

VLIV MINERÁLNÍ VÝŽIVY NA OBRANNÉ MECHANISMY A TROFICKÉ VZTAHY U OVOCNÝCH ROSTLIN – PŘEHLED

THE INFLUENCE OF MINERAL NUTRITION ON DEFENSE MECHANISMS AND TROPHIC INTERACTIONS IN FRUIT CROPS – A REVIEW

Tomáš Bílek, Aleš Vávra, Jiří Sedlák

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY, s.r.o.
Holovousy 129, 508 01

e-mail: tomas.bilek@vsuo.cz, ORCID: [0000-0002-1559-7079](https://orcid.org/0000-0002-1559-7079)

ABSTRAKT

Minerální výživa ovocných rostlin představuje zásadní faktor ovlivňující nejen výnos a kvalitu plodů, ale také jejich přirozenou obranyschopnost. Dostupnost makro – a mikroprvků, zejména dusíku, draslíku, vápníku, hořčíku a manganu, přímo moduluje primární metabolismus, syntézu sekundárních metabolitů i expresi genů spojených s obranou proti patogenům a herbivorům, zatímco nerovnováha v zásobení živinami zvyšuje náchylnost rostlin k biotickým stresorům. Výživa zároveň významně ovlivňuje složení a funkci mikrobiálních společenstev rhizosféry, která mohou indukovat systémovou rezistenci, a podmiňuje produkci těkavých organických látek regulujících interakce mezi rostlinami, škůdci a jejich přirozenými nepřáteli. Dosavadní poznatky potvrzují, že vyvážené nutriční strategie přizpůsobené druhu, vývojové fázi a stanovištním podmínkám představují klíčový nástroj nejen pro dosažení stabilní produkce ovoce, ale i pro udržitelnou ochranu a ekologickou stabilitu sadů.

Klíčová slova: minerální výživa, obrana rostlin, biotické faktory

ABSTRACT

Mineral nutrition of fruit plants is a key factor influencing not only the yield and quality of the fruit, but also its natural defenses. The availability of macro- and micronutrients, particularly nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and manganese, directly modulates primary metabolism, secondary metabolite synthesis, and the expression of defense-related genes, whereas nutrient imbalances increase plant susceptibility to biotic stressors. Nutrition also shapes the composition and activity of rhizosphere microbial communities, which can induce systemic resistance, and influences the production of volatile organic compounds that regulate interactions among plants, herbivores, and natural enemies. Current evidence highlights that balanced nutritional strategies tailored to species, developmental stage, and site conditions are essential not only for stable fruit production but also for sustainable plant protection and the ecological stability of orchards.

Keywords: mineral nutrition, plant defense, biotic factors

ÚVOD

Minerální výživa je dlouhodobě považována za jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících produktivitu a kvalitu ovocných dřevin. Vedle tradičního pohledu, který se zaměřoval

především na vliv hnojení na růst a výnos, se v posledních desetiletích stále více ukazuje, že výživa rostlin zásadním způsobem ovlivňuje i její interakce s biotickými faktory prostředí (Marschner 2012). Zvláště významné je působení minerálních živin na aktivaci obranných mechanismů proti patogenům a škůdcům a na formování trofických vztahů v agroekosystémech (Fageria, 2009, Huber a Jones 2012).

Ovocné dřeviny, podobně jako jiné vytrvalé kultury, jsou vystaveny kombinovanému tlaku patogenních hub, bakterií, virů a herbivorního hmyzu. Obranné reakce rostlin zahrnují jak konstitutivní bariéry, tak indukovanou imunitní odpověď spojenou se změnami v metabolismu fenolických sloučenin, fytoalexinů či signálních molekul, jako je kyselina jasmonová a salicylová (Pieterse *et al.* 2012). Dostupnost a poměr jednotlivých minerálních prvků mohou tyto procesy zásadním způsobem modulovat – buď přímo prostřednictvím vlivu na biosyntézu metabolitů, nebo nepřímo přes změny fyziologického stavu rostliny (Datnoff *et al.* 2007).

Dusík je nezbytný pro syntézu aminokyselin a bílkovin, avšak jeho nadbytek bývá spojován se zvýšenou náchylností rostlin k patogenům. Nadměrné množství dusíku podporuje tvorbu měkkých, parenchymatických pletiv s omezenou mechanickou podporou a nižší mírou lignifikace, což může vést ke snížené akumulaci fenolických látek a oslabení obranných funkcí rostlin (Walters a Bingham 2007). Naproti tomu draslík posiluje buněčné stěny, reguluje osmotický tlak a zlepšuje odolnost rostlin vůči biotickým i abiotickým stresorům (Wang *et al.* 2013). Vápník je klíčovým regulátorem buněčné signalizace a hraje zásadní roli v přenosu signálů mezi buňkami. Jeho dostatečný obsah přispívá k vyšší integritě buněčných membrán a omezuje šíření infekce (de Freitas a Mitcham 2012). Důležitou roli hraje i mangan, který je kofaktorem enzymů podílejících se na syntéze ligninu, jenž představuje významnou mechanickou bariéru proti patogenům (Marschner 2012).

