

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Ochrana životního prostředí



Alexandra Solokhina

Vliv domestikace rostlin na půdu
The effect of plant domestication on soil

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:
prof. Mgr. Ing. Jan Frouz, CSc.

Praha, 2024

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu

V Praze, 11.12.2024

Alexandra Solokhina

Poděkování

Chtěla bych upřímně poděkovat prof. Mgr. Ing. Janu Frouzovi, CSc., mému vedoucímu, za jeho trpělivé a odborné vedení, cenné rady a nasměrování při psaní mé bakalářské práce. Velké poděkování patří také mému tatínkovi, který mě vždy silně podporoval. Jeho láska a víra ve mne mě provázejí jako tichý anděl i po jeho odchodu, a jeho podpora stále zůstává nedílnou součástí mé cesty

Abstrakt

Domestikace rostlin je dlouhý proces, který změnil vlastnosti rostlin a výrazně ovlivnil půdu. Tento vliv se během historie zemědělství postupně prohluboval, což v současnosti vedlo k obzvlášť aktuálnímu problému degradace půdy, jenž je výsledkem intenzivního zemědělství. Tato bakalářská práce zkoumá, jakým způsobem domestikace rostlin přivedla půdu do současného stavu. Jsou popsány přímé vlivy způsobené šlechtěním rostlin, konkrétně změny kořenového systému, mikrobiomu a chemického složení půdy. Nepřímé vlivy vznikly v důsledku změn v agrotechnických postupech, které doprovázely domestikaci. Zvláštní pozornost je věnována analýze problémů moderního zemědělství a jsou navrženy způsoby jejich řešení prostřednictvím zavádění udržitelných metod hospodaření.

Klíčová slova: domestikace rostlin, degradace půdy, kořenové systémy, půdní mikrobiom, mykorhiza, plant-soil feedback, jednoleté plodiny, víceleté plodiny, agrotechnické praktiky, udržitelné zemědělství

Abstract

Plant domestication is a long process that has altered the characteristics of plants and significantly impacted the soil. Over time, this influence has intensified, ultimately contributing to the pressing modern issue of soil degradation as a result of intensive agricultural practices. This bachelor's thesis explores how plant domestication has led to the current state of soils. It examines direct effects, caused by plant breeding, including changes to root systems, the soil microbiome, and chemical composition. Indirect effects are linked to shifts in agricultural practices that accompanied domestication. Special attention is given to analyzing the challenges of modern agriculture and proposing solutions through the implementation of sustainable farming methods.

Keywords: plant domestication, soil degradation, root systems, soil microbiome, mycorrhiza, plant-soil feedback, annual crops, perennial crops, agricultural practices, sustainable agriculture

Obsah

1. Úvod	1
2. Vliv rostlin na půdu	3
2.1 Přísun opadu	3
2.2 Působení kořenů na půdu	4
2.3 Mikrobiom	6
2.4 Mykorhiza	7
2.5 Půdní fauna	9
2.6 Plant-soil feedback	10
3. Domestikace rostlin	13
4. Domestikace rostlin a její vliv na půdu	16
4.1 Výběr rostlin	16
4.1.1 Životní strategie	16
4.1.2 Organoleptické vlastnosti	19
4.1.3 Mykorhiza	19
4.2 Vliv dalšího šlechtění na vlastnosti rostlin ovlivňující půdu	20
4.2.1 Změna kořenové architektury	21
4.2.2 Změny v podílu kořenů v celkové biomase	22
4.2.3 Změny stechiometrie v půdě	23
4.2.4 Změna mikrobiomu	23
4.3 Rozvoj agrotechniky a pěstování domestikovaných rostlin	25
4.3.1 Kultivace půdy	25
4.3.2 Hnojiva	27
4.3.3 Systémy zemědělství	29
5. Závěr	32
6. Seznam literatury	34

1. Úvod

Půda je klíčovou složkou ekosystému, která zajišťuje rostlinám vodu, živiny a prostředí pro kořenové systémy. Jednotlivé složky půdy, zahrnující anorganické minerální látky, organické sloučeniny, vzduch a živé organismy (edafon), hrají svojí roli při interakci půd a rostlin. Tyto vzájemně propojené prvky vytvářejí podmínky, na nichž přímo závisí produktivita rostlin a stabilita ekosystémů (Brady & Weil, 2008). Půda je prostředím pro rostliny ale zároveň je vegetace významným půdotvorným faktorem, který určuje složení a vývoj půd (Brady a Weil, 2008, Frouz 2024). V přirozených ekosystémech bude výskyt určitých typů půd svázán s výskytem určitých typů vegetace a naopak (Brady a Weil 2008). Tento vzájemný vztah mezi půdou a vegetací byl v přirozených ekosystémech dlouhodobě vyvážený, avšak proces domestikace rostlin tuto rovnováhu narušil. Zavádění kulturních plodin a intenzivní zemědělství zásadně změnilo interakce mezi půdou a vegetací, což mělo významné důsledky nejen pro zdraví půdy, ale i pro udržitelnost celých ekosystémů.

Domestikace rostlin je jedním z klíčových procesů, který formoval moderní zemědělství. Tento proces, zaměřený na přizpůsobení rostlin potřebám člověka, zásadně změnil strukturu kořenových systémů rostlin – tedy části, která je v přímém kontaktu s půdou. Tyto změny přinesly další dopady, které často negativně ovlivnily zdraví půdy a vedly k degradaci jejích funkcí (Abbo et al., 2017).

Změny v půdě, způsobené výběrem rostlin pro domestikaci, následným šlechtěním a způsoby pěstování, měly vliv na její produktivitu, schopnost zadržovat vodu a živiny a také na stabilitu ekosystémů. Rostoucí populace a odpovídající intenzivní zemědělství vedou k vyčerpání půdy a její úplné degradaci (Geisseler & Scow, 2014). V roce 2018 OSN uznala degradaci půdy za jednu z klíčových ekologických hrozeb, která ovlivňuje potravinovou bezpečnost, zdraví ekosystémů a udržitelnost zemědělství (FAO, 2018). V roce 2022 FAO zdůraznila, že třetina všech zemědělsky využívaných půd již byla degradována, což představuje zásadní výzvu pro současné i budoucí generace (FAO, 2022). Navíc půda obsahuje obrovské množství uhlíku, který hraje zásadní roli při zmírňování klimatické krize (Delgado-Baquerizo et al., 2016). Porozumění tomu, jak proces domestikace rostlin ovlivnil půdu, je nezbytné pro vývoj nových udržitelných zemědělských metod a zavádění inovativních technologií (Tahat et al., 2021; Crews et al., 2018).

Tato práce je rozdělena do několika částí. První část se zaměřuje na obecné vlivy rostlin na půdu, se zvláštním důrazem na kontrast mezi jednoletými a víceletými rostlinami, což je důsledek výběru jednoletých rostlin pro domestikaci. Druhá část poskytuje přehled znalostí o domestikaci

roślin. Poslední část se detailně zabývá důsledky domestikace na půdu. Hlavní otázky této práce jsou: Jaké faktory ovlivnily výběr rostlin pro domestikaci a jaké to má důsledky? Jak ovlivnila selekce rostlin zaměřená na vysokou produktivitu chemické a fyzikální vlastnosti půdy? Jaké moderní zemědělské metody mohou být použity k minimalizaci degradace půdy?

1. Vliv rostlin na půdu

Rostliny jsou zásadním způsobem ovlivněny půdou ve které rostou, ta jim poskytuje prostředí pro růst kořenů vodu a živiny. Na druhou stranu vegetace spolu s půdními organismy představují významný půdotvorný faktor (Brady & Weil, 2008) a vlastnosti půdy jsou tak do značné míry ovlivněny vegetací, která na nich roste. Rostliny mohou ovlivňovat půdy jednak přísunem opadu, jednak působením kořenů (Wardle et al., 2004), v obou případech se jedná o celou plejádu procesů z nichž některé působí prakticky okamžitě a jiné vynikají akumulací drobných změn, které jsou zpočátku takřka nepostižitelné ale časem mohou změnit fungování celého systému (Frouz 2023). Rostliny přitom nepůsobí tento vliv samy ale svojí činností podporují celou řadu dalších organismů jejichž spolupůsobením dochází k změně půd, tato změna pak působí zpětně na rostliny této zpětné vazbě říkáme *plant-soil feedback* (PSF)

2.1 Přísun opadu

Rostlinný opad představuje jeden z hlavních vstupů organické hmoty do půdy (Briggs 2009). Kvalita opadu významně určuje charakter přízemní vrstvy půdy, dynamiku živin a vývoj půd, což následně ovlivňuje půdní vlastnosti, vlhkost půdy a dostupnost živin (Wardle et al., 2004).

Rychle rostoucí rostliny mají zpravidla tenké listy, které umožňují vysokou rychlost fotosyntézy a tím podporují rychlý růst. Tenké listy obsahují méně strukturních pletiv a díky tomu mají vyšší obsah dusíku, nižší C:N poměr, a větší množství dalších biologicky významných prvků (Wardle et al., 2004, Cornelissen et al., 2003). Díky tomu se tyto listy v půdě rychle rozkládají a uvolňují velké množství živin (Aerts 1997; Wardle et al., 2004; Cornelissen et al., 2003). Tento proces následně zvyšuje dostupnost živin v půdě, což umožňuje rychlý růst rostlin (Wardle et al., 2004).

Na druhou stranu rostliny na chudších půdách rostou pomalu a mají silné listy, které vydrží delší dobu. Tato adaptace však vede k většímu stáří listů a pomalejší rychlosti fotosyntézy, která nepodporuje rychlý růst. Opad těchto rostlin obsahuje méně dusíku, má vyšší C:N poměr a nižší obsah dalších živin (Wardle et al., 2004, Cornelissen et al., 2003). Navíc tyto listy často obsahují vysoké množství fenolických látek (Frouz 2018). V důsledku toho se listy pomalu rostoucích rostlin v půdě rozkládají pomaleji, což vede k pomalejšímu uvolňování živin a nižší dostupnosti živin v půdním profilu (Aerts 1997; Wardle et al., 2004; Cornelissen et al., 2003). To následně omezuje růst rostlin a umožňuje růst především pomalu rostoucích druhů s konzervativní strategií využívání zdrojů (Wardle et al., 2004).

Tyto vlivy rostlin na půdu mohou být dále posilovány interakcemi s dalšími půdními organismy. Listy pomalu rostoucích rostlin podporují půdní společenstva dominovaná zejména houbami

(Ponge 2013; Frouz 2018). Houby rozkládají opad pomaleji, což vede k pomalejšímu uvolňování živin. Navíc půdní fauna je zde tvořena především půdní mezofaunou, která požírá biomasu hub a částečně rozložený opad, ale podporuje jen omezené promíchávání organického materiálu do minerální půdy. Dochází tak k vzniku formy nadložního humusu typu mor (Ponge 2013; Frouz 2018). Fenolické látky v listech navíc vedou k tvorbě fulvokyselin, které mají vysokou sorpci, ale jsou v půdě velmi pohyblivé, což podporuje jejich vyplavování do hlubších vrstev půdního profilu. Všechny tyto faktory vedou k tomu, že půdy porostlé pomalu rostoucími rostlinami se stávají ještě chudšími na živiny (Wardle et al., 2004; Ponge 2013; Frouz 2018).

