako nejefektivnější varianta z hlediska výnosu i využití živin jeví aplikace kalové vody.

5.3 Suchdol

5.3.1 Hodnocení výnosových parametrů špenátu

V lokalitě Suchdol byla nejnižší produkce suché biomasy zjištěna u kontrolní varianty, kdy činila jen 0,22 g. Aplikace hnojiva NPK i kalové vody vedla ke zvýšení výnosů a statisticky významným rozdílům oproti nehnojené kontrole. Varianta s NPK dosahovala výnosu 0,51 g a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u varianty s kalovou vodou (0,60 g). Obsah suché biomasy je přehledně znázorněn v Grafu č. 3.

Graf č. 3: Hodnocení výnosu špenátu na základě obsahu suché biomasy na stanovišti Suchdol



* Rozdílná písmena znamenají statisticky významné rozdíly mezi variantami (Tukey test; $p < 0,05$)

Procento sušiny bylo nejvyšší u kontrolní varianty (17,2 %) a nižší u hnojených variant (12,8 % u NK a 14,4 % u KV), což opět naznačuje vyšší obsah vody u intenzivněji rostoucích rostlin.

5.3.2 Obsahy sledovaných makroprvků v půdě

Obsahy makroprvků v půdě ze stanoviště Suchdol jsou uvedeny v souhrnné Tabulce č. 10. Obsah fosforu v půdě byl mezi variantami vyrovnaný a statisticky se nelišil. Hodnoty se pohybovaly v úzkém rozmezí 100–102 mg/kg. Podobná situace byla zaznamenána i u draslíku, kde se obsah pohyboval mezi 98,0–112 mg/kg bez statisticky významných rozdílů mezi variantami. U vápníku byl zaznamenán rozdíl mezi variantami. Nejvyšší obsah byl zjištěn u varianty s kalovou vodou (3 244 mg/kg), která se statisticky významně lišila od varianty NPK (2 962 mg/kg). Kontrolní varianta (2 978 mg/kg) dosahovala středních hodnot. Obsah hořčíku se mezi variantami statisticky významně nelišil, i když byl patrný mírný nárůst od kontroly (93,2 mg/kg), přes NPK (97,2 mg/kg), až po kalovou vodu (108 mg/kg). U síry byl zaznamenán nárůst obsahu v závislosti na hnojení. Nejnižší hodnota byla u kontrolní varianty (4,94 mg/kg), vyšší u NPK (5,47 mg/kg) a nejvyšší u KV (6,02 mg/kg), přičemž rozdíl mezi kontrolou a KV byl statisticky významný.

5.3.3 Obsahy sledovaných makroprvků v rostlinách

Obsah fosforu v rostlinách byl statisticky významně vyšší u kontrolní varianty (6 770 mg/kg) ve srovnání s oběma hnojenými variantami (3 671 mg/kg u NPK a 3 933 mg/kg u KV). Podobný trend byl pozorován i u draslíku, kde kontrola dosahovala nejvyšší koncentrace (38 189 mg/kg), zatímco hnojené varianty vykazovaly vyšší hodnoty (52 698 mg/kg u NPK a 48 403 mg/kg u KV). Rozdíly mezi kontrolou a hnojenými variantami byly statisticky významné. Obsah vápníku byl rovněž statisticky významně vyšší u hnojených variant (25 461

mg/kg u NPK a 24 904 mg/kg u KV) ve srovnání s kontrolou (18 685 mg/kg). U hořčíku nebyly mezi variantami zjištěny statisticky významné rozdíly. Nejnižší koncentraci Mg však měla nehnojená kontrola (8 909 mg/kg) oproti hnojeným variantám (11 181 mg/kg u NPK a 11 263 u KV). Obsah síry byl statisticky významně vyšší u kontrolní varianty (4 161 mg/kg) ve srovnání s oběma hnojenými variantami (2 471 mg/kg u NPK a 2 617 mg/kg u KV).

5.3.4 Odběry sledovaných makroprvků rostlinami

Odběr fosforu se mezi variantami statisticky významně nelišil, přesto byl nejvyšší u varianty s kalovou vodou (2,20 mg), následované NPK (1,56 mg) a kontrolou (1,42 mg). U draslíku byl nejnižší odběr zaznamenán u kontrolní varianty (8,1 mg), zatímco NPK (22,2 mg) a kalová voda (27,1 mg) vykazovaly vyšší hodnoty, avšak bez statisticky významných rozdílů. Odběr vápníku byl nejvyšší u varianty s kalovou vodou (14,0 mg), následované NPK (10,7 mg) a kontrolou (3,91 mg), přičemž rozdíly mezi variantami nebyly statisticky průkazné. U hořčíku byl zaznamenán nárůst odběru od kontroly (1,88 mg), přes NPK (4,86 mg), až po kalovou vodou (6,35 mg), bez statisticky významných rozdílů. Odběr síry byl nejnižší u kontrolní varianty (0,89 mg) a nejvyšší u kalové vody (1,46 mg), přičemž ani zde nebyly zajištěny statisticky významné rozdíly.

Tabulka 10: Souhrnná tabulka pro stanoviště Suchdol – obsah makroprvků (P, K, Ca, Mg a S) v půdě, rostlinách a jejich odběr rostlinami.

SUCHDOL		varianta		
		Kontrola	Minerální NPK	Kalová voda
Obsah v půdě (mg/kg)	P	100 ^{a*}	101 ^a	102 ^a
	K	98,0 ^a	104 ^a	112 ^a
	Ca	2978 ^{ab}	2962 ^a	3244 ^b
	Mg	93,2 ^a	97,2 ^a	108 ^a
	S	4,94 ^a	5,47 ^{ab}	6,02 ^b
Obsah v rostlinách (mg/kg)	P	6 770 ^b	3 671 ^a	3 933 ^a
	K	38 189 ^b	52 698 ^a	48 403 ^a
	Ca	18 685 ^b	25 461 ^a	24 904 ^a
	Mg	8 909 ^a	11 181 ^a	11 263 ^a
	S	4 161 ^b	2 471 ^a	2 617 ^a
Odběr rostlinami (mg)	P	1,42 ^a	1,56 ^a	2,20 ^a
	K	8,1 ^a	22,2 ^a	27,1 ^a
	Ca	3,91 ^a	10,7 ^a	14,0 ^a
	Mg	1,88 ^a	4,86 ^a	6,35 ^a
	S	0,89 ^a	1,03 ^a	1,46 ^a

* Rozdílná písmena znamenají statisticky významné rozdíly mezi variantami (Tukey test; $p < 0,05$)

5.3.5 Krátké shrnutí pro stanoviště Suchdol

Na stanovišti Suchdol vedla aplikace hnojiv k výraznému zvýšení výnosu ve srovnání s kontrolní variantou, přičemž nejvyšší hodnoty byly pozorovány u kalové vody. Obsahy makroprvků v půdě byly mezi variantami převážně vyrovnané, s výjimkou vápníku a síry, kde byl patrný pozitivní vliv hnojení. Koncentrace makroprvků v rostlinách byly v některých případech vyšší u kontrolní varianty. Odběr živin rostlinami byl obecně vyšší u hnojených variant, zejména u kalové vody, což souvisí s vyšším výnosem. Celkově se tak i v této lokalitě jeví aplikace kalové vody jako efektivní z hlediska produkce biomasy i využití živin.