Vedle přímého vlivu na metabolismus rostlin hraje minerální výživa také zásadní roli v utváření mikrobiálních společenstev v rhizosféře. Vyvážený přísun živin může podporovat symbiotické houby a bakterie, které indukují systémovou rezistenci rostlin (ISR) a přispívají tak k jejich dlouhodobé ochraně (Berendsen *et al.* 2012). Významným mechanismem působení mikrobiálních společenstev je ovlivňování produkce těkavých organických látek (VOCs), které nejen signalizují napadení rostlin, ale také regulují trofické vztahy tím, že přitahují přirozené nepřátele herbivorů (Dicke a Baldwin 2010).

Porozumění vztahu mezi minerální výživou a obrannými mechanismy ovocných rostlin tak otevírá nové možnosti pro podporu udržitelné ochrany sadů. Správně nastavené nutriční strategie mohou omezit potřebu chemických pesticidů a přispět k ekologické stabilitě agroekosystémů (Römheld a Kirkby 2010). Cílem tohoto přehledu je shrnout současné poznatky o vlivu minerální výživy na biochemické a fyziologické mechanismy obrany ovocných rostlin a zároveň poukázat na její roli v trofických interakcích, které zásadně formují dynamiku sadových ekosystémů.

Vliv jednotlivých minerálních prvků na obranné mechanismy ovocných rostlin

Dusík

Dusík (N) představuje jeden z klíčových makroprvků ovlivňujících růst, vývoj a obranné mechanismy ovocných rostlin. Jeho dostupnost zásadně modifikuje vztahy mezi primárním a sekundárním metabolismem, a tím i schopnost rostlin bránit se proti patogenům a herbivorům. Vysoká hladina dusíku obecně podporuje syntézu bílkovin a růst biomasy, avšak často dochází k oslabení alokace zdrojů do obranných drah (Herms a Mattson 1992, Matyssek a Schnyder 2002). Naopak nedostatek dusíku může zvýšit obsah obranných fenolických látek a tříslovin, i když za cenu omezeného růstu (Bryant *et al.* 1983).

Dusík se výrazně podílí na regulaci signálních drah zahrnujících kyselinu jasmonovou (JA) a kyselinu salicylovou (SA), které jsou klíčové pro indukovanou rezistenci rostlin (Mur *et al.* 2016). Přebytek dusíku může vést k posílení obrany vůči biotrofním patogenům prostřednictvím SA-dependentních mechanismů, zatímco obrana vůči nekrotrofním patogenům a hmyzu bývá při nadbytku dusíku oslabena, protože JA-signalizace je v takových podmínkách potlačena (Sun *et al.* 2020).

V ovocných dřevinách se vliv dusíku projevuje jak na úrovni anatomických struktur, tak chemické obrany. U jabloní bylo prokázáno, že vyšší přísun dusíku zvyšuje obsah rozpustných bílkovin, ale zároveň snižuje akumulaci fenolických glykosidů a flavonoidů, které jsou důležité pro odolnost proti padlí jabloňovému (*Podospaera leucotricha*) (Leser a Treutter 2004). Podobně u broskvoní nadměrná výživa dusíkem zvyšuje atraktivitu listů pro mšice, zatímco nízké dávky dusíku vedou k vyšší produkci obranných metabolitů a nižší napadnutelnosti (Sauge *et al.* 2010).

Na fyziologické úrovni hraje dusík roli také v syntéze alkaloidů a kyanogenních glykosidů, které obsahují dusíkový skelet. Změny v dostupnosti dusíku tak přímo ovlivňují jak množství, tak složení obranných sekundárních metabolitů (Züst a Agrawal 2017). Tyto interakce ukazují, že efekt dusíku na obranu není lineární, ale závisí na rovnováze mezi růstem a obranou, ekologickém kontextu a specifické kombinaci stresových faktorů.

Fosfor

Fosfor (P) je klíčovým makroprvkem nezbytným pro energetický metabolismus rostlin, syntézu nukleových kyselin, fosfolipidů a sekundárních metabolitů, které často podmiňují obranné mechanismy rostlin (Raghothama 1999, Vance *et al.* 2003). Dostupnost fosforu ovlivňuje nejen růst a vývoj rostlin, ale i jejich schopnost reagovat na biotické a abiotické stresy.

Výzkumy ukazují, že nízká dostupnost fosforu může stimulovat produkci fenolických sloučenin a dalších sekundárních metabolitů, což zvyšuje odolnost rostlin vůči herbivorům a patogenům (Qu *et al.* 2021). Naproti tomu nadbytek fosforu může u rostlin snížit investice do obrany, protože podporuje růstové procesy na úkor sekundárního metabolismu (Tripathi *et al.* 2022).

Fosfor je také úzce spojen s fosforylačními signálními drahami, které modulují expresi genů podílejících se na obranné reakci rostlin. Například nízký obsah fosforu aktivuje rostliny k produkci signálních molekul, jež posilují imunitní odpověď a zvyšují produkci fenylypropanoidů a ligninu (Tripathi *et al.* 2022, Qu *et al.* 2021).