Naopak přísun snadno rozložitelného opadu podporuje bakteriální potravní síť s mikrobiální smyčkou, která vede k rychlé mineralizaci živin a zvyšuje tak jejich dostupnost pro rostliny. Velká dostupnost živin podporuje také výskyt žížal a další makrofauny, která se významně podílí na zamíchávání částečně rozloženého opadu do půdy a vzniku půdních agregátů (Ponge 2013; Frouz 2018). Tím se podporují sorpční schopnosti půdy a dochází k dočasné vazbě uvolněných živin. Tyto živiny se tak neztrácejí z půdního profilu a jsou dostupné rostlinám, což podporuje růst rychle rostoucích rostlin (Wardle et al., 2004; Ponge 2013; Frouz 2018). Vzniká tak humus typu mull. Mezi těmito extrémy se nachází humus typu moder (Ponge 2013; Frouz 2018).

Tyto formy humusu mají vliv i na další procesy, jako je například výskyt mykorhizních symbiontů. Výskyt arbuskulární mykorhizy je často asociován s humusem typu mull, zatímco ektomykorhizní symbionty jsou spojeny s humusem typu mor (Frouz et al., 2018).

Tyto procesy jsou ovlivněny i dalšími faktory, jako je diverzita rostlin a jejich funkčních vlastností, která může mít synergický efekt na procesy dekompozice a koloběh živin (Makkonen et al. 2012). Větší variabilita listových vlastností v ekosystému zajišťuje efektivnější využívání živin a vyšší produktivitu. Proto je ochrana a podpora biodiverzity klíčová nejen z estetických a etických důvodů, ale také z praktického hlediska pro udržení zdravých ekosystémů.

2.2 Působení kořenů na půdu

Kořenový systém hraje klíčovou roli při formování půdy a morfologie kořenů reguluje schopnost půdy propouštět vodu a vzduch a odolávat erozi (Hoad et al., 2001; Frouz). Růst kořenů vytváří kanálky, tzv. biopóry, které zvyšují propustnost vody a zlepšují kyslíkový režim půdy. Hlubší a rozvinutější kořeny víceletých rostlin lépe zpevňují půdu a udržují její strukturální stabilitu, což zajišťuje efektivnější zadržování vlhkosti a výměnu vzduchu (Frouz, 2024). Kanálky v hlubších vrstvách půdního profilu mají dlouhodobý efekt, který snižuje riziko vzniku vysušených oblastí (Ehlers et al., 1983).

Dobře vyvinutý kořenový systém dále zvyšuje odolnost proti environmentálním stresům, jako je sucho, tím, že propojuje hluboké vrstvy půdy s atmosférickou vlhkostí a ovlivňuje hydrologický koloběh a metabolismus uhlíku. Kořeny nejen zvyšují zvětrávání hornin, ale také zajišťují dlouhodobé udržování vodní bilance a úrodnosti půdy (Fan et al., 2017).

Naopak méně rozvinutý kořenový systém rychle rostoucích jednoletých rostlin, zaměřený na rychlé získávání živin z půdy, významně zvyšuje riziko eroze. Tento typ kořenů nedokáže účinně podpořit strukturální stabilitu půdy a neumožňuje zadržování vody ve větší hloubce (De Baets et al., 2007; Frouz, 2023).

Tloušťka kořenů má také zásadní vliv na stabilitu půdy a prevenci eroze. Silnější a více rozvinuté kořeny víceletých rostlin lépe stabilizují půdu tím, že propojují půdní částice napříč různými vrstvami půdního profilu (Hoad et al., 2001; Frouz, 2024). Tato vlastnost pomáhá udržovat dlouhodobou strukturální stabilitu půdy a zajišťuje lepší odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou přívalové deště nebo silné větry. Naopak tenké a méně rozvětvené kořeny jednoletých rostlin poskytují pouze povrchovou ochranu půdy. Ačkoli tyto kořeny účinně zpevňují horní vrstvu půdy, nejsou schopny zajistit stabilitu hlubších vrstev, což zvyšuje riziko eroze a degradace půdy v delším časovém horizontu (De Baets et al., 2007; Frouz, 2023).

Kořenový systém rostlin také fixuje strukturu půdy a zvyšuje její smykovou pevnost (shear resistance) (Ghestem et al., 2014). Částice půdy jsou doslova „svázaný“ dohromady, což brání jejich vyplavování, což je obzvláště účinné v oblastech náchylných k sesuvům půdy. Při pronikání vody do půdy (například během silných dešťů) se půda stává těžší a náchylnější k pohybu. Kořeny vytvářejí rámec, který zvyšuje odolnost půdy proti tomuto pohybu, a zároveň absorbují část vlhkosti, čímž snižují zátěž půdy. Díky tomu hluboké a rozvětvené kořeny víceletých rostlin pevněji fixují různé vrstvy půdy a dále zvyšují její smykovou pevnost.

V krátkodobém časovém horizontu mohou kořeny snížit stabilitu půdních agregátů, což je výsledkem agresivního růstu kořenů, zejména mladých kořenů, které pronikají do půdy a narušují existující agregáty, ale dlouhodobě přispívají k jejich stabilizaci formováním pórů, uvolňováním exudátů a rozkladem tkání. Rozvinutý kořenový systém víceletých rostlin také zlepšuje kyslíkový režim v půdě, což je klíčové pro mikrobiologické procesy a život rostlin. Celkově rozvinutý kořenový systém nejen přispívá k udržení a zlepšení struktury půdy, ale také chrání proti erozi, zadržuje vodu a obohacuje půdu živinami. Tím hraje klíčovou roli v ekologických procesech a dlouhodobé stabilitě ekosystémů (Hoad et al., 2001).

2.3 Mikrobiom

Kořenový mikrobiom je kritickou složkou, která přímo souvisí s typem a architekturou kořenů rostlin. Rhizosférický mikrobiom zahrnuje široké spektrum organismů: bakterie, houby, viry, archea, prvoky a hlístice (Trivedi et al., 2020). Toto rozmanité společenstvo plní klíčové funkce pro rostliny, například ochranu před chorobami, odolnost vůči nepříznivým faktorům prostředí, podporu růstu a usnadnění přístupu k živinám. Význam mikrobioty se projevuje i v širších ekosystémových procesech, jako je rozklad organické hmoty a koloběh živin.

Složení a funkce rhizosférického mikrobiálního společenstva jsou přímo závislé na kořenech, které vylučují exudáty. Tyto metabolity přitahují užitečné mikroorganismy a podílejí se na řadě procesů, jako je regulace pH půdy, uvolňování látek toxických pro patogeny a vytváření příznivých podmínek pro užitečnou mikrobiotu (Vives-Peris et al., 2020).

Víceleté rostliny produkují větší množství exudátů než jednoleté, což je spojeno s jejich složitější kořenovou architekturou a delší životností kořenového systému. Vyšší obsah mikroorganismů v rhizosféře rostlin s větším počtem postranních a hlavních kořenů se zdůvodňuje tím, že v těchto místech se nejaktivněji vylučují exudáty (van Egeraat, 1975). Tato struktura umožňuje dlouhodobé zásobování mikroorganismů živinami a stabilní podmínky pro jejich růst. Vyšší množství exudátů v rhizosféře víceletých rostlin přitahuje širší spektrum mikroorganismů, čímž podporuje jejich rozmanitost a zvyšuje stabilitu mikrobiálních společenstev v půdě (Duret et al., 2024; Polverigiani et al., 2011; Zadworny a Eissenstat, 2011).

U jednoletých rostlin je množství exudátů nižší, což omezuje jejich schopnost vytvářet stabilní mikrobiální společenstva. Kořenový systém jednoletých rostlin, vzhledem ke svému krátkému životnímu cyklu, poskytuje mikroorganismům méně příležitostí k dlouhodobé kolonizaci. Výsledkem je dočasné ovlivnění mikrobioty, které je méně komplexní než u víceletých rostlin (Duret et al., 2024).

V půdních společenstvech je také pozorován „*priming*“ efekt – přidavek organické hmoty v počátečních fázích rozkladu zvyšuje mikrobiální aktivitu. Mikroorganismy reagují na exudáty a další organické látky zvýšením své aktivity, což urychluje rozklad organického materiálu a ovlivňuje koloběh uhlíku a dusíku v půdě (Kuzyakov et al., 2000). Tyto interakce zdůrazňují složitost vlivu rostlin na půdní mikrobiotu a její funkce.

Rozmanitost rhizosférických mikroorganismů hraje důležitou roli při rozkladu organického materiálu v půdě, což ovlivňuje její úrodnost. Mikrobiální diverzita pozitivně souvisí s rozkladem organické hmoty při nízkém obsahu uhlíku, zatímco při jeho dostatečné koncentraci

rozklad více ovlivňuje množství houbové biomasy (Vicena et al., 2022). Při nízkém obsahu uhlíku mikrobiální diverzita zvyšuje aktivitu, což je zásadní pro procesy přeměny organické hmoty.

Rhizosférické mikroorganismy hrají také důležitou roli v obraně rostlin proti patogenům. Někteří mikrobi vytvářejí fyzikální nebo chemické bariéry proti patogenům a také vylučují antimikrobiální sloučeniny, které inhibují jejich růst (Kloepper et al., 2004). Například bakterie *Pseudomonas* a *Bacillus* jsou známé svou schopností inhibovat růst patogenních hub, což posiluje imunitu rostlin.

Složení mikrobioty v rhizosféře je ovlivněno nejen aktivitou kořenů, ale také půdními vlastnostmi, jako je pH, obsah organické hmoty a vlhkost. Ty přímo ovlivňují rozmanitost a aktivitu mikrobiálních společenstev, protože různé typy půdy podporují různá mikrobiální společenstva (Rousk et al., 2009). V rhizosféře vytvářejí mikroorganismy složité sítě interakcí od mutualistických až po kompetitivní a pochopení těchto interakcí může pomoci zlepšit zdraví rostlin a produktivitu agroekosystémů (Cardinale et al., 2012).

2.4 Mykorhiza

Mykorhiza představuje důležitou symbiózu mezi houbami a vyššími rostlinami, která umožňuje interakci kořenů s půdním mikrobiomem a zajišťuje rostlinám potřebné živiny. Existují tři hlavní typy mykorhizy. Erikoidní mykorhiza je obvykle asociována s rostlinami čeledi Ericaceae.