5.4 Celkové shrnutí

Při porovnání jednotlivých stanovišť (Humpolec, Hartvíkov a Suchdol) byly zjištěny rozdíly jak v produkci biomasy, tak v obsahu a odběru makroprvků, což ukazuje na význam stanovištních podmínek pro účinnost aplikovaných hnojiv.

Z hlediska výnosu (suché biomasy) byl ve všech lokalitách pozorován shodný trend, kdy aplikace kalové vody vedla k nejvyšším hodnotám. Nejvýznamnější rozdíly mezi variantami byly zaznamenány v lokalitě Humpolec a Suchdol, kde byly rozdíly mezi kontrolou a hnojenými variantami statisticky významné. Obsah sušiny se mezi lokalitami i variantami lišil méně výrazně. Obecně však bylo patrné, že vyšší výnosy byly často spojeny s nižším obsahem sušiny.

Obsahy makroprvků v půdě byly do značné míry ovlivněny typem hnojení. Jejich variabilita mezi jednotlivými lokalitami naznačuje význam půdních vlastností daných stanovišť. Například na stanovišti Suchdol byly patrně vyšší zásoby některých prvků (zejména Ca a Mg). Reakce jednotlivých prvků na způsob hnojení se lišila – zatímco fosfor a vápník často vykazovaly nárůst hodnot při aplikaci kalové vody, draslík byl výrazně ovlivněn minerálním hnojením.

Obsahy makroprvků v rostlinách nevykazovaly jednotný trend mezi lokalitami. V některých případech byly vyšší koncentrace zjištěny u kontrolních variant, zejména u fosforu a síry. Odběr makroprvků rostlinami však vykazoval konzistentnější trend napříč lokalitami. Většinou byl odběr nejvyšší u variant s aplikací kalové vody, což souvisí i s vyšší produkcí biomasy (nejvýrazněji to lze pozorovat u draslíku a fosforu). Aplikace NPK ne vždy vedla k nejvyššímu odběru živin, a to i přes zvýšení jejich obsahu v půdě.

Celkově lze shrnout, že účinnost jednotlivých variant hnojení byla ovlivněna nejen typem aplikovaného hnojiva, ale také specifickými podmínkami jednotlivých stanovišť, které určují přístupnost živin a reakci rostlin na hnojení. Samotné trendy mezi variantami byly do určité míry podobné, ale intenzita těchto změn se mezi lokalitami často lišila.

6 Diskuze

V rámci této práce byl hodnocen vliv nového hnojiva vzniklého z kalové vody na výnos špenátu, na obsah vybraných makroprvků v půdě, v rostlinách a odběr sledovaných makroprvků rostlinami. Hodnocení bylo provedeno formou nádobového pokusu s půdami odebranými ze tří rozdílných lokalit: Humpolec, Hartvíkov a Suchdol. Účinnost hnojiva byla porovnávána s kontrolní variantou a minerálním hnojením NPK. V rámci experimentu byly sledovány parametry výnosu, obsah makroprvků v půdě a rostlinách a jejich celkový odběr rostlinami.

6.1 Vliv aplikace hnojiva z kalové vody na výnos a produkci sušiny

Výsledky vegetačních pokusů potvrdily, že hnojivo vyrobené z kalové vody (KV) vykazuje vysokou agronomickou účinnost, která je v mnoha ohledech srovnatelná nebo dokonce vyšší než u konvenčních minerálních hnojiv.

V této diplomové práci v rámci experimentu se špenátem vedla aplikace KV k nejvyšší produkci suché biomasy na všech sledovaných stanovištích. Konkrétně na stanovišti Humpolec dosáhla varianta KV výnosu 1,08 g sušiny, což představovalo statisticky významný nárůst oproti minerálnímu NPK (0,84 g) i nehnojené kontrole (0,37 g). Podobný pozitivní trend byl zaznamenán i na stanovišti Suchdol, kde KV varianta s výnosem 0,60 g průkazně překonala kontrolu (0,22 g).

Pozitivní vliv hnojiv na bázi kalů a kalových vod je v souladu se zjištěními Švehla et al. (2026), kteří v nádobovém pokusu s kukuřicí naměřili u varianty KV3 výnos 42 g sušiny na nádobu, zatímco srovnatelná minerální kontrola dosáhla pouze 34 g. Rovněž Rodrigues et al. (2024) uvádějí, že čistírenský kal díky rychlé mineralizaci a uvolňování živin zajistil u salátu vyšší výnos suché hmoty (10,8–12,4 g) než běžný statkový hnůj (8,50 g). Vysoký hnojivý potenciál těchto materiálů spočívá v jejich schopnosti rychle uvolňovat živiny do půdního roztoku, přičemž svým charakterem představují přechod mezi minerálními a tradičními organickými hnojivy.

Autoři Eid et al. (2017) se ve svém výzkumu rovněž zaměřili na špenát a při optimální dávce hnojiva zaznamenali přibližně trojnásobné zvýšení celkové biomasy oproti kontrolní variantě. Obdobný efekt byl pozorován i v této práci, konkrétně na lokalitě Humpolec, kde též došlo k přibližně trojnásobnému navýšení produkce sušiny oproti nehnojené kontrole.

Vysokou agronomickou účinnost hnojiv na bázi kalů u špenátu potvrzují také Majaula et al. (2022), kteří ve své studii zaznamenali zvýšení výnosu biomasy o 53–63 % při aplikaci čistírenských kalů na méně úrodných půdách. Autoři zároveň uvádějí, že organické materiály na bázi kalů mohou mít v některých případech výraznější pozitivní vliv na produkci biomasy než minerální hnojení. Tento trend byl potvrzen i v rámci této práce, zejména v lokalitě Humpolec, kde varianta s aplikací kalové vody dosáhla o 28 % vyššího výnosu ve srovnání s variantou NPK. Významným poznatkem uvedené studie je rovněž potvrzení zásadního vlivu stanovištních podmínek na účinnost aplikovaného hnojiva. Autoři uvádějí, že na půdách s nižší přirozenou úrodností byla zaznamenána výrazně pozitivní reakce rostlin na aplikaci kalů, zatímco u úrodnějších půd s vyšším obsahem jílovitých částic byl efekt hnojení omezený. To rovněž odpovídá výsledkům této diplomové práce, kdy v lokalitě Hartvíkov nebyly mezi

jednotlivými variantami zjištěny statisticky významné rozdíly v produkci sušiny, zatímco v lokalitách Humpolec a Suchdol byl vliv hnojení na výnos výraznější.