Kromě přímých účinků na metabolity fosfor ovlivňuje i interakci s půdní mikroflórou. Optimální hladiny fosforu podporují symbiózu s mykorhizními houbami, která může posílit obranné reakce rostlin a modulovat signalizaci jasmonátu a salicylátu (Qu *et al.* 2021). Tím fosfor ovlivňuje nejen samotnou rostlinu, ale celý trofický systém včetně vztahů s herbivory a patogeny.

Celkově dostupnost fosforu významně určuje rovnováhu mezi růstem a obrannými mechanismy ovocných rostlin – jeho deficit nebo nadbytek může vést k posunům v produkci sekundárních metabolitů, odolnosti vůči stresu i interakcích s mikroorganismy.

Draslík

Draslík (K) je klíčový makroprvek, který výrazně ovlivňuje obranné mechanismy ovocných rostlin. Funguje nejen jako osmoticky aktivní ion, ale také jako aktivátor enzymů podílejících se na syntéze sekundárních metabolitů a signálních molekul (Marschner 2012). Dostatek draslíku zvyšuje odolnost rostlin vůči abiotickému stresu, zejména suchu a osmotickému

stresu vyvolaného zasolením, což má nepříímý vliv na schopnost bránit se patogenům a škůdcům (Wang *et al.* 2013).

V kontextu obrany proti herbivorům draslík zvyšuje produkci fenolických látek, flavonoidů a ligninu, což ztěžuje napadení listů a plodů. Draslík také podporuje aktivitu peroxidáz a polyfenoloxidáz, enzymů spojených s reakcemi hypersenzitivity a tvorbou lignifikovaných bariér. Nedostatek draslíku naopak snižuje tyto obranné mechanismy, vede ke snížení turgoru buněk a zvyšuje náchylnost rostlin vůči patogenům, jako jsou bakterie a plísně (Cakmak 2005).

Dalším významným aspektem je role draslíku v regulaci transpirace a transportu fotosyntetických produktů, což má dopad na trofické vztahy v ekosystému. Rostliny s adekvátním obsahem draslíku lépe podporují přítomnost predátorů a parasitoidů herbivorních škůdců prostřednictvím produkce kvalitnějších extraktů a emisí VOCs (Harrison *et al.* 2013).

V literatuře je zdůrazňována také synergická interakce draslíku s dalšími živinami, zejména dusíkem a fosforem, která optimalizuje obranné reakce rostlin a zvyšuje jejich schopnost adaptace na stresory (Guo *et al.* 2016).

Vápník

Vápník (Ca) je základní makroprvek, který hraje klíčovou roli v udržování integrity buněčných stěn, stabilizaci membrán a regulaci signálních drah v rostlinách. Dostupnost vápníku je spojena s posílením mechanických bariér proti patogenům, zejména prostřednictvím vápenatých pektátů, které zpevňují stěny a mezibuněčné spoje. Vápník rovněž funguje jako druhý posel v signalizaci abiotických a biotických stresů, aktivuje na vápníku závislé proteinkinázy (CDPK) a indukuje expresi genů obranných proteinů, včetně patogenem-indukovaných proteinů (PIs) a peroxidáz (Hepler 2005).

V agroekosystémech byly prokázány i nepřímé efekty vápníku na obranné mechanismy. Optimální koncentrace vápníku moduluje produkci těkavých organických látek (VOCs), které ovlivňují atraktivitu rostlin pro predátory herbivorů. Nedostatek vápníku často vede ke zvýšené náchylnosti plodů k fyziologickým poruchám a patogenům, například k hnilobám způsobeným houbami či bakteriálními infekcemi (White a Broadley 2003).

Je zřejmé, že vápník plní kombinovanou roli: mechanického zpevnění, signalizace stresových reakcí a modulátora trofických interakcí, čímž podporuje odolnost ovocných rostlin vůči biotickým a abiotickým faktorům.

Hořčík

Hořčík (Mg) je klíčový makroprvek pro rostlinný metabolismus, zejména jako centrální atom chlorofylu a kofaktor mnoha enzymů. Optimální zásobením hořčíkem podporuje fotosyntetickou aktivitu, syntézu ATP a stabilitu membrán, což nepřímo ovlivňuje schopnost rostlin generovat sekundární metabolity a obranné sloučeniny (Cakmak 2005, Verbruggen a Hermans 2013). Nedostatek hořčíku vede k oslabení fotosyntézy, akumulaci reaktivních forem kyslíku (ROS) a snížené syntéze fenolických látek a flavonoidů, které mají ochrannou funkci proti patogenům a herbivorům (Verbruggen a Hermans 2013).

Hořčík rovněž moduluje aktivitu enzymů zapojených do syntézy fytoalexinů a dalších sekundárních metabolitů a podporuje signalizaci zprostředkovanou Ca^{2+} a ROS, čímž ovlivňuje obranné odpovědi na biotické i abiotické stresy (Cakmak 2005). Ve vztahu k trofickým interakcím hořčík nepřímo ovlivňuje kvalitu listů pro herbivory a tím strukturu potravních sítí v sadu (Verbruggen a Hermans 2013).