Houbová mycelium vytváří koily – spirálovité struktury v tenkých kořenech. Tento typ mykorhizy pomáhá rostlinám rostoucím v chudých kyselých půdách, jako jsou rašeliniště, zlepšit přístup k živinám. Ektomykorhiza se vyskytuje převážně u jehličnatých stromů, ale také u některých listnatých rostlin. Tvoří houbovou plášť, která pokrývá kořen zvenčí a proniká do buněk, čímž zlepšuje příjem živin, zejména v podmínkách jejich nedostatku. Hlavním typem mykorhizy je však arbuskulární mykorhiza (AM). Tento typ je přítomen u zemědělských a divoce rostoucích rostlin. Houby, převážně z čeledi Glomeromycota, pronikají do buněk, kde vytvářejí arbuskule – stromovité struktury. Tato mykorhiza je klíčová pro udržení růstu rostlin ve všech agroekosystémech (Brundrett, 2004; van Der Heijden et al., 2015)

Každý typ mykorhizy je spojen s různými strategiemi růstu rostlin. Erikoidní mykorhiza se pojí s rostlinami s pomalým růstem, které jsou přizpůsobené chudým a kyselým půdám a vytvářejí málo rozkládající se opad. Ektomykorhiza je charakteristická pro rostliny se středním růstovým tempem, které mohou využívat jak organický, tak anorganický dusík, což jim umožňuje přežít v půdách se střední úrovní živin. Naproti tomu arbuskulární mykorhiza se pojí s rostlinami s

rychlým růstem, které jsou závislé na rychlém příjmu anorganického fosforu a jejichž listy se rychle rozkládají (Cornelissen et al., 2001).

AM houby mají významný vliv na fyzikální vlastnosti půdy, zejména na její strukturu, vodní retenční schopnosti a stabilitu. Husté sítě hyf AM hub tvoří lepivou strukturu, která obaluje a proplétá půdní částice, podporuje tvorbu makroagregátů, základních stavebních jednotek půdní struktury, a přispívá k dlouhodobé stabilizaci půdy (Miller a Jastrow 2000). Navíc AM houby produkují specifický glykoprotein zvaný glomalin, který se ukládá na povrch hyf a půdních částic a působí jako stabilní hydrofobní lepidlo. Glomalin hraje klíčovou roli při udržování stability půdních agregátů během opakovaných cyklů smáčení a sušení (Wright a Upadhyaya 1996). Hyfy AM hub také podporují tvorbu voděodolných agregátů, což přispívá k celkové odolnosti půdy vůči vysychání a erozi (Wu et al., 2008).

Mykorhizní asociace závisí na morfologii kořenů rostlin. Silné a slabě rozvětvené kořeny, které mají omezenou schopnost šíření v půdě, vykazují větší náchylnost k AM symbióze (Comas et al., 2014). Přítomnost mykorhizních hub má pozitivní vliv nejen na rostliny, ale také na strukturu a kvalitu půdy, což je klíčové i pro remediaci kontaminovaných půd, kde houby jako *Rhizophagus intraradices* podporují růst rostlin i v těžkých podmínkách (Ardestani a Frouz 2020).

Přestože rostliny s méně rozvětvenými kořeny častěji vstupují do AM symbiózy, realizace výhod této interakce závisí na životní formě rostliny. Jednoleté rostliny, které během jedné sezóny přesouvají zdroje z růstu na reprodukci, nemají dostatek času na plné využití symbiózy. Naproti tomu víceleté rostliny, díky delšímu životnímu cyklu, mohou reinvestovat zdroje do symbiontů a získat vyšší synergické výhody, zejména v kombinaci s dalšími mutualisty, jako jsou rhizobia (Primieri et al., 2022).

Také svou roli hraje rychlost růstu kořenů. Rozlišují se aktivní, tedy rychle rostoucí kořeny, a ekonomické, které rostou pomaleji. Aktivita kořenů závisí na tom, jak rostlina využívá své zdroje. Aktivní kořeny jsou zaměřeny na rychlé získávání a využívání živin. Mohou rychle osídlovat nové oblasti a expandovat, čímž absorbují více živin. Takové kořeny jsou méně závislé na mykorhize, protože si dokážou samy zajistit potřebné živiny. Naopak u rostlin s ekonomickými kořeny mykorhiza hraje klíčovou roli při zajišťování dlouhodobého přístupu k živinám. Pomáhá zlepšit jejich dostupnost, aniž by rostlina musela vynakládat nadměrné množství energie na rychlý růst (Da et al., 2023).

AM houby významně ovlivňují schopnost půdy zadržovat vodu, přičemž tento efekt je specifický pro texturu půdy. V písčitých půdách AM houby zvyšují schopnost zadržovat vodu, zatímco v hlinitých půdách může dojít k mírnému poklesu této schopnosti (Pauwels et al., 2023).

Tyto rozdíly vyplývají z interakcí mezi organickou hmotou produkovanou houbami a specifickými vlastnostmi půdních textur. Hyfy AM hub navíc propojují půdní částice a tím zvyšují stabilitu půdní struktury i za nepříznivých podmínek (Miller a Jastrow, 2000).

Kromě fyzikálních vlastností mají AM houby pozitivní vliv na enzymatickou aktivitu půdy, což zlepšuje dostupnost živin pro rostliny. Inokulace AM hub zvyšuje aktivitu většiny půdních enzymů, což podporuje uvolňování živin potřebných pro růst rostlin, zejména při nižším obsahu fosforu a neutrálním pH půdy (Qin et al., 2020). Zvýšení enzymatické aktivity přispívá k udržitelnému zemědělství a zlepšuje výživu rostlin.

AM houby také hrají klíčovou roli při zvyšování odolnosti půdy vůči erozi. Houby jako *Glomus macrocarpus* a další druhy AM zvyšují stabilitu půdních agregátů, které jsou odolné vůči smáčení a sušení, což je zásadní pro dlouhodobou stabilitu půdy (Wright a Upadhyaya, 1996).

Mykorrhizní houby dále ovlivňují přístupnost vody pro rostliny. V písčitých půdách AM houby zvyšují schopnost zadržovat vodu, což má pozitivní dopad na odolnost rostlin vůči suchu (Pauwels et al., 2023). Tento efekt je částečně způsoben změnami v distribuci velikosti pórů v půdě, k nimž dochází v důsledku přítomnosti hyf.

V zemědělské praxi se AM houby aktivně využívají ke zlepšení výnosů a odolnosti rostlin, což přispívá k udržitelnému zemědělství. Díky jejich schopnosti podporovat růst rostlin i v náročných podmínkách a zlepšovat fyzikální a chemické vlastnosti půdy nabízejí AM houby možnosti pro ekologickou remediaci a udržitelný rozvoj. Studium synergických interakcí mezi různými skupinami mikroorganismů a jejich vlivu na růst rostlin v kontaminovaných půdách představuje klíčovou oblast výzkumu s potenciálem pro rozšíření ekologických a udržitelných přístupů v zemědělství (Ponge, 2013; Frouz, 2018).

2.5 Půdní fauna

Půdní fauna zahrnuje všechny živé organismy, které obývají půdu, a podle velikosti se dělí na tři hlavní skupiny. Mikrofauna, zahrnující bakterie, houby, archea a protisty, tvoří základní složku půdního ekosystému a reguluje chemické procesy v půdě (Jiménez et al., 2020; Lavelle, 1996). Mezoafauna, kam patří hlístice, chvostoskoci a roztoči, působí především na rozklad organické hmoty a podporu mikrobiálních procesů (Frouz, 2018; Jiménez et al., 2020). Makrofauna, například žížaly, mravenci a termiti, má významný vliv na strukturu půdy a oběh živin díky své schopnosti přeměňovat a přemísťovat půdní materiál (Lavelle, 1996; Filser et al., 2016). Tyto organismy hrají společně klíčovou roli při udržování struktury, úrodnosti a biologické rozmanitosti půdy (Lavelle, 1996; Frouz, 2018).

Aktivita půdní fauny, zejména makro- a mezoafauny, je patrná v hloubení podzemních chodeb a zpracování organické hmoty. Při hloubení chodeb vznikají makropóry – kanály, které výrazně zlepšují provzdušnění a propustnost půdy (Frouz, 2018; Jiménez et al., 2020). Tyto procesy jsou součástí bioturbace, tedy přemísťování půdních částic, rozkladu organických zbytků a formování půdních pórů a agregátů (Lavelle, 1996; Frouz, 2018). Bioturbace hraje zásadní roli při zlepšování struktury půdy, zrychlování oběhu živin a snižování eroze, což přispívá ke zvýšení úrodnosti (Filser et al., 2016). Významným výsledkem tohoto procesu je tvorba půdních agregátů – stabilních struktur, které spojují jemné částice půdy. Tyto agregáty nejen zajišťují odolnost půdy vůči erozi, ale také zlepšují její schopnost zadržovat vodu a umožňují lepší provzdušnění. Žížaly hrají v tomto procesu zvláštní roli, protože jejich výměšky fungují jako „cement“, který agregáty stabilizuje (Frouz, 2018; Lavelle, 1996).

Zatímco makro- a mezoafauna ovlivňují fyzické vlastnosti půdy, mikrofauna hraje zásadní roli v chemických procesech. Při rozkladu organické hmoty a mikroorganismů mikrofauna uvolňuje do půdy rostlinám dostupné živiny, jako je amoniak a dusičnany (Filser et al., 2016; Jiménez et al., 2020). Některé mikroorganismy vylučují organické kyseliny, které rozpouštějí minerální sloučeniny a činí živiny dostupnějšími pro rostliny (Lavelle, 1996). Kromě toho mikrofauna zpracovává organickou hmotu na stabilní sloučeniny, které se podílejí na tvorbě humusu a stabilizaci uhlíku a živin v půdě (Frouz, 2018; Jiménez et al., 2020).

Mikro- a mezoafauna, například protisté a hlístice, rovněž interagují s mikrobiotou. Živí se bakteriemi a houbami, čímž regulují jejich početnost a stimulují jejich aktivitu. Tento vztah vede k urychlení rozkladu organické hmoty a oběhu živin (Jiménez et al., 2020; Lavelle, 1996). Spolupráce mezi různými složkami půdní fauny je založena na jejich funkční komplementaritě: zatímco někteří zástupci zlepšují fyzikální vlastnosti půdy, jiní se zaměřují na chemické a biologické procesy, jako je rozklad organické hmoty (Filser et al., 2016; Frouz, 2018).

Tímto způsobem půdní fauna významně přispívá k rovnováze ekosystému a stabilizuje jeho funkce. Rozmanitost a vyváženost druhů v půdě jsou proto klíčové pro udržení jejího zdraví, struktury, chemických vlastností a biologické rozmanitosti.