Pozitivní vliv hnojiva z kalové vody na výnos špenátu pozorovaný v praktické části této diplomové práce je v souladu s dlouhodobými poznatky o využívání čistírenských kalů v zemědělské praxi. Například souhrnná studie Sugurbekova et al. (2023) uvádí, že dlouhodobé polní pokusy prováděné ve Švédsku od roku 1981 prokázaly při pravidelné aplikaci čistírenských kalů na zemědělskou půdu průměrné zvýšení výnosu plodin přibližně o 7 %.

Zajímavým aspektem je vliv hnojení na procento sušiny v čerstvé hmotě. V rámci experimentální části této diplomové práce byl u KV varianty často zaznamenán nižší podíl sušiny (např. 15,7 % v Humpolci) ve srovnání s nehnojenou kontrolou (17,1 %). Tento jev, kdy rostliny s vyšší produkcí biomasy vykazují vyšší obsah vody v pletivech, je vysvětlen intenzivním růstem a vyšší hydratací pletiv při nadbytku dostupných živin. Potvrzuje to i studie Huang et al. (2022), která uvádí, že rostliny pěstované v hydroponii nebo v prostředí s vysokou dostupností živin mají tendenci k rozvoji mohutnějšího kořenového systému a vyšší absorpci vody, což vede k nižšímu podílu sušiny než u rostlin v půdě.

K obdobným závěrům došli i Eid et al. (2017), kteří u hnojeného špenátu zaznamenali vyšší hydrataci pletiv související s intenzivnější tvorbou biomasy. Rostliny hnojené hnojivem vyrobeným z kalové vody tak vykazovaly zvýšenou schopnost přijímat vodu, což se následně projevilo nižším obsahem sušiny ve srovnání s rostlinami pěstovanými v nehnojené půdě.

Navzdory celkově pozitivnímu vlivu je nutné zohlednit také možná rizika spojená s vysokou koncentrací aplikovaných živin. Zatímco nízké a střední koncentrace růst stimulují, nadměrná koncentrace živin a solí může vést k fyziologickým poruchám, narušení vodního režimu rostlin a v krajních případech vést až k jejich úhynu (Huang et al. 2022). Například Giménez et al. (2021) zaznamenali u špenátu při aplikaci některých kompostových extraktů dokonce pokles výnosu, který autoři přisuzují zejména vysoké salinitě nebo zvýšenému obsahu potenciálně problematických prvků, jako je sodík a chloridy. Stejně tak Pan et al. (2022) uvádějí, že nadměrná aplikace dusíku může u okurek negativně ovlivnit růst listů v raných fázích růstu a urychlit proces senescence v pozdějším období. V rámci této diplomové práce však nebyly podobné negativní procesy zaznamenány, což naznačuje, že použitá dávka kalové vody byla pro pěstování špenátu vhodně nastavena a poskytla rostlinám dostatečnou výživu bez známek fytotoxického působení.

6.2 Vyhodnocení hnojiva z kalové vody jako zdroje makroprvků pro špenát

Analýza nového hnojiva vyrobeného z kalové vody (KV) potvrdila, že se jedná o bohatý zdroj vybraných makroživin, zejména fosforu, vápníku a hořčíku. Vysoký obsah Ca (42 900 mg/l) a Mg (6 060 mg/l) v použitém hnojivu je přímým důsledkem technologického postupu jeho výroby, kdy byla kalová voda srážena pomocí Ca(OH)_2 a MgSO_4 , což se projevilo v půdní zásobě na všech stanovištích. Vyvážený přísun makroživin (N, P, K) doplněný o Ca dle studie od Aamur et al. (2025) výrazně zvyšuje výnos špenátu, což přímo podporuje výsledky této práce, kde varianta KV překonala NPK. Jedním z vysvětlení je již zmíněná skutečnost, že je hnojivo vyrobené z kalové vody díky technologii srážení přirozeně bohaté na vápník a hořčík.

Například v Humpolci byl u varianty KV naměřen statisticky nejvyšší obsah přístupného Ca (734 mg/kg) i P (73,2 mg/kg) v porovnání s kontrolou a NPK. Ačkoliv byla koncentrace P v pletivech špenátu u varianty KV často nižší než u hnojené kontroly, celkový odběr fosforu rostlinou byl u KV nejvyšší na všech stanovištích.

Nárůst obsahu Ca v půdě i rostlinných pletivech po aplikaci kalových materiálů uvádějí také Rodrigues et al. (2024), kteří tento jev spojují s využitím vápenatých derivátů při dezinfekci kalů, jež mohou přispívat ke zlepšení výživy rostlin vápníkem. Švehla et al. (2026) potvrzují, že proces srážení umožňuje převést do výsledného suspenzního hnojiva více než 90 % fosforu obsaženého v původní vodě, což může vysvětlovat i jeho zvýšenou zásobu zaznamenanou v rámci této diplomové práce.

Pozitivní vliv kalových produktů na odběr fosforu potvrzují také Swain et al. (2020), kteří u špenátu zaznamenali až 1,84násobně vyšší příjem fosforu oproti minerálnímu hnojení. Obdobný trend byl pozorován i v této práci, kde byl odběr P u varianty KV nejvyšší na všech stanovištích. Tento efekt lze spojit se zvýšenou zásobou přístupného P v půdě, která byla v lokalitě Humpolec u varianty s KV nejvyšší (73,2 mg/kg).

V lokalitě Humpolec byl u varianty s aplikací kalové vody zaznamenán celkový odběr Mg rostlinami ve výši 13,2 mg, což představovalo více než čtyřnásobné zvýšení oproti kontrolní variantě (2,91 mg). Tento výsledek je v souladu se závěry Aher (2021), který uvádí, že organické materiály (konkrétně vermikomposty) významně zvyšují dostupnost Ca a Mg v půdě a podporují jejich následný příjem rostlinami. Význam dostatečné výživy hořčíkem dále zdůrazňují Zafar et al. (2020), podle nichž je Mg pro špenát klíčovým prvkem, jelikož tvoří centrální součást molekuly chlorofylu. Autoři zároveň uvádějí, že produkty na bázi kalů mohou stimulovat syntézu chlorofylu a tím pozitivně ovlivňovat fotosyntetickou aktivitu rostlin.