Mangan

Mangan (Mn) je mikroprvek nezbytný pro optimální růst a vývoj ovocných rostlin a hraje klíčovou roli v jejich obranných mechanismech. Je součástí mnoha enzymů, zejména manganové superoxiddismutázy (Mn-SOD), která detoxikuje reaktivní formy kyslíku vznikající při biotickém a abiotickém stresu (Marschner 2012). Dostatečná zásoba manganu podporuje syntézu fenolických sloučenin, ligninu a dalších sekundárních metabolitů s obrannou funkcí, čímž zvyšuje odolnost proti mikrobiálním patogenům a herbivorním škůdcům (Fageria 2009). Mangan rovněž ovlivňuje fotosyntézu, enzymatickou aktivitu a tvorbu strukturálních prvků buněčné stěny, které působí jako mechanická bariéra proti průniku patogenů (Marschner 2012). Nerovnováha v zastoupení manganu může vést ke zvýšené náchylnosti rostlin k chorobám, například plísňovým infekcím, a snížit produkci obranných metabolitů, čímž oslabuje celkovou imunitní odpověď (Fageria 2009).

Kromě přímého účinku na metabolismus rostlin ovlivňuje Mn i mikrobiální společenstva rhizosféry, která se podílejí na indukci systémové rezistence a modulaci trofických interakcí s herbivory a jejich predátory (Marschner 2012).

Další mikroprvky (Fe, Zn, B, Si aj.)

Vedle hlavních makroprvků a klíčového mikroprvku, jako je mangan, mají i další stopové prvky zásadní význam pro obranné mechanismy ovocných rostlin. Železo (Fe) je nezbytné pro syntézu chlorofylu a mnoha enzymů zapojených do redoxních reakcí, které ovlivňují produkci reaktivních forem kyslíku při obraně proti patogenům. Nedostatek Fe může vést k oslabené buněčné signalizaci a snížené indukci obranných genů (Romheld a Marschner 1991).

Zinek (Zn) hraje roli jako činitel v řadě enzymatických reakcí spojených s regulací hormonálních drah, například biosyntézou auxinů a giberelinů, a ovlivňuje produkci fenolických sloučenin, které mají antimikrobiální vlastnosti (Cakmak 2000). Jeho nedostatek je spojen s vyšší náchylností rostlin k infekcím a sníženou aktivitou superoxiddismutázy (SOD), klíčového enzymu v obraně proti oxidačnímu stresu (Alloway 2008).

Bor (B) je nezbytný pro integritu buněčných stěn a střední lamely, přičemž ovlivňuje lignifikaci a stabilitu pektinů. Nedostatek boru oslabuje strukturální bariéry proti patogenům a snižuje schopnost rostlin efektivně vylučovat obranné metabolity (Brown *et al.* 2002).

Křemík (Si), je považován za benefiční prvek, podporuje mechanickou odolnost buněk a stimuluje indukovanou rezistenci proti houbovým a bakteriálním patogenům. Přítomnost křemíku zvyšuje produkci fenolických sloučenin, ligninu a enzymů zapojených do detoxikace ROS (Epstein 1999).

Další stopové prvky, jako jsou měď (Cu), molybden (Mo) a nikl (Ni), rovněž modulují obranné reakce přes účinky na enzymatické dráhy a metabolismus sekundárních metabolitů. Například měď je kofaktorem polyfenoloxidáz, klíčových enzymů při tvorbě fytoalexinů a dalších ochranných sloučenin (Burkhead *et al.* 2009).

Celkově lze říci, že vyvážené zásobení stopovými prvky je nezbytné pro optimální fungování obranných mechanismů rostlin. Nedostatky těchto prvků mohou vést k oslabení fyziologických a biochemických odpovědí na stresory a zvýšit náchylnost ovocných plodin k patogenům a škůdcům.

Výživa a modulace mikrobiálních společenstev rhizosféry

Mikrobiální společenstva v rhizosféře hrají klíčovou roli v obranných mechanismech ovocných rostlin, ovlivňují jejich růst, adaptaci na stres a rezistenci vůči patogenům. Minerální výživa rostlin zásadně moduluje složení a aktivitu těchto společenstev (Berendsen *et al.* 2012). Například dostupnost dusíku a draslíku může měnit poměr symbiotických a patogenních

mikroorganismů, což ovlivňuje minerální výživou indukovanou odolnost rostlin. Fosfor rovněž stimuluje některé mykorhizní asociace a zvyšuje produkci organických sloučenin fyto sideroforů produkovaných kořeny některých rostlin za účelem mobilizace a absorpce železa z půdy. Tyto látky nejen zlepšují absorpci živin, ale také modulují mikrobiální komunity (Smith a Read 2008).