2.6 Plant-soil feedback

Plant-Soil Feedback (PSF) je proces, při kterém rostlina mění biotické a abiotické vlastnosti půdy a půda následně ovlivňuje rostlinu. Tento proces byl dlouho pozorován, když zemědělci v minulosti zjistili, že výnosy plodin byly nižší, pokud byla nová rostlina vysazena na stejné místo, kde dříve rostly stejné rostliny (van der Putten et al., 2013). PSF může mít pozitivní, negativní

nebo neutrální efekt, který závisí na konkrétních podmínkách prostředí. Tabulka 1 ukazuje různé typy PSF a popisuje jejich vliv na půdu

Tabulka 1. Typy Plant-Soil Feedback (PSF), jejich vliv a zdroje

Typ PSF	Popis	References
Pozitivní	Růst rostlin nebo jejich potomků zlepšuje podmínky v půdě pro stejný druh rostliny	Bever et al. (1997), Klironomos (2002)
Negativní	Změny v půdě zhoršují podmínky pro růst rostlin stejného druhu, například kvůli hromadění patogenů.	Bever (2003), Kulmatiski et al. (2008), van der Putten et al. (2013)
Neutrální	Vliv rostlin na půdu nemá významný efekt na jejich růst a přežití.	Kulmatiski et al. (2008)
Přímé (intraspecifické nebo conspecific)	Vliv rostliny na půdu, kde roste, a jak to ovlivňuje její potomstvo nebo růst rostliny.	Bever et al. (1997)
Nepřímé (interspecifické nebo heterospecifické)	Vliv jednoho druhu rostliny na půdu, která následně ovlivňuje růst jiných druhů.	Kulmatiski et al. (2008), Callaway & Ridenour (2004), Mangla et al. (2008)

Vliv PSF na růst rostlin závisí na řadě faktorů, mezi které patří biotické a abiotické složky prostředí. Biotické faktory zahrnují různé mikroorganismy v půdě, jako jsou mykorhizní houby a patogenní houby, které se hromadí v kořenové zóně rostliny a mohou mít přímý vliv na její růst a vývoj. Abiotické faktory, jako je pH půdy a dostupnost živin, rovněž ovlivňují účinnost PSF a mohou měnit podmínky pro růst rostlin. V některých případech může mikrobiální společenstvo podporovat pozitivní zpětnou vazbu, která zlepšuje podmínky pro růst stejného druhu rostliny, zatímco v jiných případech může vést k negativním zpětným vazbám, kdy se hromadí patogeny specifické pro daný druh (Bever, 2003; Bezemer et al., 2006).

PSF se však liší i mezi rostlinami s různými životními strategiemi. Různé rostlinné druhy mají odlišné mechanismy pro interakci s půdním mikrobiomem a tím i různé výsledky v PSF, což

závisí na jejich kořenové morfologii, schopnosti vytvářet symbiózu s mykorhizními houbami a dalších adaptacích. Víceleté rostliny mají tendenci vytvářet složitější kořenovou strukturu, která vede k silnějším pozitivním PSF, podporujícím růst a stabilitu rostlin a jejich komunit (Wilschut et al., 2023). Víceleté rostliny mají také složitější kořenové systémy, což jim umožňuje lépe ovlivňovat podmínky v půdě a zlepšovat stabilitu mikrobiálního společenství, což vede k dlouhodobějšímu růstu a vyšší odolnosti vůči patogenům (Kulmatiski et al., 2008).

Naopak, jednoleté rostliny mají kratší kořenové systémy, což omezuje jejich schopnost ovlivnit půdu a dlouhodobě zlepšovat její podmínky pro další růst. Jednoleté rostliny často podporují akumulaci patogenů v půdě, což vede k negativním zpětným vazbám a omezuje jejich vlastní růst i růst jejich potomků (Primieri et al., 2022). Negativní PSF u jednoletých rostlin mohou tak omezit jejich dlouhodobý růst na stejném stanovišti a podporují biologickou rozmanitost tím, že omezují dominanci jednoho druhu (Bever, 2003).

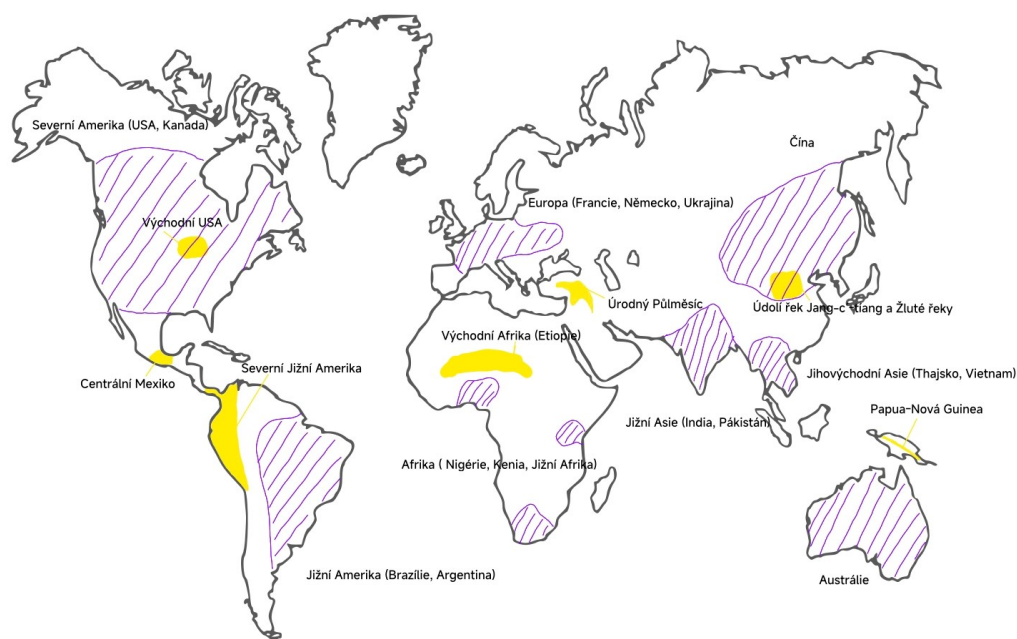
Délka kořenů (SRL) hraje klíčovou roli v tom, jak PSF ovlivňují různé rostliny. Rostliny s vyšším SRL (častěji víceleté) jsou schopné efektivněji prozkoumávat půdu, což snižuje jejich závislost na mikrobiálních symbiózách a zvyšuje odolnost vůči patogenům. Naopak rostliny s nižším SRL (častěji jednoleté) jsou více závislé na symbióze s mykorhizními houbami, což je činí náchylnějšími k patogenům a negativním PSF (Bergmann et al., 2016). PSF u mnoholetých rostlin tak mohou podporovat dlouhodobý růst a stabilitu, zatímco PSF u jednoletých rostlin mohou omezit jejich růst v dalších sezónách. Tento rozdíl v PSF ukazuje na důležitost kořenové morfologie a půdní struktury pro dlouhodobý růst rostlin a dynamiku rostlinných komunit (van der Putten et al., 2013; Kulmatiski et al., 2008).

V dlouhodobé perspektivě se efekt PSF projevuje ještě výrazněji. Rostliny, které v současnosti rostou, ovlivňují půdu, její strukturu a mikrobiální společenství nejen během několika sezón nebo let, ale také skrze generace rostlinných komunit a dokonce i po následné sukcesi. Tento proces má zásadní význam, protože přispívá k tvorbě ekologické paměti půdy, která může ovlivnit růst a stabilitu budoucích rostlinných společenství (Frouz, 2023).

Vliv *Plant-soil feedback* na růst a stabilitu rostlinných komunit je klíčovým faktorem pro porozumění ekologickým procesům. Znalost, jak různé životní strategie rostlin ovlivňují půdní mikrobiom a jak se PSF vyvíjejí, může mít zásadní význam pro správu přírodních a zemědělských ekosystémů. Zlepšení porozumění těmto procesům nám může pomoci v úsilí o udržitelný rozvoj, zachování biodiverzity a zlepšení úrody v měnícím se prostředí.

2. Domestikace rostlin

Změna vztahů mezi rostlinami a půdou, která byla formována přirozenými ekologickými procesy, začala postupně ovlivňovat také lidskou činnost. Jak se lidé přecházeli od přivlastňovací ekonomiky k produkční, rostliny přestaly být pouze součástí přírodních cyklů, ale staly se aktivními prvky, které byly systematicky vybírány a pěstovány pro uspokojení základních lidských potřeb. Tento proces znamenal nejen rozvoj nových zemědělských technik, ale i změny ve vztahu mezi rostlinami, půdou a mikrobiálním prostředím, což se odrazilo i na vlastnostech samotné půdy. Rostliny, které dříve rostly v divokých ekosystémech, začaly být domovány a přizpůsobovány pro intenzivní pěstování a produkci. Tento přechod znamenal zásadní změnu v lidském způsobu života a zahájil neolitickou revoluci, která začala kolem roku 12 000 př. n. l. V tomto období začaly nezávisle na sobě v několika oblastech světa probíhat pokusy o kultivaci rostlin a přechod k zemědělství, což vedlo k postupné domestikaci rostlin a zvířat (Weisdorf 2005).



Obrázek 1. Mapa srovnání center původu kulturních rostlin a současných oblastí intenzivního zemědělství. Na mapě jsou znázorněny dvě klíčové kategorie: 1. Centra původu kulturních rostlin – oblasti, kde byly kulturní rostliny poprvé domestikovány (žlutě). Tyto regiony zahrnují například Úrodný půlměsíc, údolí řek Jang-c'-ťiang a Žluté řeky, či Centrální Mexiko. 2. Současné oblasti intenzivního zemědělství – regiony, kde dnes probíhá největší produkce plodin

(šrafovaní). Tyto oblasti zahrnují například Východní USA, Jižní Ameriku (Brazílie, Argentina) či Evropu (Francie, Německo, Ukrajina). (Diamond a Bellwood 2003, FAOSTAT 2022)

Různá oblastí, které jsou uvedené na obrázku 1, se později staly známými jako centra původu kulturních rostlin. V Asii například vznikla domestikovaná rýže a sója (*Glycine max*), v Africe se domestikovaly batáty (*Dioscorea sp.*), v oblasti Úrodného půlměsíce byla domestikována pšenice a ječmen (*Hordeum vulgare*), a v Americe se začala pěstovat kukuřice a brambory (*Solanum tuberosum*) (Schaal 2019). Tento přechod k zemědělství, a tedy i domestikaci rostlin, vedl k dalším zásadním změnám v ekosystémech, které ovlivnily nejen samotné rostliny, ale i půdu, jejich mikrobiální společenstva a další faktory ovlivňující udržitelnost zemědělských systémů.

Na obrázku 1 je také patrné, že oblasti, kde byly kulturní rostliny původně domestikovány (žlutá barva), se výrazně liší od regionů, kde se dnes většina těchto plodin intenzivně pěstuje (fialové šrafovaní). Tento rozdíl poukazuje na globální přesun produkce zemědělských plodin v důsledku historických, geografických a ekonomických faktorů. Například Úrodný půlměsíc nebo Centrální Mexiko jako centra původu jsou dnes zastíněna velkoplošnou produkcí v oblastech, jako je Východní USA nebo Jižní Amerika.