V případě draslíku a síry se naopak projevily určité limity použitého hnojiva, které zaznamenali také Švehla et al. (2026). Tito autoři uvádějí, že draslík a síra se během srážecích procesů do výsledného produktu převádějí pouze omezeně, přičemž značná část těchto prvků zůstává v odpadní vodě. Tento trend byl potvrzen i v rámci experimentální části této diplomové práce, kdy v lokalitách Humpolec i Hartvíkov vykazovala varianta s NPK vyšší obsah přístupného draslíku v půdě než varianta s KV. Zafar et al. (2020) přímo uvádějí, že koncentrace K zůstává aplikací kalů téměř neovlivněna, protože kaly jsou na draslík přirozeně chudé. Také Rodrigues et al. (2024) zaznamenali, že chlévský hnůj obsahuje ve srovnání s čistírenskými kaly výrazně vyšší množství draslíku, což potvrzuje obecně nižší zastoupení tohoto prvku v kalových materiálech. Tento poznatek odpovídá i výsledkům této práce, kde byla u varianty s kalovou vodou zaznamenána nižší zásoba přístupného draslíku v půdě než u NPK (například na stanovišti Hartvíkov 75,3 mg/kg oproti 107 mg/kg). Ale i přes nižší zásobu v půdě byl celkový odběr K rostlinami u KV varianty často nejvyšší (v Humpolci 48,8 mg u KV oproti 42,3 mg u NPK). Obdobný jev popsali také Swain et al. (2020), kteří u špenátu zaznamenali zvýšení odběru draslíku o 32,9 % oproti minerálnímu hnojení. Autoři tento efekt vysvětlují tím, že produkty z kalů mohou díky celkovému zlepšení půdního prostředí podporovat intenzivnější příjem živin rostlinami, a tím částečně kompenzovat nižší koncentraci jednotlivých prvků v samotném hnojivu.

Pozitivní vztah mezi aplikací kalových produktů a zvýšením půdní zásoby makroživin potvrzují také Kumar et al. (2016), kteří u špenátu zaznamenali silnou korelaci mezi dávkou aplikovaného hnojiva a dostupností prvků P, K, Ca, Mg a S v půdě. Autoři dále uvádějí, že

dosažení optimálního výnosu je úzce spjato s vysokým odběrem N, P a K, což odpovídá i výsledkům této práce. Zároveň zdůrazňují význam hořčíku a železa pro syntézu chlorofylu a celkovou vitalitu, což může souviset i s nejvyšším odběrem Mg zaznamenaného u varianty s KV v tomto experimentu.

7 Závěr

Prvním cílem práce bylo zhodnotit vliv hnojiva vyrobeného z kalové vody na výnosové parametry špenátu. Výsledky prokázaly, že toto hnojivo vykazuje výrazný pozitivní účinek na produkci biomasy. Na všech sledovaných stanovištích dosáhla varianta s aplikací kalové vody nejvyšších hodnot suché biomasy. Nejvýraznější nárůst byl zaznamenán na stanovišti Humpolec, kde výnos varianty s kalovou vodou (1,08 g) statisticky významně převýšil nejen nehnojenou kontrolu (0,37 g), ale také variantu NPK (0,84 g). Obdobně tomu bylo i na stanovišti Suchdol, kde varianta s kalovou vodou (0,60 g) statisticky významně překonala kontrolní variantu. Tím byla potvrzena první hypotéza, která předpokládala dosažení srovnatelných nebo vyšších výnosů při aplikaci hnojiva vyrobeného z kalové vody ve srovnání s minerálním hnojením NPK.

Druhým cílem práce bylo vyhodnotit hnojiv z kalové vody jak zdroj makroprvků pro špenát. Z hlediska půdní zásoby se účinek KV projevil nejvýrazněji u vápníku a fosforu. Konkrétně na stanovišti Humpolec byla u varianty KV naměřena statisticky nejvyšší zásoba přístupného vápníku (734 mg/kg) i fosforu (73,2 mg/kg), přičemž tato varianta průkazně překonala variantu NPK. Obdobně tomu bylo i na stanovišti Suchdol, kde varianta KV u vápníku dosáhla hodnoty 3 244 mg/kg, což bylo statisticky více než u NPK (2 962 mg/kg). V Hartvíkově byl zaznamenán obdobný trend u fosforu, kde varianta KV (40,0 mg/kg) statisticky významně převýšila jak NPK, tak i kontrolní variantu. U hořčíku byl v půdě zaznamenán mírný nárůst na stanovištích Hartvíkov a Suchdol, přesto však nebyl tento efekt ve všech případech statisticky průkazný.

V rámci rostlinných analýz byl zjištěn významný rozdíl mezi koncentrací prvků v sušině a jejich celkovým odběrem rostlinami. V rostlinách byl často patrný tzv. zředovací efekt, kdy rostliny hnojené KV vykazovaly nižší koncentrace P, K i Ca v pletivech oproti kontrolní variantě. Tento jev byl však kompenzován vyšší tvorbou biomasy, díky níž byl celkový odběr živin u varianty KV napříč lokalitami zpravidla nejvyšší. Statisticky nejvyšší odběr hořčíku byl potvrzen v Humpolci, kde rostliny u varianty KV přijaly 13,2 mg Mg oproti 9,57 mg u NPK. Obdobně u fosforu dosáhl odběr v této lokalitě u varianty KV hodnoty 4,84 mg, což bylo průkazně více než u NPK.

V případě draslíku a síry výsledky půdních rozborů potvrdily omezenou schopnost KV dodávat tyto prvky v dostatečném množství jejich přístupné formy. V Humpolci i Hartvíkově byla u NPK zaznamenána vyšší zásoba přístupného K než u varianty KV. U síry byla v Humpolci nejvyšší koncentrace naměřena u nehnojené kontroly (9,32 mg/kg), což může naznačovat intenzivnější využití tohoto prvku rostlinami na hnojených variantách. Přesto byl díky vyššímu výnosu u varianty KV zaznamenán v některých případech nejvyšší celkový odběr živin, například u draslíku v Humpolci (48,8 mg).

Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že stanovené cíle práce byly splněny. Hnojivo vyrobené z kalové vody představuje zejména efektivní zdroj fosforu, vápníku a hořčíku a jeho aplikace podporuje vysoké využití živin rostlinami špenátu. Pro dosažení optimální vyváženosti, se však jako vhodné může jevit doplnění tohoto hnojiva o další zdroj draslíku.

8 Literatura

Aamur GR, Miano TF, Chachar M, Majeedano MI, Tunio MR, Jiskani SS, Ullah R, Chachar ZA. 2025. Effect of Macronutrient Levels on Growth and Development of Spinach (*Spinacia oleracea* L.). Integrative Plant Biotechnology **3**:231–239. ISSN: 3007-2735.

Abdoli S, Lajayer BA, Denghanian Z, Bagheri N, Vafaei AH, Chamani M, Rani S, Lin Z, Shu W, Price GW. 2024. A Review of the Efficiency of Phosphorus Removal and Recovery from Wastewater by Physiochemical and Biological Processes: Challenges and Opportunities. Water **16**:2507.