Dalším příkladem je vliv mikroprvků, jako je železo a zinek, na produkci fyto sideroforů mikrobiálními populacemi, což podporuje kompetici vůči patogenům a zvyšuje odolnost rostlin (Dimkpa *et al.* 2009). Vhodné hnojení může rovněž stimulovat produkci antimikrobiálních metabolitů půdními mikroorganismy, například fenolových kyselin a antibiotických látek, které působí jako biologická bariéra proti škůdcům a patogenům (Van der Heijden *et al.* 2008).

Interakce mezi výživou a mikrobiálními společenstvy se neomezuje jen na přímé účinky, minerální prvky mohou modulovat signální dráhy rostlin spojené s odolností, například dráhy kyseliny salicylové a jasmonové (Pieterse *et al.* 2012). Tyto metabolity následně ovlivňují chemickou komunikaci mezi kořeny a rhizosférickými mikroorganismy, čímž dochází k dynamické modulaci obranných strategií rostlin.

Je zřejmé, že cílená minerální výživa představuje efektivní nástroj pro podporu prospěšných rhizosférických komunit, a tím přispívá ke zlepšení odolnosti ovocných rostlin vůči biotickému stresu. Optimální výživová strategie musí brát v úvahu druh zemědělské plodiny, vývojovou fázi růstu, půdní charakteristiky a cílové mikrobiální interakce (Berendsen *et al.* 2012).

Minerální živiny a trofické interakce (VOCs, herbivoři, predátoři)

Minerální živiny zásadně ovlivňují nejen růst a vývoj rostlin, ale také jejich schopnost komunikovat s okolním ekosystémem prostřednictvím chemických signálů. Dostupnost klíčových prvků, jako je dusík, fosfor, draslík či mikroprvky, moduluje množství a složení těkavých organických látek (VOCs), které hrají významnou roli v trofických vztazích rostlina–herbivor–predátor. Dusík podporuje syntézu aminokyselin a sekundárních metabolitů a může zvyšovat emise VOCs, jež lákají predátory herbivorů, například parazitické vosy či predátory mšic (Han *et al.* 2020, Russo *et al.* 2022). Deficit fosforu naopak snižuje produkci některých terpenoidů a fenolických sloučenin, čímž oslabuje chemickou obranu rostlin, zatímco draslík, regulující osmotickou rovnováhu a vodní bilanci, nepřímo ovlivňuje emise VOCs (Razo-Belman a Ozuna 2023).

Změny v minerální výživě se přímo promítají do biologické zdatnosti herbivorů. Rostliny s vyšším obsahem dusíku mohou podporovat rychlejší růst larev, avšak zvýšená produkce VOCs současně přitahuje více predátorů. Snížená dostupnost draslíku a vápníku zvyšuje náchylnost listů k herbivornímu poškození a ovlivňuje tak interakce v rámci celých společenstev (Paniagua Montoya *et al.* 2024). Predátoři a parazitoidi využívají VOCs jako signály k lokalizaci kořisti a rostliny s vyváženou minerální výživou produkují komplexnější směsi VOCs, které zvyšují účinnost biologické kontroly herbivorů. Naopak nerovnováha v zásobení živinami může tento chemický signál zjednodušit a snížit efektivitu přirozené ochrany (Tao *et al.* 2017).

Lze říci, že zásobenost živinami spolu s hodnotami půdní reakce moduluje trofické interakce na více úrovních: ovlivňuje kvalitu a množství sekundárních metabolitů, produkci VOCs, biologickou zdatnost herbivorů i atraktivitu rostlin pro predátory a parazitoidy. Porozumění těmto vztahům je klíčové pro optimalizaci agroekosystémů a rozvoj efektivních strategií integrované ochrany rostlin.

Aplikační perspektivy pro udržitelné ovocnářství

Implementace znalostí o vlivu minerální výživy na obranné mechanismy a trofické vztahy umožňuje formulovat cílené nutriční strategie podporující efektivní a environmentálně šetrné

hospodaření v produkčním ovocnářství. Optimální zásobením makro- a mikroprvky může snížit závislost na chemických ochranných prostředcích, neboť zdravé a dobře vyživené rostliny vykazují vyšší rezistenci vůči patogenům a herbivorním škůdcům (Marschner 2012).

Aplikační přístupy zahrnují nejen standardní hnojení, ale i cílené doplňování živin podle fenologické fáze rostlin a aktuálních stanovištních podmínek. Dodávání draslíku a vápníku v kritických fázích vývoje plodů například podporuje pevnost buněčných stěn, což zvyšuje odolnost vůči mechanickému poškození a infekci patogeny (White a Broadley 2003). Současně lze prostřednictvím organických hnojiv, bio-stimulantů a kombinovaných aplikací s mikroprvky modulovat mikrobiální společenstva rhizosféry a posilovat systémovou rezistenci rostlin (Berendsen *et al.* 2012).

Výživa navíc ovlivňuje produkci těkavých organických látek (VOCs), které slouží jako signály pro predátory herbivorů a podporují biologickou regulaci škůdců (Arimura *et al.* 2009, Dicke a Baldwin 2010).