Domestikace je proces, při kterém člověk vybírá určité vlastnosti rostlin nebo zvířat, které jsou pro něj užitečné, a následně pěstuje nebo chová jedince s těmito vlastnostmi. Tento proces vede k vytvoření populací, které jsou přizpůsobeny jak okolnímu prostředí, tak potřebám člověka (Martinez-Ainsworth a Tenaillon, 2016). Vznikající populaci rostlin charakterizuje tzv. domestikační syndrom, což je soubor vlastností, které jsou pro člověka výhodné, ale nemusí nutně být prospěšné pro samotné rostliny. Někdy se tento syndrom popisuje jako soubor znaků, které odlišují pěstovanou rostlinu od jejího planého předka, což ovšem není vždy přesné, protože některé rostliny, jako například smlídnec křídlatý (*Dioscorea alata*), nemají žádného známého planého předka. Proto je obtížné přesně definovat všechny rysy, které tvoří domestikační syndrom (Denham et al., 2020).

Domestikace vedla ke změnám nejen v fenotypu rostlin, ale také v jejich genomu. U divoké rýže (*Oryza nivara*) byly změněny geny, které ovlivňují efektivitu sklizně a sázení, konkrétně šlo o snížení rozpadu semen, snížení dormance a synchronizaci dozrávání semen (Li et al., 2006). Výběr těchto znaků byl často založen na chuťových preferencích lidí. Například divoké mandle obsahují látku amygdalin, která je jedovatá a má ochrannou funkci proti býložravcům a patogenům. Lidé, kteří si oblíbili sladkou chuť mandlových plodů, změnili genofond rostliny a

vyšlechtili nové domestikované druhy, které neobsahovaly amygdalin a tedy byly bezpečné k jídlu, ale zároveň ztratily svou přirozenou ochranu proti škůdcům (Sánchez-Pérez et al., 2008).

V procesu domestikace rostlin došlo k řadě významných změn, které ovlivnily jejich interakce s půdou prostřednictvím několika klíčových mechanismů. Tyto změny jsou výsledkem adaptace rostlin na intenzivní zemědělství. Snížení objemu kořenového systému, jak v absolutním měřítku, tak v poměru k nadzemní biomase, vedlo ke zvýšení výnosů díky efektivnějšímu využití živin v horních vrstvách půdy (Lv et al., 2019; Roucou et al., 2018). Interakce rostlin s mikrobiotou a mykorhizou se také změnily v reakci na používání hnojiv a odpovídající modifikace kořenové struktury (Pérez-Jaramillo et al., 2016; Sawers et al., 2018; Huang et al., 2022).

Kromě toho došlo ke změně chemického složení půdy v důsledku výběru rychle rostoucích rostlin, což přispělo k urychlení cyklu živin (Delgado-Baquerizo et al., 2016; García-Palacios et al., 2013). Tyto mechanismy umožnily výrazné zvýšení produktivity moderních rostlin, ale zároveň vedly k jejich větší závislosti na antropogenním zásahu a snížení ekologické stability agroekosystémů (Fradgley et al., 2020; Roucou et al., 2018).

Jedním z nejzásadnějších důsledků domestikace rostlin byl přechod od víceletých rostlin, typických pro divoké ekosystémy, k jednoletým plodinám, které lépe odpovídaly potřebám intenzivního zemědělství. Jednoleté rostliny byly preferovány díky rychlému růstu, vysoké produktivitě a schopnosti poskytovat úrodu jednou ročně, což je činilo ideálními pro intenzivní zemědělství (Meyer et al., 2012; Vilela a González-Paleo, 2015). Naopak víceleté rostliny, typické pro divoké ekosystémy, mají hlubší kořenové systémy, které zajišťují lepší retenci vody, stabilitu půdy a koloběh živin. Nicméně jejich pomalejší růst a delší produkční cyklus omezují jejich využití v intenzivním zemědělství (Neher, 1999).

Přechod k jednoletým plodinám způsobil nejen změny ve strategiích růstu rostlin, ale také ovlivnil půdní mikrobiální společenstva a stabilitu půdy, protože jednoleté rostliny s mělkými kořenovými systémy méně přispívají k dlouhodobé úrodnosti půdy (Purugganan a Fuller, 2009; Huang et al., 2022). Tento přechod byl klíčovým faktorem neolitické revoluce, kdy se lidé postupně přeměňovali z lovců a sběračů na zemědělce. Jednoleté plodiny umožnily pravidelnou a předvídatelnou produkci, což vedlo k rozvoji civilizací a osídlení.

3. Domestikace rostlin a její vliv na půdu

Domestikace rostlin zahrnuje mnoho různých procesů, z nichž každý svým způsobem ovlivnil kvalitu a zdraví půdy. Klíčové adaptace rostlin proběhly již v počáteční fázi domestikace – při výběru rostlin s určitými vlastnostmi. Tento proces je považován za nejstarší formu selekce, kdy byly rostliny vybírány na základě preferencí člověka, přičemž se kombinovaly s nahodnými mutacemi. Později se výběr rostlin změnil na cílenou selekci, která vedla k významným změnám morfologie a funkcí rostlin (Frouz a Frouzová, 2021; Abbo et al., 2017). Změny nadzemních částí rostlin přinesly i zásadní úpravy kořenových systémů, což mělo přímý dopad na půdu a často způsobilo řadu negativních důsledků. Tyto procesy se nakonec upevnily metodami pěstování moderních plodin, které dále ovlivnily půdu a stabilitu ekosystémů.

4.1 Výběr rostlin

Domestikaci rostlin lze definovat jako umělý výběr rostlin člověkem na základě jejich užitečných vlastností (Abbo et al., 2017). Rychlý růst, chuť plodů, textura, vysoká produktivita, adaptace a životní strategie – to vše jsou klíčové faktory ovlivňující výběr rostlin (Purugganan a Fuller, 2009). Výběr konkrétních vlastností rostlin následně svým způsobem ovlivnil půdu.

4.1.1 Životní strategie

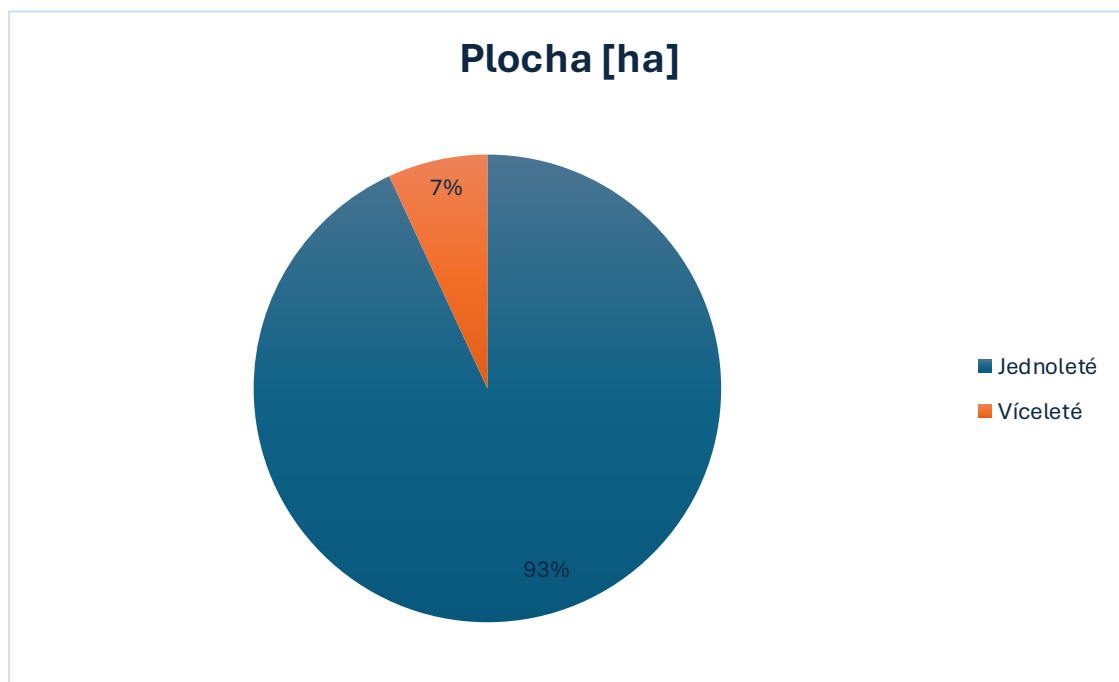
Klíčovým faktorem pro výběr byla životní strategie rostlin. Lidé vybírali plodiny, které mohly rychle růst a poskytovat stabilní úrodu pro zajištění potravinové bezpečnosti (Vilela a González-Paleo, 2015; Abbo et al., 2017).

Ve světě rostlin existují dvě hlavní životní strategie – jednoleté a víceleté rostliny. Jednoleté rostliny se vyznačují rychlým růstem, vysokou produktivitou a schopností přinášet úrodu jednou ročně (Meyer et al., 2012; Vilela a González-Paleo, 2015). Tyto vlastnosti z nich učinily preferovanou volbu pro domestikaci. Víceleté plodiny naopak vyžadují delší dobu pro dosažení první úrody, ale jsou schopné plodit po mnoho let. Jejich hluboké kořenové systémy pomáhají stabilizovat půdu, avšak pomalý růst a vysoké nároky na podmínky je činí méně vhodnými pro intenzivní zemědělství (Neher, 1999; Huang et al., 2022).

Tabulka 2 představuje nejčastěji pěstované plodiny na světě, jejich klasifikaci jako jednoleté nebo víceleté a plochu, na které se pěstují. Převaha jednoletých rostlin v zemědělství je zjevná, což odráží jejich schopnost rychlého růstu a vysoké produktivity, jak je popsáno v předchozích částech.

Tabulka 2. Hlavní zemědělské plodiny a jejich osevní plocha ve světě. (Faostat 2022)

	Rostlina	Plocha (ha)	Typ rostliny
1	Pšenice	219153830,00	Jednoletá
2	Kukuřice	203470007,00	Jednoletá
3	Rýže	165038826,00	Jednoletá
4	Sója	133791633,00	Jednoletá
5	Ječmen	47147005,00	Jednoletá
6	Sorghum	40762472,00	Jednoletá
7	Řepka nebo kolza	39965053,00	Jednoletá
8	Fazole, suché	36792490,00	Jednoletá
9	Kasava, čerstvá	32043055,00	Víceletá
10	Bavlna, nečištěná	31426734,00	Původně víceletá kulturní formy jednoleté
11	Podzemnice, bez skořápky	30536263,00	Jednoletá
12	Plody palmy olejné	30016500,00	Víceletá
13	Proso	29855214,00	Jednoletá
14	Slunečnicová semena	29257983,00	Jednoletá
15	Cukrová třtina	26089988,00	Víceletá



Obrázek 2. Procentuální zastoupení jednoletých a víceletých rostlin na základě dat uvedených v tabulce

Tabulka 2 a diagram demonstrují dominanci jednoletých rostlin v současném zemědělství. Data z tabulky ukazují, že z 15 nejčastěji pěstovaných plodin na světě je 93 % jednoletých rostlin. Tyto plodiny pokrývají většinu zemědělské půdy a tvoří základ moderního intenzivního zemědělství.