Ackland B, Dylejko K, Green W, Buchler M. 2025. 200 Years On: Sir Humphry Davy and Cathodic Protection. Corrosion **81**:425–431.

Aher SB. 2021. Effect of organic and inorganic sources for amelioration of soil properties and yield of spinach in sewage water irrigated soils. Soil Science and Agricultural Chemistry.

Ahmed HK, Fawy HA, Abdel-Hady ES. 2010. Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil. Agriculture and Biology Journal of North America **1**:1044–1049.

Ahmed N, Zhang B, Bozdar B, Chachar S, Rai M, Li J, Li Y, Hayat F, Chachar Z, Tu P. 2023. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. Front. Plant Sci. **14**:1285512.

Arrohas M, Meneses R, Gusmão AG, de Silva JM, Correia CM, Rodrigues MA. 2024. Nitrogen-Rich Sewage Sludge Mineralized Quickly, Improving Lettuce Nutrition and Yield, with Reduced Risk of Heavy Metal Contamination of Soil and Plant Tissues. Agronomy **14**:924.

Awasthi P, Shrivastava S, Kharkwal AC, Varma A. 2015. Biofuel from agricultural waste: A review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences **4**:470–477.

Balík J, Kulháněk M, Černý J, Vaněk V. 2008. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Balkrishna A, Kaushik P, Singh S, Agrahari P, Kumar B, Kumar P, Arya VP. 2025. Potential use of sewage sludge as fertilizer in organic farming. Cleaner Waste Systems **10**:100245.

Barlóg P. 2023. Improving Fertilizer Use Efficiency – Methods and Strategies for the Future. Plants **12**:3658.

Bayındır Ü, Küçükyumuk Z. 2025. The Effect of Potassium on Plant Nutrient Concentration, Plant Development, and Rhizoctonia Rot (*Rhizoctonia solani*) in Pepper. Horticulturae **11**:516.

- Bhardwaj S, Kapoor B, Kapoor D, Thakur U, Dolma Y, Raza A. 2025. Manifold roles of potassium in mediating drought tolerance in plants and its underlying mechanisms. *Plant Science* **351**:112337
- Brezak-Mazur E, Stoińska R. 2013. The importance of phosphorus in the environment – review article. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, Polsko.
- Canali S, Diacono M, Ciaccia C, Masetti O, Tittarelli F, Montemurro F. 2014. Alternative strategies for nitrogen fertilization of overwinter processing spinach (*Spinacia oleracea* L.) in Southern Italy. *European Journal of Agronomy* **54**:47–53. ISSN 1161-0301.
- Carrillo V, Castillo R, Magrí A, Holzapfel E, Vidal G. 2024. Phosphorus recovery from domestic wastewater: A review of the institutional framework. *Journal of Environmental Management* **351**:119812.
- Case SDC, Oelofse M, Hou Y, Oenema O, Jensen LS. 2017. Farmer perceptions and use of organic waste products as fertilisers – A survey study of potential benefits and barriers. *Agricultural Systems* **151**:84–95.
- Cerozi BS, Fitzsimmons K. 2016. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technology* **219**:778–781.
- Cesaro A, Belgiorno V, Guida M. 2015. Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. *Resources, Conservation and Recycling* **94**:72–79.
- Ciceri D, Manning DAC, Allanore A. 2015. Historical and technical developments of potassium resources. *Science of The Total Environment* **502**:590–601.
- Corbridge DEC. 2013. *Phosphorus: chemistry, biochemistry and technology*. CRC Press, Florida.
- Cordell D; White S. 2011. Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. *Sustainability* **3**(10):2027–2049.
- Cornel P, Schaum C. 2009. Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. *Water Science and Technology* **59**:1069–1076.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Čásová K, Nedvěd V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant Soil and Environment* **56**:28–36.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Vašák F, Vaněk V. 2014. Využití kalů z čistíren odpadních vod. Česká zemědělská univerzita v Praze. Available from: <https://katedry.czu.cz/storage/214/0052b866-vyuziti-kalu-z-cistiren-odpadnich-vod.pdf> (accessed: March 2026).

Černý J, Kulháněk M, Vašák F, Shejbalová Š. 2012. Hořčík, často opomíjený prvek ve výživě. Zemědělec, Profi Press.

Černý J, Kulháněk M, Vašák F, Shejbalová Š. 2012. Nově o změnách obsahu síry v půdě. Zemědělec, Profi Press.

Černý J. 2021. Proč je vápník pro rostliny důležitý? Agromanual.cz Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/proc-je-vapnik-pro-rostliny-dulezity> (Accessed: February 2026).

Český statistický úřad, Vodovody, kanalizace a vodní toky – 2024, Kaly v roce 2024, Praha. Available from: <https://csu.gov.cz/docs/107508/6dcd7411-1c6e-ffe0-274e-d7cf9c2149d5/2800212510.pdf?version=1.1> (accessed: March 2026).

Český statistický úřad. 2026. Osevní plochy zemědělských plodin k 31.5.. Český statistický úřad, Praha. Available from https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&z=T&f=TABULKA&skupId=346&katalog=30840&pvo=ZEM02A&pvo=ZEM02A&evo=v2472_!_ZEM02A-2025T_1#w= (accessed February 2026).

Daly K, Styles D, Lalor S, Wall DP. 2015. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. European Journal of Soil Science **66**(4):792–801.

De Kok LJ, Castro A, Durenkamp M, Stuiver CEE, Westerman S, Yang L, Stulen I. 2002. Sulphur in Plant Physiology. Sulphur Fertilizers: Demand Production and Use (pp. 1–26).

Dorozhkin SV. 2013. A detailed history of calcium orthophosphates from 1770s till 1950. Materials Science and Engineering: C **33**:3085–3110.

Eid EM, El-Bebany AF, Alrumman SA, Hesham AEL, Taher MA, Fawy KF. 2017. Effect of different sewage sludge applications on heavy metal accumulation, growth and yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). International Journal of Phytoremediation **19**(4): 340–347.

Elia A, Santamaria P, Serio F. 1998. Nitrogen nutrition, yield and quality of spinach. J. Sci. Food Agric., **76**:341–346.

Elmi A, Al-Khaldy A, AlOlayan M. 2020. Sewage sludge land application: balancing act between agronomic benefits and environmental concerns. Journal of Celaner Production **250**:119512.

Evropská komise. 2023 Commission Staff Working Document: Evaluation of Council Directive 86/278/EEC on the use of sewage sludge in agriculture, Brusel. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2023:157:FIN> (accessed: March 2026).

Farzadfar S, Knight JD, Congreves KA. 2021. Soil organic nitrogen: an overlooked but potentially significant contribution to crop nutrition. Plant Soil **462**:7–23.

Ferreira LS, Oliveira VS, Marchiori JJP, Ferreira TC, Bernabé ACB, Boone GTF, Pereira LLS, Carrico E. 2023. The Nutrient Magnesium in Soil and Plant: A Review. *International Journal of Plant & Soil Science* **35**:136–144.