Integrovaný přístup založený na optimalizaci minerální výživy, monitoringu rhizosférických mikrobiálních společenstev a cíleném využití trofických interakcí vytváří synergický efekt pro ochranu rostlin, zvýšení odolnosti sadů a podporu ekologické stability agroekosystémů (Arimura *et al.* 2009).

DISKUZE

Současný výzkum potvrzuje, že minerální výživa ovocných rostlin hraje klíčovou roli nejen v jejich růstu a vývoji, ale také v modulaci obranných mechanismů proti škůdcům a patogenům (Marschner 2012). Dusík, fosfor a draslík zásadně ovlivňují syntézu sekundárních metabolitů a emisi těkavých organických látek (VOCs), které regulují chování herbivorů i jejich přirozených nepřátel (Dicke a Baldwin 2010, Erb a Kliebenstein 2020). Makroprvky, jako Ca, Mg, a mikroprvky Mn, Zn, Fe a B, dále podporují aktivitu obranných enzymů a strukturální integritu buněk, čímž zvyšují odolnost vůči stresovým faktorům (White a Broadley 2003, Berendsen *et al.* 2012).

Minerální výživa současně významně formuje složení a funkci mikrobiálních společenstev rhizosféry. Tato společenstva mohou zvyšovat odolnost rostlin prostřednictvím indukce systémové rezistence nebo produkce sekundárních metabolitů, a tím nepřímo ovlivňovat trofické interakce (Arimura *et al.* 2009). Interakce mezi minerální výživou a mikrobiomem jsou však vysoce komplexní a podmíněny kombinací genetických, ekologických a environmentálních faktorů.

Na úrovni trofických interakcí hrají živiny a VOCs zásadní roli v regulaci herbivorů i predátorů. Rostliny s optimalizovanou výživou například emitují VOCs, které přitahují přirozené nepřátele škůdců, a tím snižují jejich populační hustotu (Dicke a Baldwin 2010, Erb a Kliebenstein 2020). Přesto je třeba brát v úvahu, že výsledky laboratorních studií se ne vždy daří plně přenést do komplexních podmínek sadů. Účinnost optimalizované výživy pro regulaci herbivorů je podmíněna uplatňováním systému integrované ochrany rostlin, jako je podpora výskytu přirozených nepřátel, zvyšování biodiverzity sadu, kvetoucí pásy v meziřadích, biokoridory a omezování používání přípravků na ochranu rostlin s negativním vlivem na necílové organismy.

Další výzvou zůstává variabilita mezi odrůdami i vliv stanovištních a environmentálních faktorů, které mohou zásadně modifikovat účinnost nutričních strategií. Zohlednění těchto aspektů je nezbytné pro zajištění dlouhodobé udržitelnosti a efektivity ochrany ovocných kultur vůči škůdcům a patogenům (Berendsen *et al.* 2012, Marschner 2012).

ZÁVĚR

Minerální živiny hrají klíčovou roli nejen v růstu a vývoji ovocných rostlin, ale také v modulaci jejich obranných mechanismů proti herbivorům a v interakcích s predátory prostřednictvím emisí VOCs. Dusík, fosfor, draslík, vápník, hořčík a stopové prvky jako jsou mangan, železo, zinek, bor a křemík ovlivňují syntézu sekundárních metabolitů, enzymatickou aktivitu a schopnost rostlin přizpůsobovat své obranné strategie aktuálním podmínkám. Současně minerální živiny modulují složení mikrobiálních společenstev v rhizosféře, což má důsledky pro zdraví rostlin, jejich rezistenci vůči patogenům a interakce s herbivory i jejich přirozenými nepřáteli.

Komplexní přístup k agrotechnickým opatřením v sadech zohledňující nutriční fyziologii, chemickou ekologii a znalost mikrobiomu v oblasti rhizosféry poskytuje teoretický základ pro vývoj inovativních strategií v udržitelném ovocnářství. Optimalizovaná výživa ovocných plodin může zvýšit jejich přirozenou odolnost vůči škůdcům, snížit potřebu chemických pesticidů a podpořit ekologicky šetrné produkční systémy.

PODĚKOVÁNÍ

Při zpracování této studie bylo využito institucionální podpory DKRVO Ministerstva zemědělství České republiky RO1525.