Nejčastěji pěstované plodiny – pšenice, rýže a kukuřice – dominují v globálním zemědělství a zajišťují většinu světové potravinové produkce (Faostat 2022). Tyto kultury se přizpůsobily intenzivním zemědělským praktikám a vyžadují vysoké vstupy živin pro dosažení maximálního výnosu. Jednoleté rostliny, jako jsou pšenice a rýže, mají schopnost rychle růst a přinášet pravidelnou úrodu. Tato vlastnost jim umožnila stát se základem moderního zemědělství, kde je prioritou efektivita a rychlá produkce potravin.

V procesu domestikace jednoleté rostliny přešly od konzervativní strategie (zaměřené na uchovávání zdrojů a přežití) k akviziční strategii (rychlé využívání zdrojů a reprodukce). Tato změna strategie byla klíčová pro jejich úspěch v podmínkách intenzivního zemědělství bohatého na zdroje (Vilela a González-Paleo, 2015).

Nicméně tento proces byl doprovázen řadou změn. Domestikace jednoletých rostlin vyžadovala významné investice do hnojiv a ochrany proti škůdcům. Domestikované plodiny se staly závislými na lidském zásahu, což zvýšilo jejich zranitelnost vůči vnějším stresům a zatížilo půdu (Crews et al., 2018).

Víceleté rostliny, i přes jejich pomalejší domestikaci, také hrály důležitou roli v hospodářství. Mezi jejich výhody patří hluboké kořenové systémy, které zlepšují strukturu půdy a přispívají k dlouhodobé udržitelnosti ekosystému (Neher, 1999). V přírodních ekosystémech víceleté rostliny dominují a mají schopnost podporovat stabilitu půdy, podporují koloběh živin a přispívají k dlouhodobé produktivitě půdy (Vilela a González-Paleo, 2015). V raných fázích zemědělství byly víceleté plodiny ceněny za svou trvanlivost a schopnost přinášet plody po několik let bez nutnosti každoročního znovuoobnovení výsadby (Meyer et al., 2012; Purugganan a Fuller, 2009).

Tímto způsobem se jednoleté rostliny staly dominantními díky své vysoké produktivitě a rychlosti růstu, zatímco víceleté plodiny nadále hrají důležitou roli díky své odolnosti a schopnosti podporovat zdraví půdy (Vilela a González-Paleo, 2015; Neher, 1999).

Víceleté rostliny mají nicméně potenciál přispět k udržitelnějšímu zemědělství. V současnosti se zkoumají možnosti zrychlené domestikace víceletých plodin a jejich křížení s jednoletými rostlinami za účelem kombinace výhod obou strategií – například vysoké produktivity jednoletých a odolnosti víceletých rostlin (Zilinsky, 1973; Chapman et al., 2022). Tyto přístupy

mohou pomoci snížit náklady spojené s každoroční orbou a hnojením a přispět ke zlepšení kvality půdy.

4.1.2 Organoleptické vlastnosti

Jedním z prvních kritérií pro výběr rostlin byly jejich organoleptické vlastnosti. Lidé dávali přednost rostlinám s lepší chutí, menší hořkostí a nižší toxicitou. V průběhu domestikace se právě tyto charakteristiky nejvíce změnily. Domestikace změnila sekundární metabolity rostlin, které odpovídají za chuť, pigmentaci a toxicitu (Purugganan a Fuller, 2009; Meyer et al., 2012). Tyto změny učinily rostliny vhodnějšími pro konzumaci a následně pro masové pěstování.

Nicméně změny spojené se snížením sekundárních metabolitů měly také vliv na půdu. Sekundární metabolity u rostlin hrají klíčovou roli v ochraně před býložravci a patogeny a jejich snížení má řadu důsledků.

Jednou z hlavních strukturálních složek rostlin je lignin, který vzniká z fenolických sloučenin, jež se rovněž podílejí na syntéze sekundárních metabolitů. Selektce rostlin zaměřená na snížení hořkosti a toxicity byla doprovázena změnami metabolismu fenolických sloučenin, což ovlivňuje syntézu ligninu (García-Palacios et al., 2013; Cornwell a Cornelissen, 2013). Nižší obsah ligninu v rostlinných zbytcích zlepšuje jejich rozklad a podporuje akumulaci organické hmoty v půdě. Tyto změny v chemickém složení rostlin však mohou urychlit kolběh živin, což vede ke snížení zásob uhlíku v půdě a její degradaci (Delgado-Baquerizo et al., 2016).

4.1.3 Mykorhiza

Jedním z důležitých faktorů, které ovlivnily výběr rostlin pro domestikaci, byla schopnost rostlin vytvářet symbiózu s mykorhizními houbami. Rostliny s aktivní mykorhizou měly na počátku zemědělství zjevné výhody, protože mykorhiza jim pomáhala efektivně využívat omezené přírodní zdroje, jako je fosfor, a hrály klíčovou roli při podpoře zdravé půdy a funkčnosti ekosystémů (Helgason & Fitter, 2009; Sawers et al., 2018). Tato schopnost zajišťovala dlouhodobou stabilitu přírodních ekosystémů.

Nicméně s rozvojem intenzivního zemědělství a začátkem ošetřování půdy chemickými hnojivy, se staly preferovanější rostliny, které nejsou závislé na mykorhize. Tento trend urychlil selekci a vytvoření vysoce výnosných plodin, neboť rostliny snadněji adaptují na podmínky s dostupnými chemickými živinami (Huang et al., 2022; Helgason & Fitter, 2009). Procesy domestikace a selekce na vysokou produktivitu vedly k významnému snížení závislosti rostlin na mykorhize, což mělo za následek snížení počtu mykorhizních hub v půdě a omezení schopnosti rostlin

efektivně využívat přirozené symbiotické vztahy pro zlepšení absorpce živin a odolnosti vůči stresům (Martín-Robles et al., 2018; Sawers et al., 2018; Li et al., 2024; Yang et al., 2022).

Změny v genetické regulaci, které nastaly během domestikace, mohou oslabit reakci rostlin na mykorhizní signály, což snižuje jejich obranyschopnost proti nemocem a schopnost adaptace na nepříznivé podmínky (Huang et al., 2022). Tento trend vyvolává otázky o budoucích výzvách v zemědělství, zejména o potřebě nalezení rovnováhy mezi výnosy a udržitelností ekosystémů. Přítomnost mykorhizních hub může zvýšit odolnost rostlin proti kontaminaci těžkými kovy a podporovat fytořemediaci, což naznačuje, že zachování a podpora těchto symbiotických vztahů by mohla hrát klíčovou roli v rozvoji udržitelnějších zemědělských praxí (Bâ et al., 2023).

Změny v symbiotických vztazích mezi rostlinami a mykorhizními houbami, vyvolané domestikací a intenzivním zemědělstvím, představují důležité upozornění na potřebu hledání rovnováhy mezi vysokou produktivitou a udržitelností v zemědělství. Ztráta mykorhizních interakcí může mít dlouhodobé důsledky pro zdraví rostlin a plodnost půdy. Je nezbytné integrovat poznatky o významu mykorhizy do moderních zemědělských strategií, aby bylo možné zvýšit odolnost rostlin a snížit jejich závislost na chemických hnojivech.

4.2 Vliv dalšího šlechtění na vlastnosti rostlin ovlivňující půdu

Šlechtění rostlin je proces výběru a křížení rostlin s cílem zlepšit jejich vlastnosti, jako je vyšší výnosnost, lepší adaptace na specifické podmínky pěstování a zvýšení odolnosti proti stresům. Tento proces má klíčovou roli v moderním zemědělství, které čelí výzvám, jako je rostoucí světová populace a změna klimatu. Šlechtění nejen zvyšuje produktivitu plodin, ale může také ovlivnit různé aspekty půdního prostředí. Vliv šlechtění na půdu je komplexní, zahrnuje změny v kořenové architektuře a distribuci biomasy, které mohou ovlivnit kvalitu a strukturu půdy. Tyto změny mají dlouhodobý dopad na dostupnost živin, mikrobiální aktivitu a stabilitu půdy, což může ovlivnit udržitelnost zemědělských systémů (Bradshaw, 2017). Historicky, jak farmáři vybírali rostliny pro pěstování, vznikaly tisíce místně adaptovaných odrůd. Zásadním mezníkem v procesu šlechtění byla tzv. Zelená revoluce v 60. letech 20. století, která přinesla snahu přesměrovat biomasy směrem k plodinám s vyšší výnosností. Tento proces byl často na úkor ekologické stability a vedl ke zvýšené závislosti zemědělství na hnojivech a zavlažování (Frouz & Frouzová, 2021). Moderní šlechtění však vedlo k nahrazení místně adaptovaných odrůd vysokovýnosnými kultivary, což mělo významný vliv na půdní dynamiku a ekologické procesy (Brummer et al., 2011).

4.2.1 Změna kořenové architektury

Domestikace rostlin ovlivnila jejich kořenový systém a změnila jeho architekturu. Různé adaptace moderních odrůd mají své pozitivní i negativní dopady na půdu.

U rostlin se prvními z půdy vyvíjejí tzv. semenné primární kořeny. Ty se podílejí na počátečním ukotvení rostliny v půdě a na absorpci vody a živin. V procesu domestikace zaměřené na vysokou produktivitu adaptovaly rostliny svůj kořenový systém zvýšením počtu semenných kořenů (Alam a Purugganan, 2024).. To umožňuje rostlinám rychleji využít dostupné zdroje půdy. V podmínkách intenzivního zemědělství se rostliny s větším počtem semenných kořenů ukazují jako efektivnější, protože se lépe přizpůsobují vysoké koncentraci hnojiv v horních vrstvách půdy a snižují podzemní konkurenci o zdroje při husté výsadbě

Další adaptací kořenů rostlin v procesu domestikace bylo zvýšení počtu tenkých kořenů. Ty mají větší povrch kontaktu s půdou a rychleji absorbují živiny, což umožňuje rostlinám zrychlit růst. V podmínkách intenzivního zemědělství s pravidelným zavlažováním a hnojením jsou tenké kořeny také přizpůsobenější, protože nevyžadují hluboké pronikání do půdy pro získávání živin. Nicméně tento typ kořenů je kvůli své tenkosti méně trvanlivý. Zatímco podporují rychlejší rozklad organické hmoty a uvolňování živin do půdy (Marschner et al., 2012), jejich snížená schopnost stabilizovat strukturu půdy může v dlouhodobém horizontu vést k degradaci půdy (Szoboszlay et al., 2015).

U domestikovaných rostlin jsou kořeny častěji umístěny blíže k povrchu půdy. To je další adaptace na zemědělské podmínky, protože živiny a voda jsou dodávány člověkem do horních vrstev půdy. Tento typ kořenů je méně efektivní při získávání zdrojů z hlubších vrstev, což omezuje odolnost vůči přírodním stresům, například suchu (Martín-Robles et al., 2019).