Geisseler D, Horwath WR, Joergensen RG, Ludwig B. 2010. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – A review. *Soil Biology and Biochemistry* **42**:2058–2067.

George RAT. 1985. *Vegetable Seed Production*. MPG Books Group, Bodmin. ISBN: 978-1-84593-521-4.

Ghani A, McLaren RG, Swift RS. 1992. Sulphur mineralization and transformations in soils as influenced by additions of carbon, nitrogen and sulphur. *Soil Biology and Biochemistry* **24**:331–341.

Giménez A, Gómez PA, Bustamante MÁ, Pérez-Murcia MD, Martínez-Sabater E, Ros M, Pascual JA, Egea-Gilabert C, Fernández JA. 2021. Effect of Compost Extract Addition to Different Types of Fertilizers on Quality at Harvest and Shelf Life of Spinach. *Agronomy* **11**:632.

Gomiero T. 2016. Soil Degradation, Land Scarcity and Food Security: Reviewing a Complex Challenge. *Sustainability* **8**:281.

Gransee A, Fuhrs H. 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil* **368**:5–21.

Grusak MA. 2001. Plant Macro- and Micronutrient Minerals. *Encyclopedia of Life Sciences*, Nature Publishing Group.

Grzebisz W. 2011. Magnesium-food and human health. *Journal of elementology* **16**.

Gülüt KY, Şentürk GG. 2024. Impact of nitrogen fertilizer type and application rate on growth, nitrate accumulation, and postharvest quality of spinach. *PeerJ* **12**:e17726

Han Y, White PJ, Cheng L. 2022. Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants. *Annals of Botany* **129**(3):247–258.

Haque F, Fan C, Lee Y. 2023. From waste to value: Addressing the relevance of waste recovery to agricultural sector in line with circular economy. *Journal of Cleaner Production* **415**:137873.

Hauer-Jákli M, Tränkner M. 2019. Critical Leaf Magnesium Thresholds and the Impact of Magnesium on Plant Growth and Photo-Oxidative Defense: A Systematic Review and Meta-Analysis From 70 Years of Research. *Front. Plant Sci.* **10**:766.

Havukainen J, Nguyen MT, Hermann L, Horttanainen M, Mikkilä M, Deviatkin I, Linnanen L. 2016. Potential of phosphorus recovery from sewage sludge and manure ash by thermochemical treatment. *Waste Management* **49**:221–229.

Holford ICT. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research* **35**:227–240.

Huang X, Chen Z, Liu Z, Xue J, Chen Y, Wang Q, Wang C. 2022. The Optimal Planting Coverage Rate and Wastewater Concentration for Water Spinach Floating Bed on Geese Wastewater Purification. *Pol. J. Environ. Stud.* **31**:691–700.

Chaudhry AH, Nayab S, Hussain SB, Ali M, Pan Z. 2021. Current Understandings on Magnesium Deficiency and Future Outlooks for Sustainable Agriculture. *International Journal of Molecular Sciences* **22**:1819.

Chen ZC, Peng WT, Li J, Liao H. 2018. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Seminars in Cell & Developmental Biology* **74**:142–152.

Ishfaq M, Wang Y, Yan M, Wang Z, Wu L, Li C, Li Y. 2022. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Front. Plant Sci.* **13**.

ISO 11466:1995. 1995. International Organization for Standardization. Soil quality -extraction of trace elements soluble in aqua regia. Available online: <https://www.iso.org/standard/19418.html>

Ivanič J, Havelka B, Knop K. 1984. *Výživa a hnojení rostlin. Příroda*, Bratislava.

James FAJL. 2025. New Sources for Reconstructing the Discovery of Potassium and Sodium: Manuscripts and Letters relating to their Electrical Detection, Isolation, Naming Announcement, and Publication by Humphry Davy. *Ambix* **72**:143–172.

Jin ZM, Wang CH, Liu ZP, Gong WJ. 2007. Physiological and ecological characters studies on Aloe vera under soil salinity and seawater irrigation. *Process Biochemistry* **42**:710–714.

Jing T, Li J, He Y, Shankar A, Saxena A, Tiwari A, Maturi KC, Solanki MK, Singh V, Eissa MA, Ding Z, Xie J, Awasthi. 2024. Role of calcium nutrition in plant Physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions – A comprehensive review. *Plant Physiology and Biochemistry* **210**, 108602.

Kacprzak M, Neczaj E, Fijałkowski K, Grobelak A, Grosser A, Worwag M, Rorat A, Brattebo H, Almås Å, Singh BR. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research* **156**:39–46.

Kertesz MA, Mirleau P. 2004. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. *Journal of Experimental Botany* **55**:1939–1945.

- Kominko H, Gorazda K, Wzorek Z. 2022. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Journal of Environmental Management* **305**:114417.
- Kowalski Z, Makara A, Kulczycka J, Generowicz A, Kwasnicki P, Ciula J, Gronba-Chyla A. 2024. Conversion of Sewage Sludge into Biofuels via Different Pathways and Their Use in Agriculture: A Comprehensive Review. *Energies* **17**:1383.
- Kumar V, Chopra AK, Srivastava S. 2016. Assessment of Heavy Metals in Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Grown in Sewage Sludge–Amended Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **47**(2): 221–236.
- Kunzová E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.
- Lalitha M, Dhakshinamoorthy M. 2014. Forms of soil potassium – a review. *Agricultural Reviews* **35**:64–68.
- Leghari SJ, Wahocho NA, Laghari GM, Laghari AH, Bhabham GM, Talpur KH. 2016. Role of nitrogen for plant growth and development: a review. *Advances in Environmental Biology* **10**, pp. 209+.
- Leinweber P, Turner BL, Meissner R. 2002. Phosphorus. *Agriculture, hydrology and water quality*, pp. 29–55.
- Liu Y, Ma L, Li Y, Zheng L. 2007. Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge. *Chemosphere* **67**:1025–1032.
- Maftoun M, Moshiri F, Karimian N, Ronaghi AM. 2005. Effects of Two Organic Wastes in Combination with Phosphorus on Growth and Chemical Composition of Spinach and Soil Properties. *Journal of Plant Nutrition*, **27**(9):1635–1651.
- Majaule U, Dikinya O, Glaser B. 2022. Biochar and sewage sludge phosphorus fertilizer effect on phosphorus bioavailability and spinach (*Spinacia oleracea* L.) yields under no-till system in semi-arid soils. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* **11**:527–539.
- Marin E, Rusănescu CO. 2023. Agricultural Use of Urban Sewage Sludge from the Wastewater Station in the Municipality of Alexandria in Romania. *Water* **15**:458.
- Marschner H. 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
- Marzougui N, Ounalli N, Sabbahi S, Fezzani T, Abidi F, Jebari S, Melki S, Berndtsson R, Oueslati W. 2022. How Can Sewage Sludge Use in Sustainable Tunisian Agriculture Be Increased? *Sustainability* **14**:13722.