LITERATURA

- ALLOWAY, B. J. *Zinc in Soils and Crop Nutrition*. 2. vyd. Brussels, Belgium; Paris, France: IZA and IFA, 2008.
- ARIMURA, G. I.; MATSUI, K. a TAKABAYASHI, J. Chemical and molecular ecology of herbivore-induced plant volatiles: proximate factors and their ultimate functions. Online. *Plant and Cell Physiology*. 2009, vol. 50, no. 5, s. 911–923. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp030> [cit. 4. 9. 2025].
- BERENDSEN, R. L.; PIETERSE, C. M. a BAKKER, P. A. The rhizosphere microbiome and plant health. Online. *Trends in Plant Science*. 2012, vol. 17, no. 8, p. 478–486. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001> [cit. 26. 8. 2025].
- BROWN, P. H.; BELLALOU, N. a WIMMER, M. A. Boron in plant biology. Online. *Plant Biology*, 2002, vol. 4, no. 2, p. 205–223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1055/s-2002-25740> [cit. 4. 9. 2025].
- BRYANT, J. P.; CHAPIN, F. S. III, a KLEIN, D. R. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. Online. *Oikos*. 1983, vol. 40, no. 3, p. 357–368. Dostupné z: <https://doi.org/10.2307/3544308> [cit. 26. 8. 2025].
- BURKHEAD, J. L.; GOGOLIN REYNOLDS, K. A.; ABDEL-GHANY S. E; COHU, C. M a PILON M. Copper Homeostasis. Online. *New Phytologist*. 2009, vol. 182, č. 4, p. 799–816. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02846.x> [cit. 4. 9. 2025].
- CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. Online. *New Phytologist*. 2000, vol. 146, no. 2, p. 185–205. Dostupné z: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x> [cit. 4. 9. 2025].
- CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. Online. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2005, vol. 168, no. 4, p. 521–530. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485> [cit. 4. 9. 2025].
- DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H. a HUBER, D. M., eds. *Mineral Nutrition and Plant Disease*. St. Paul: APS Press, 2007. ISBN 978-0-89054-346-7.
- DE FREITAS, S. T. a MITCHAM, E. J. Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. Online. *Horticultural Reviews*. 2012, vol. 40, p. 107–146. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118351871.ch3> [cit. 26. 8. 2025].

- DICKE, M. a BALDWIN, I. T. The evolutionary context for herbivore-induced plant volatiles: beyond the 'cry for help'. Online. *Trends in Plant Science*. 2010, vol. 15, no. 3, p. 167–175. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.002> [cit. 26. 8. 2025].
- DIMKPA, C.; WEINAND, T. a ASCH, F. Plant-rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. Online. *Plant, Cell & Environment*. 2009, vol. 32, no. 12, p. 1682–1694. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02028.x> [cit. 4. 9. 2025].
- EPSTEIN, E. Silicon. Online. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1999, vol. 50, s. 641–664. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641> [cit. 2025-09-04].
- ERB, M. a KLIEBENSTEIN, D. J. Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: the blurred functional trichotomy. Online. *Plant Physiology*. 2020, vol. 184, no. 1, p. 39–52. Dostupné z: <https://doi.org/10.1104/pp.20.00433> [cit. 4. 9. 2025].
- FAGERIA, N. K. *The Use of Nutrients in Crop Plants*. Online. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781420075113> [cit. 26. 8. 2025].
- GUO, Y.; GASPARRINI, A.; ARMSTRONG, B. G. *et al.* Temperature variability and mortality: a multi-country study. Online. *Environmental Health Perspectives*. 2016, vol. 124, no. 10, p. 1554–1559. Dostupné z: <https://doi.org/10.1289/EHP149> [cit. 4. 9. 2025].
- HAN, P.; BECKER, C.; LE BOT, J.; LARBAT, R.; LAVOIR, A. V.; DESNEUX, N.; ADAMOWICZ, S.; AUSTIN, A. a RUSSO, A. Plant nutrient supply alters the magnitude of indirect interactions between insect herbivores: From foliar chemistry to community dynamics. Online. *Journal of Ecology*. 2020, vol. 108, no. 4, p. 1497–1510. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13342> [cit. 4. 9. 2025].
- HARRISON, M. S.; HUNG, C. S.; LIU, T. T. *et al.* A mechanism for retromer endosomal coat complex assembly with cargo. Online. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013, vol. 111, no. 1, p. 267–272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.1316482111> [cit. 4. 9. 2025].
- HEPLER, P. K. Calcium: a central regulator of plant growth and development. Online. *Plant Cell*. 2005, vol. 17, no. 8, p. 2142–2155. Dostupné z: <https://doi.org/10.1105/tpc.105.032508> [cit. 2025-09-04].
- HERMS, D. A. a MATTSON, W. J. The dilemma of plants: To grow or defend. Online. *Quarterly Review of Biology*. 1992, vol. 67, no. 3, p. 283–335. Dostupné z: <https://doi.org/10.1086/417659> [cit. 26. 8. 2025].
- HUBER, D. M. a JONES, J. B. The role of magnesium in plant disease. Online. *Plant and Soil*. 2012, vol. 368, no. 1-2, p. 73–85. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1476-0> [cit. 26. 8. 2025].
- LESER, C. a TREUTTER, D. Effects of nitrogen supply on growth, contents of phenolic compounds and pathogen (scab) resistance of apple trees. Online. *Physiologia Plantarum*. 2004, vol. 123, no. 1, p. 49–56. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2004.00427.x> [cit. 4. 9. 2025].
- MARSCHNER, P. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. vyd. London: Academic Press, 2012. ISBN 9780123849052.
- MATYSSEK, R. a SCHNYDER, H. *et al.* Growth and parasite defence in plants: The balance between resource sequestration and retention. Online. *Plant Biology*. 2002, vol. 4, no. 2, p. 133–136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1055/s-2002-25742> [cit. 26. 8. 2025].
- MUR, L. A. J.; SIMPSON, C.; KUMARI, A.; GUPTA, A. K. a GUPTA, K. J. Moving nitrogen to the centre of plant defence against pathogens. Online. *Annals of Botany*. 2016, art. mcw179. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/aob/mcw179> [cit. 26. 8. 2025].
- PANIAGUA MONTTOYA, M.; FORDE, A. J.; INOUE, B. a UNDERWOOD, N. Plant resistance and predators influence the density dependence of herbivore survival and distribution of herbivory. Online. *Ecology and Evolution*. 2024, vol. 14, no. 8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ece3.70106> [cit. 4. 9. 2025].
- PIETERSE, C. M. J.; VAN DER DOES, D.; ZAMIOUDIS, C.; LEON-REYES, A. a VAN WEES, S. C. M. Hormonal modulation of plant immunity. Online. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. 2012, vol. 28, no. 1, p. 489–521. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-092910-154055> [cit. 26. 8. 2025].
- QU, L.; WANG, M. a BIERE, A. Interactive effects of mycorrhizae, soil phosphorus, and light on growth and induction and priming of defense in *Plantago lanceolata*. Online. *Frontiers in Plant Science*. 2021, vol. 12. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647372> [cit. 4. 9. 2025].

- RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. Online. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1999, vol. 50, no. 1, p. 665–693. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.665> [cit. 26. 8. 2025].
- RAZO-BELMAN, R. a OZUNA, C. Volatile Organic Compounds: A Review of Their Current Applications as Pest Biocontrol and Disease Management. Online. *Horticulturae*. 2023, vol. 9, no. 4, p. 441. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040441> [cit. 4. 9. 2025].
- ROMHELD, V. a MARSCHNER, H. Micronutrients in agriculture. 2. vyd. *Soil Science Society of America Book Series*, no. 4. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Inc., 1991, p. 297–328.
- RÖMHELD, V. a KIRKBY, E. A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. Online. *Plant and Soil*. 2010, vol. 335, no. 1-2, p. 155–180. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1> [cit. 26. 8. 2025].
- RUSSO, A.; POLLASTRI, S.; RUOCCO, M.; MONTI, M. M. a LORETO, F. Volatile organic compounds in the interaction between plants and beneficial microorganisms. Online. *Environmental Microbiology*. 2022, vol. 17, no. 1, p. 840–852. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2107243> [cit. 4. 9. 2025].
- SAUGE, M. H.; GRECHI, I. a POËSSEL, J. L. Nitrogen fertilization effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: vegetative growth allocation or chemical defence? Online. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2010, vol. 136, no. 2, p. 123–133. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01008.x> [cit. 4. 9. 2025].
- SMITH, S. E. a READ, D. J. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3. vyd. London: Academic Press, 2008. [cit. 4. 9. 2025].
- SUN, Y.; WANG, M.; MUR, L. A. J.; SHEN, Q. a GUO, S. Unravelling the Roles of Nitrogen Nutrition in Plant Disease Defences. Online. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020, vol. 21, no. 2, p. 572. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijms21020572> [cit. 4. 9. 2025].
- TAO, L.; HUNTER, M. D. a DE ROODE, J. C. Microbial root mutualists affect the predators and pathogens of herbivores above ground: Mechanisms, magnitudes, and missing links. Online. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2017, vol. 5. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00160> [cit. 4. 9. 2025].
- TRIPATHI, R.; TEWARI, R.; SINGH, K.P.; KESWANI, C.; MINKINA, T. *et al.* Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop protection. Online. *Frontiers in Plant Science*. 2022, vol. 13. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883970> [cit. 4. 9. 2025].
- VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C. a ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. Online. *New Phytologist*. 2003, vol. 157, no. 3, p. 423–447. Dostupné z: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x> [cit. 26. 8. 2025].
- VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D. a VAN STRAALLEN, N. M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. Online. *Ecology Letters*. 2008, vol. 11, no. 3, p. 296–310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x> [cit. 4. 9. 2025].
- VERBRUGGEN, N. a HERMANS, C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. Online. *Plant and Soil*. 2013, vol. 368, no. 1–2, p. 87–99. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1589-0> [cit. 4. 9. 2025].
- WALTERS, D. R. a BINGHAM, I. J. Influence of nutrition on disease development caused by fungal pathogens: implications for plant disease control. *Annals of Applied Biology*. 2007, vol. 151, no. 3, p. 307–324. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00176.x> [cit. 26. 8. 2025].
- WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q. a GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. Online. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013, vol. 14, no. 4, p. 7370–7390. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijms14047370> [cit. 26. 8. 2025].
- WHITE, P. J. a BROADLEY M. R. Calcium in plants. Online. *Annals of Botany*. 2003, vol. 92, no. 4, p. 487–511. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>. [cit. 4. 9. 2025].
- ZÜST, T. a AGRAWAL, A. A. Trade-offs between plant growth and defense against insect herbivory: An emerging mechanistic synthesis. Online. *Annual Review of Plant Biology*. 2017, vol. 68, p. 513–534. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-040856> [cit. 4. 9. 2025].