Primitivní, nedomestikované odrůdy rostlin měly rozmanitější kořenové systémy. To bylo nezbytné k tomu, aby rostliny mohly efektivně využívat zdroje na různých úrovních půdy v méně úrodných podmínkách. Kořenový systém domestikovaných rostlin byl však výrazně zjednodušen v důsledku selekce zaměřené na výnosy, což vedlo k homogenizaci kořenů (Szoboszlay et al., 2015). Moderní odrůdy rostou v úrodných půdách kontrolovaných lidmi, a proto již nepotřebují složitě rozvětvené kořeny (Martín-Robles et al., 2019).

Adaptace kořenového systému v procesu domestikace byly zaměřeny na zvýšení produktivity, ale na úkor odolnosti a adaptability. Moderní rostliny jsou závislé na lidské péči a více náchylné k environmentálním stresům, jako jsou sucha nebo degradace půdy (Alam and Purugganan, 2024; Szoboszlay et al., 2015; Martín-Robles et al., 2019).

4.2.2 Změny v podílu kořenů v celkové biomase

V procesu domestikace bylo hlavní pozornost zaměřena na zvýšení nadzemní biomasy (listy, stonky a plody), protože tyto části rostlin jsou přímo spojeny s produktivitou. Tento posun vedl ke snížení podzemní biomasy, což mělo zásadní dopady (Lv et al., 2019; Roucou et al., 2018).

Primitivní odrůdy vznikaly v podmínkách omezených zdrojů, což podporovalo vývoj hlubokých a rozvětvených kořenů, které umožňovaly efektivní získávání vody a živin (Waines a Ehdaie, 2007; Lv et al., 2019). Naopak moderní odrůdy byly šlechtěny pro pěstování v intenzivních zemědělských systémech, kde jsou zdroje dodávány externě (Li et al., 2014). To odstranilo potřebu hlubokých kořenů a vedlo k vývoji povrchovějších kořenů, které lépe využívají živiny koncentrované v horních vrstvách půdy, zatímco jejich schopnost čerpat zdroje z hlubších vrstev půdy byla výrazně snížena (Fradgley et al., 2020; Roucou et al., 2018).

Primitivní odrůdy měly vyváženější rozložení nadzemní a podzemní biomasy, což zlepšovalo jejich adaptabilitu na stresové podmínky, jako je sucho (Lv et al., 2019). Zvýšení nadzemní biomasy u moderních rostlin zlepšilo fotosyntetickou kapacitu a výnosy, což bylo hlavním cílem šlechtění (Roucou et al., 2018; Li et al., 2023). Na druhé straně menší kořenové systémy zhoršily schopnost půdy udržet strukturální stabilitu, což ji činí náchylnější k erozi a snižuje její schopnost zadržovat vodu a živiny (De Baets et al., 2007; Fradgley et al., 2020).

Snížení kořenové biomasy u moderních odrůd také vedlo ke snížení interakce s půdní mikrobiotou. Méně kořenů znamená méně organických látek vylučovaných do půdy, což omezuje zdroje pro mikrobiální společenstva a snižuje jejich rozmanitost (Roucou et al., 2018; García-Palacios et al., 2013). Dále selekce zaměřená na zvýšení výnosů snížila podzemní konkurenci mezi rostlinami, což umožnilo vyšší hustotu výsadby a zvýšení produktivity (Li et al., 2023).

Změny způsobené procesem domestikace zlepšily produktivitu rostlin a jejich adaptaci na intenzivní zemědělství. Tento pokrok však byl vykoupen ztrátou klíčových adaptivních vlastností, jako je schopnost efektivního využívání zdrojů v podmínkách stresu, udržování stability půdy a interakce s mikrobiotou (Delgado-Baquerizo et al., 2016; García-Palacios et al., 2013; Roucou et al., 2018).

Posun rovnováhy mezi nadzemní a podzemní biomasou, snížení kořenové hmoty a omezení diverzity půdní mikrobioty zvýšily závislost moderních odrůd na vnějších vstupech, jako jsou hnojiva a zavlažování (Fradgley et al., 2020; Li et al., 2023). Pro udržitelné zemědělství a vyšší odolnost vůči změnám klimatu je důležité při šlechtění nových odrůd zohlednit vlastnosti

kořenů. Zachování a zlepšení těchto vlastností může přispět nejen k vyšší produktivitě, ale také k ekologické stabilitě zemědělských systémů (Lv et al., 2019; Waines a Ehdaie, 2007).

4.2.3 Změny stechiometrie v půdě

Jedním z nejdůležitějších důsledků domestikace rostlin je změna stechiometrie půdy, tj. Poměru chemických prvků v půdě, které ovlivňují mikrobiální společenstvo, zdraví rostlin a půdy. V procesu domestikace byly vybírány rostliny s rychlým růstem, což vedlo k odpovídajícím adaptacím v jejich chemickém složení. Rychle rostoucí rostliny vyžadují více dusíku (N) a fosforu (P) pro podporu syntézy bílkovin, nukleových kyselin a energetických molekul, což vedlo k vyšším koncentracím těchto prvků ve vztahu k uhlíku v rostlinných tkáních (Delgado-Baquerizo et al., 2016; García-Palacios et al., 2013), především v kořenových tkáních (Isaac et al., 2021). Dále došlo ke snížení obsahu ligninu, který hraje klíčovou roli v odolnosti rostlin, ale zpomaluje rozklad rostlinných zbytků (Cornwell & Cornelissen, 2013).

Toto snížení obsahu ligninu zlepšilo kvalitu opadu, což podpořilo rychlejší rozklad organického materiálu a tím urychlení koloběhu živin. To zároveň snížilo poměry C:N a C:P v půdě a přispělo k větší dostupnosti živin pro rostliny (García-Palacios et al., 2013). Tyto změny v chemickém složení opadu stimulovaly půdní mikrobiální společenstva, čímž zvýšily aktivitu mikroorganismů a urychlily biogeochemické procesy v půdě (Delgado-Baquerizo et al., 2016; Cornwell & Cornelissen, 2013).

Nicméně, existují i negativní dopady. Snížení zásob uhlíku v půdě, stejně jako ligninu, který je bohatý na uhlík, má negativní důsledky pro dlouhodobou stabilitu půdy a její schopnost zadržovat organickou hmotu. Zlepšení kvality opadu vede k rychlému uvolnění uhlíku ve formě CO₂ do atmosféry místo jeho ukládání v půdě, což zvyšuje emise oxidu uhličitého. Uhlík hraje klíčovou roli při snižování eroze, zadržování vody, udržování úrodnosti a zlepšování provzdušňování půdy. Snížení obsahu uhlíku v půdě tak snižuje její ekologické funkce, činí ji méně stabilní a více náchylnou k degradaci, což negativně ovlivňuje ekosystémy a zemědělství (Delgado-Baquerizo et al., 2016; García-Palacios et al., 2013; Cornwell & Cornelissen, 2013; Isaac et al., 2021).

4.2.4 Změna mikrobiomu

Vzhledem k selekci zaměřené na intenzivní pěstování pro maximalizaci výnosu se rostliny přestaly soustředit na ochranu a interakci s mikrobiotou a více na přijímání živin a růst. Tyto adaptace vedly k významným změnám v mikrobiomu rizosféry. Na změnu mikrobiomu mělo vliv několik faktorů. Rizosférní mikrobiota je regulována exsudáty rostlin, které se nacházejí na konečcích kořenů, a proto změny v kořenech nebo chemické změny metabolitů ovlivňují

mikrobiom (Pérez-Jaramillo et al., 2016). Svůj podíl na změnách má i zemědělská technika, jako jsou hnojiva a pesticidy (Pérez-Jaramillo et al., 2016).

Zkrácení kořenového systému přímo ovlivnilo množství uvolňovaných exsudátů a tím i složení mikrobioty. Menší množství kořenů znamená i menší množství uvolněných exsudátů a snížení rozmanitosti mikrobioty, protože menší množství exsudátů vede ke snížení výživy pro mikroby. To činí rostliny více závislé na hnojivech a jiných zemědělských praktikách pro udržení zdraví a růstu (Nerva et al., 2022; Glazko et al., 2021).

Divoké rostliny mají chemické složení exsudátů, které je schopné chránit je před patogeny a stresem. U domestikovaných rostlin, které mají strategii zaměřenou na růst a produktivitu, je mikrobiom zaměřen na lepší příjem živin. V tomto případě změny v exsudátech vedou k dominanci těch mikrobů, které zlepšují příjem živin, ale nepodporují odolnost rostliny vůči vnějším hrozbám, jako jsou patogeny. Přírozený imunitní systém současných rostlin je oslaben v důsledku těchto změn v kořenových exsudátech, což vyžaduje větší zásah člověka (Yue et al., 2023; Soldan et al., 2021).

V mikrobiomu domestikovaných rostlin došlo také ke změnám v jejich funkcích. Domestikace snížila závislost na symbiotických mikrobech, které pomáhají rostlinám fixovat dusík ze vzduchu. V přírodě se rostliny na tyto mikroorganismy spoléhají pro získání dusíku, zatímco u domestikovaných rostlin tuto roli převzala hnojiva obsahující dusík. To vedlo k větší závislosti rostlin na vnějších zdrojích dusíku (Yue et al., 2023). Nicméně to neznamená, že všechny domestikované rostliny zcela ztratily schopnost fixovat dusík. Například u plodin, jako je vojtěška (*Medicago sativa*) a hrách (*Pisum sativum*), symbióza s bakteriemi rodu *Rhizobium* zůstává důležitou funkcí. Tato symbióza podporuje fixaci dusíku, i když intenzivní používání hnojiv může postupně snižovat její význam a dlouhodobě ovlivnit rovnováhu mezi rostlinou a jejím mikrobiomem (Goyal et al., 2021). Podobně s příchodem hnojiv došlo ke změnám ve způsobu přijímání fosforu. To vedlo k poklesu počtu mikroorganismů, které se podílejí na jeho rozpouštění, což opět znamenalo, že rostliny začaly být závislé na hnojivech pro zajištění dostatečného přísunu fosforu (Soldan et al., 2021).

Selekce rostlin v oblasti rizosféry mikrobioty vedla ke změnám ve strategii rychlého růstu a vysoké produktivity, což bylo umožněno díky zlepšené adaptaci rostlin a oslabení jejich přirozené imunity vůči patogenům (Yue et al., 2023; Soldan et al., 2021). Tyto změny učinily rostliny zranitelnějšími, protože ztratily schopnost přežít bez zavedení různých agronomických praktik (Glazko et al., 2021). Domestikované rostliny, bezpochyby skvělý zdroj potravy, však mají negativní dopad na půdu a rizosféry mikrobiotu (Pérez-Jaramillo et al., 2016; Glazko et al.,

2021), podkopávají odolnost přirozených ekosystémů a vyžadují značné náklady na udržení této rovnováhy (Soldan et al., 2021).