- Meena J. 2025. Wastewater composition and its treatment process. *International Journal of Chemical Science* **9**:13–16.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **15**:1409–1416.
- Mehmood A, Akhtar MS, Imran M, Rukh S. 2018. Soil apatite loss rate across different parent materials. *Geoderma* **310**:218–229.
- Melichar M. 1997. *Zelinářství. Květ*, Praha. ISBN: 80-85362-29-5.
- Mieldažys R, Jotautienė E, Pocius A, Jasinskas A. 2016. Analysis of organic agricultural waste usage for fertilizer production. *Agronomy Research* **14**:143–149.
- Ministerstvo životního prostředí. 2023. Podklady pro přípravu regionálních strategií a projektů v rámci OPŽP 2021–2027 v oblasti nakládání s kaly z komunálních ČOV: manažerský souhrn [online], Praha. Available from: https://opzp.cz/files/documents/storage/2024/01/30/1706623274_MZP_KALY_manazersky_souhrn.pdf (accessed: March 2026).
- Monib AW, Alimyar O, Mohammad MU, Akhundzada MS. 2023. Macronutrients for Plants Growth and Humans Health. *Journal for Research in Applied Sciences* **2**:268–279. ISSN: 2583-4053.
- Morelock TE, Correll JC. 2008. Spinach, Vegetables I. *Handbook of Plant Breeding*, vol 1. Springer, New York, NY.
- Mouhamad R, Alsaede A, Iqbal M. 2016. Behavior of Potassium in Soil: A mini review. *Chemistry International* **2**:58–69.
- Nadeem F, Hanif MA, Majeed MI, Mushtaq Z. 2018. Role of Macronutrients and Micronutrients in the Growth and Development of Plants and Prevention of Deleterious Plant Diseases – A Comprehensive Review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences* **13**:31–52. ISSN: 2226-9614
- Narayan OP, Kumar P, Yadav B, Dua M, Johri AK. 2022. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior* **18**:2030082.
- O'Brien JA, Vega A, Bouguyon E, Krouk G, Gojon A, Coruzzi G, Gutiérrez RA. 2016. Nitrate Transport, Sensing, and Responses in Plants. *Molecular Plant* **9**:837–856.
- Ohyama T. 2010. Nitrogen as a major essential element of plants. *Plants* **37**:1–17.
- Pan F, Pan S, Tang J, Yuan J, Zhang H, Chen B. 2022. Fertilization Practices: Optimization in Greenhouse Vegetable Cultivation with Different Planting Years. *Sustainability* **14**:7543.

Petříková K, Hlušek J. 2012. Zelenina: pěstování, výživa, ochrana a ekonomika, Profi Press s.r.o, Praha. ISBN: 978-80-86726-50-2.

Petříková K. 2006. Zelenina: pěstování, ekonomika, prodej, Profi Press, s.r.o, Praha. ISBN: 80-86726-20-7.

Pettigrew WT. 2008. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiol. Plantarum* **133**:670–681.

Poláková L. 2026. Hořčík – opomíjený prvek s klíčovým vlivem na výnos i kvalitu. *Farmář č. 2*, Profi Press.

Pradhan P, Fischer G, van Velthuisen H, Reusser DE, Kropp JP. 2015. Closing Yield Gaps: How Sustainable Can We Be? *PLoS ONE* **10**:e0129487.

Prajapati K, Modi HA. 2012. The importance of potassium in plant growth – a review. *Indian Journal of Plant Sciences* **1**:177–186.

Prasad R, Shivay YS. 2020. Calcium as Plant Nutrient. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* **11**:1–3.

Preethi B, Karmegam N, Manikandan S, Vickram S, Subbaiya R, Rajeshkumar S, Gomadurai C, Govarthan M. 2024. Nanotechnology-powered innovations for agricultural and food waste valorization: A critical appraisal in the context of circular economy implementation in developing nations. *Process Safety and Environmental Protection* **184**:477–491.

Rai A, Singh AK, Mishra R, Shahi B, Rai VK, Kumari N, Kumar V, Gangwar A, Sharma RB, Rajput J, Kumari N, Kumar S, Anal AKD, Rai S, Sharma S, Arvind AB, Kumar M, Kumar A, Singh S. 2020. Sulphur in Soils and Plants: An Overview. *International Research Journal and Pure & Applied Chemistry* **21**:66–70.

Rigby H, Clarke BO, Pritchard DL, Meehan B, Beshah F, Smith SR, Porter NA. 2016. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment* **541**:1310–1338.

Richter R. 2004. Draslík. Význam draslíku. Symptomy nedostatku a nadbytku draslíku. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Brno. Available from https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/k.htm (accessed February 2026).

Richter R. 2004. Fosfor. Význam fosforu. Symptomy nedostatku a nadbytku fosforu. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Brno. Available from: https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/psymptomy.htm (accessed February 2026).

Richter R. 2004. Vápník. Význam vápníku. Symptomy nedostatku a nadbytku vápníku. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Brno. Available from https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_k.htm (accessed February 2026).

Richter R. 2007. Živinný režim půd. Draslík v půdě. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Brno. Available from https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_k.htm (accessed February 2026).

Richter R. 2007. Živinný režim půd. Dusík v půdě. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Brno. Available from: https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_n.htm (accessed February 2026).

Richter R. 2007. Živinný režim půd. Fosfor v půdě. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Brno. Available from https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_p.htm (accessed February 2026).

Rodrigues MA, Sawimbo A, da Silva JM, Correia CM. 2024. Sewage Sludge Increased Lettuce Yields by Releasing Valuable Nutrients While Keeping Heavy Metals in Soil and Plants at Levels Well below International Legislative Limits. *Horticulturae* **10**:706.

Rui W, Ma J, Wei N, Thu X, Li Z. 2023. Genome-Wide Analysis of the PHT Gene Family and Its Response to Mycorrhizal Symbiosis in Tomatoes under Phosphate Starvation Conditions. *Int. J. Mol. Sci* **24**(12): 10246.

Ruttenberg KC. 2003. The Global Phosphorus Cycle. *Treatise on Geochemistry* **8**:585–643.

Senbayram M, Gransee A, Wahle V, Thiel H. 2015. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant–soil continuum. *Crop & Pasture Science* **66**:1219–1229.

Shah SH, Islam S, Mohammad F. 2022. Sulphur as a dynamic mineral element for plants: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **22**:2118–2143.

Shen J, Yuan L, Zhang J, Li H, Bai Z, Chen X, Zhang F. 2011. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology* **156**:997–1005.

Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM. 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology* **116**:447–453.

Scherer HW. 2009. Sulfur in soils. *Journal of Plant Nutrition and soil Science* **172**:326–335.

Smatanová M, Richter R, Hlušek J. 2004. Spinach and pepper response to nitrogen and sulphur fertilization. *Plant Soil Environmental* **50**:303–308.

Sorin T, Tanaka Y. 1991. The use of organic matter for vegetable cultivation under a paddy-upland rotation system . 1. Organic and inorganic components of several types of organic matter and the effects of their decomposition products on growth of spinach. Nara Agric. Exp. Sta. Bull **22**:49–55.

Sugurbekova G, Nagyzbekkyzy E, Sarsenova A, Danlybayeva G, Anuarbekova S, Kudaibergenova R, Frochot C, Acherar S, Zhatkanbayev Y, Moldagulova N. 2023. Sewage Sludge Management and Application in the Form of Sustainable Fertilizer. Sustainability **15**:6112.

Sutar RK, Pujar AM, Kumar BNA, Hebsur NS. 2017. Sulphur Nutrition in Maize – A Critical Review. International Journal of Pure & Applied Bioscience **5**:1582–1596.

Swain A, Singh SK, Mohapatra KK, Patra A. 2020. Effect of sewage sludge application on yield, nutrients uptake and nutrient use efficiency of spinach (*Spinacia oleracea* L.). Annals of Plant and Soil Research **22**(3): 305–309.

Szydło ZA. 2023. The extraordinary world of sulphur part 1. Chem Didact Ecol. Metrol **28**:5–38.

Škarpa P, Školníková M, Antošovský J, Richter R. 2020. Síra na list – vhodný doplněk výživy máku. Mendelova univerzita v Brně.

Švehla P, Kulháněk M, Houdková L, Michal P, Chládková H, Ház S, Pečenka M, Kazda V, Růžicková I, Wanner J, Tlustoš P. 2026. Produkce fosforečného hnojiva z kalové vody a vyhodnocení jeho využitelnosti ve výživě rostlin. ČZU v Praze.

Tripathi D, Singh V, Chauhan D, Prasad S, Dubey N. 2014. Role of Macronutrients in Plant Growth and Acclimation: Recent Advances and Future Prospective. In: Ahmad P, Wani M, Azooz M, Phan Tran LS. (eds) Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes. Springer, New York.

Ullah R., Muhmmad N, Chachar M, Rehman NU, Qazi MA. 2024. Effect of nitrogen on foliage of plant which enhance the quality growth and yield of cauliflower (*Brassica oleracea*). Plant Physiology and Soil Chemistry **5**(1): 11–14.

Usman K, Khan S, Ghulam S, Khan MU, Khan N, Khan MA, Khalil SK. 2012. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications. American Journal of Plant Sciences **3**:1708–1721.

Vaca R, Lugo J, Martínez R, Esteller MV, Zavaleta H. 2011. Effect of Sewage Sludge and Sewage Sludge Compost Amendment on Soil Properties and Zea mays L. Plants (Heavy Metals, Quality and Productivity). Revista Internacional de Contaminación Ambiental **27**:303–311.

Vaněk V, Balík J, Černý J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P, Valtera J. 2012. Výživa zahradních rostlin. Academia. Praha. 570 p.

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

Verstraete W, Caveye PV, Diamantis V. 2009. Maximum use of resources present in domestic “used water”. *Bioresource Technology* **100**:5537–5545.

Vico A, Sáez JA, Pérez-Murcia MD, Martínez-Tomé J, Andreu-Rodríguez J, Agulló E, Bustamante MA, Sanz-Cobena A. 2020. Moral, Production of spinach in intensive Mediterranean horticultural systems can be sustained by organic-based fertilizers without yield penalties and with low environmental impacts. *Agricultural Systems* **178**:102765.

Walsh CT. 2020. *The Chemical Biology of Phosphorus*. Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. 2013. The Critical Role of Potassium in Plant Stress Response. *International Journal of Molecular Sciences* **14**:7370–7390.

Wang Q, Li S, Li J, Huang D. 2024. The Utilization and Roles of Nitrogen in Plants. *Forests* **15**(7):1191.

Wanner F. 2019. Studie nakládání s čistírenskými kaly v ČR. Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, Praha. Available from: <https://www.sovak.cz/sites/default/files/2019-11/SOVAK%20%C4%8CR%20Studie%20nakl%C3%A1d%C3%A1n%C3%AD%20s%20%C4%8Dist%C3%ADrensk%C3%BDmi%20kaly%20v%20%C4%8CR%20FINAL.pdf> (accessed: March 2026).

Werner F, de la Haye TR, Spielvogel S, Prietzel J. 2017. Small-scale spatial distribution of phosphorus fractions in soils from silicate parent material with different degree of podzolization. *Geoderma* **302**:52–65.

White PJ, Karley AJ. 2010. Potassium. *Cell Biology of Metals and Nutrients* pp. 199–224.

White PJ. 2001. The pathways of calcium movement to the xylem. *J Exp Bot* **52**:891–899.

Witek-Krowiak A, Gorazda K, Szopa D, Trzaska K, Moustakas K, Chojnacka K. 2022. Phosphorus recovery from wastewater and bio-based waste: an overview. *Bioengineered* **13**(5): 13474–13506.

Yang HQ, Jie YL. 2005. Uptake and Transport of Calcium in Plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* **31**:227–234.

Yang X, Post WM, Thornton PE, Jain A. 2013. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. *Biogeosciences* **10**:2525–2537.

Yaqot M, Menezes BC, Al-Ansari T. 2023. Roadmap to Precision Agriculture Under Circular Economy Constraints. *Journal of Information & Knowledge Management* **22**:2250092.

Zafar S, Farooq S, Qazi HA, Jaweed TH, Kadam AK, Lone FA. 2020. Evaluation of nutrient status of kale and spinach as affected by sewage sludge and mineral fertilizers. *Journal of Plant Nutrition* **45**(17): 2633–2644.

Zenda T, Liu S, Dong A, Duan H. 2021. Revisiting Sulphur – The Once Neglected Nutrient: It's Roles in Plant Growth, Metabolism, Stress Tolerance and Crop Production. *Agriculture* **11**:626.

Zewide I, Melash W. 2021. Review on Macronutrient in Agronomy Crops. *J. Nutrition and Food Processing*, **4**(6).

Zhang H, Qi HY, Zhang YL, Ran DD, Wu LQ, Wang HF, Zeng RJ. 2022. Effect of sewage sludge pretreatment methods on its use in agricultural applications. *Journal of Hazardous Materials* **428**:128213.

Zhang J, Yue Y, Sha Z, Kirumba G, Zhang Y, Bei Z, Cao L. 2014. Spinach-irrigating and fertilizing for optimum quality, quantity, and economy. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, **64**(7): 590–598.

Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* **171**:656–669.