4.3 Rozvoj agrotechniky a pěstování domestikovaných rostlin

Změny v ekofyziologii rostlin šly ruku v ruce se změnami způsobu jejich pěstování, přičemž jedno ovlivňovalo druhé a obě měly zásadní dopad na půdu. Domestikace a šlechtění rostlin vedly k tomu, že rostliny s rychlejším růstem a vyšší produktivitou začaly vyžadovat intenzivnější způsoby pěstování. Tyto změny zahrnují především přechod na monokultury, zvýšené používání minerálních hnojiv a zavedení moderních agrotechnických praktik, které mění fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy (Delgado-Baquerizo et al., 2016; Geisseler & Scow, 2014). Naopak šlechtění plodin se zaměřovalo na vyšlechtění odrůd, schopných lépe využít vysokých dávek průmyslových hnojiv a jiných agrotechnických opatření (Frouz a Frouzová 2021)

4.3.1 Kultivace půdy

Zpracování půdy je důležitý agrotechnický proces zaměřený na vytvoření optimálních podmínek pro pěstování plodin. V přirozených ekosystémech dělají disturbance, jako jsou požáry nebo záplavy, holé půdy bez vegetace, na kterých mohou rychle růst jednoleté rostliny. Obdělávání půdy napodobuje tyto přirozené podmínky, vytváří podobné otevřené plochy, kde chybí konkurence jiných rostlin. Tím se usnadňuje růst zemědělských plodin. V rámci šlechtění kulturních rostlin lidé záměrně vybírali druhy a odrůdy, které byly nejvíce produktivní v disturbovaných podmínkách, tedy rostliny s krátkým životním cyklem, schopné rychle využít hnojiva a vodu, a s kompaktním kořenovým systémem. Výsledkem je, že disturbance se stala nejen základem přirozených procesů, ale i základem zemědělských praktik. Šlechtění dále posílilo závislost kulturních rostlin na těchto umělých podmínkách, protože právě v nich vykazují maximální produktivitu. V divoké přírodě nebo na neobdělávané půdě jsou takové rostliny méně konkurenceschopné (Kulmatiski et al., 2006).

Dnes rozlišujeme tři hlavní skupiny: tradiční, minimální a konzervační (nulové) zpracování. Tradiční orba zahrnuje intenzivní převrácení ornice, což pomáhá eliminovat plevel a zlepšovat provzdušňování půdy (Lal, 1991 & 1993). Minimální zpracování omezuje mechanický zásah, zachovává strukturu půdy a snižuje riziko její degradace (Karlen et al., 1994). Konzervační zpracování jako nejšetrnější metoda minimalizuje nebo zcela eliminuje mechanické zásahy, čímž podporuje zachování přirozeného stavu půdy (Kladivko, 2001; Roger-Estrade et al., 2010).

Metody zpracování půdy byly známy již od dávných dob. První zemědělci používali jednoduché nástroje, jako například hole, k nakypření půdy před výsevem (Derpsch, 2004). Během zemědělské revoluce (17.–19. Století) v Evropě umožnil kovový pluh efektivní zpracování těžkých půd, což hrálo klíčovou roli ve vývoji tradiční orby (Derpsch, 2004). V posledních desetiletích se však v důsledku problémů, jako je eroze a degradace půdy, přesunul důraz na metody s minimálním dopadem (Kabir, 2005).

Hlavními cíli zpracování půdy jsou zlepšení provzdušňování, kontrola plevelů, integrace organických látek a udržení vodní bilance. Tyto praktiky podporují růst kořenového systému rostlin a zvyšují výnosy (Lal, 1991; Li et al., 2024). Tradiční orba má však i značné nevýhody. Intenzivní mechanické zásahy narušují strukturu půdy, snižují obsah organických látek a činí půdu náchylnější k erozi (Kabir, 2005). Tradiční zpracování také ničí mikrobiologická společenstva, včetně mykorhizních hub, což zhoršuje úrodnost půdy (Kabir, 2005). Tyto problémy jsou doprovázeny vysokými náklady na palivo a techniku, což vytváří další ekonomický tlak na zemědělce (Li et al., 2024).

Při srovnání obdělávané půdy s přirozenými ekosystémy se objevují klíčové rozdíly. V přirozených ekosystémech půda nepodléhá mechanickým zásahům, což umožňuje zachování její struktury, biologické rozmanitosti a cyklů organických látek (Kabir, 2005; Kladivko, 2001). V těchto podmínkách hrají mykorhizní houby a další mikroorganismy klíčovou roli ve výživě rostlin, zatímco intenzivní zpracování narušuje tyto přirozené procesy (Kabir, 2005).

Konzervační metody zpracování, jako je nulové zpracování, jsou blíže přirozeným ekosystémům, protože zachovávají organické látky na povrchu půdy, snižují erozi a podporují přirozenou rovnováhu vody a živin (Roger-Estrade et al., 2010; Derpsch, 2004).

Přechod na minimální a nulové zpracování půdy byl odpovědí na hrozbu degradace půdy. Tyto metody umožňují zachovat její strukturu, zlepšit provzdušňování a vodní propustnost, což pozitivně ovlivňuje kořenový systém rostlin (Li et al., 2024). Navíc minimální zpracování podporuje zvýšení biologické rozmanitosti půdních mikroorganismů, včetně mykorhizních hub, které hrají klíčovou roli ve výživě rostlin a zdraví půdy (Kabir, 2005). Ekonomické výhody těchto metod jsou také zřejmé: zemědělci šetří na palivu a vybavení a půda zůstává odolná vůči erozi (Roger-Estrade et al., 2010; Derpsch, 2004).

Závěrem lze říci, že moderní přístupy ke zpracování půdy usilují o kombinaci produktivity a udržitelnosti. Šetrné metody přibližují obdělávanou půdu k přirozeným ekosystémům, zachovávají její biologickou rozmanitost a odolnost, což umožňuje minimalizovat ekologické škody a podporovat dlouhodobou produktivitu zemědělství.

4.3.2 Hnojiva

Hnojiva jsou látky přidávané do půdy za účelem zvýšení její úrodnosti. V přirozených ekosystémech probíhá koloběh živin a chemických prvků přirozeně, bez zásahu člověka, díky působení rozmanité mikrobioty a mykorhizních hub. Moderní kulturní rostliny však byly během procesu šlechtění přizpůsobeny tak, aby lépe reagovaly na vysoké dávky hnojiv, což umožňuje rychlejší růst a vyšší produktivitu. Tento záměrný výběr však vedl k řadě negativních důsledků, jako je vyšší závislost plodin na vnějších zdrojích živin a narušení přirozených půdních procesů (Frouz a Frouzová 2021). Kulturní plodiny reagují na přidavek hnojiv výrazně lépe než rostliny v přirozených porostech. Tento rozdíl je výsledkem dlouhodobého šlechtění, které upřednostňovalo rostliny s vysokou reakcí na dostupné živiny. Zatímco divoké rostliny si zachovávají schopnost růst v prostředí s nízkou dostupností živin, kulturní plodiny byly optimalizovány pro intenzivní zemědělství, což z nich činí závislé na vysokých dávkách hnojiv (Matesanz & Milla, 2018). Tento proces dále oslabuje jejich schopnost spolupracovat s půdní mikrobiotou a mykorhizními houbami, které hrají klíčovou roli v přirozených ekosystémech. V důsledku toho se půda v monokulturách stává méně stabilní a více závislá na vnějších zdrojích živin.

Hnojiva se dělí na minerální (syntetická) a organická (přírodní). Minerální hnojiva obsahují makro- a mikroprvky, jako jsou dusík (N), fosfor (P), draslík (K), zinek (Zn), hořčík (Mg) a další. Organická hnojiva se skládají z organických sloučenin a zahrnují materiály jako hnůj, kompost a ptáčí trus. Prvotní používání hnojiv v zemědělství bylo intuitivní a inspirované pozorováním přírody. Organická hnojiva, jako hnůj, kompost a ptáčí trus, byla tradičně využívána v zemědělských systémech, které napodobovaly přirozené ekosystémy, a umožňovala dlouhodobou obnovu úrodnosti půdy (Ali et al., 2009). S rozvojem zemědělství a vědeckého pokroku se přišlo na to, že určité makro- a mikroprvky mají pozitivní vliv na růst rostlin, zvyšují jejich produktivitu a zrychlují vývoj. Minerální hnojiva rychle doplňují deficit živin v půdě tím, že rostlinám poskytují dusík, fosfor, draslík a další prvky ve snadno dostupné formě (Singh & Ryan, 2015). Nicméně při jejich masovém zavádění do zemědělství nebyly zohledněny dlouhodobé dopady na půdu (Geisseler & Scow, 2014). Moderní přístupy k hnojení vycházejí z kombinace tradičních znalostí a vědeckého výzkumu, což umožňuje minimalizovat negativní vliv chemických látek (Krasilnikov et al., 2022).

Organická hnojiva po vpravení do půdy podléhají rozkladu za účasti půdních mikroorganismů. Tyto organismy využívají uhlík (C) obsažený v organickém materiálu jako zdroj energie. Při rozkladu se uvolňuje dusík, fosfor a další prvky potřebné pro růst rostlin. Uhlík se přeměňuje na humus – stabilní formu organické hmoty, která se v půdě dlouhodobě uchovává. Tyto procesy

napodobují přirozené ekosystémy, kde rozmanitá mikrobiota a organické zbytky přispívají k obnově půdy. Organická hnojiva zároveň podporují růst kořenů, které vylučují exsudáty a tím vyživují půdní mikroorganismy, zvyšují jejich biomasu a přispívají k tvorbě humusu (Ali et al., 2009; Howe et al., 2024). Tyto procesy vedou ke zvýšení obsahu organického uhlíku v půdě, stimulaci mikrobiální aktivity a posílení struktury půdy (Tahat et al., 2021).

Minerální hnojiva poskytují rostlinám dusík, fosfor, draslík a další prvky ve snadno dostupné formě. Kulturní plodiny, vyšlechtěné právě pro intenzivní zemědělství, jsou závislé na tyto živiny, protože jejich růst a výnosy byly optimalizované pro prostředí bohaté na makro- a mikroprvky (Frouz a Frouzová 2021). Dusíkatá hnojiva stimulují růst zelené hmoty tím, že se přeměňují na dusičnany (NO_3^-) nebo amonné ionty (NH_4^+), které rostliny absorbují kořeny. Při tomto procesu, známém jako nitrifikace, se uvolňují vodíkové ionty (H^+), což vede k okyselení půdy. Chemická rovnice nitrifikace:



Okyselení půdy narušuje přirozené procesy, typické pro přírodní ekosystémy, kde symbióza mezi rostlinami a mikroorganismy podporuje dlouhodobou stabilitu chemického složení půdy. Kyselé půdy snižují dostupnost základních prvků, jako je fosfor a vápník, zatímco hliník (Al) se uvolňuje a má toxický vliv na kořeny rostlin (Krasilnikov et al., 2022; Geisseler & Scow, 2014).

Fosforečná hnojiva negativně ovlivňují mykorhizní houby tím, že rostlinám poskytují snadno dostupný fosfor a tím eliminují potřebu mykorhizní symbiózy. To narušuje přirozené ekosystémové procesy, protože houby hrají klíčovou roli při získávání živin, jako je draslík a zinek (Tahat et al., 2021). Navíc vysoké koncentrace dusíku a fosforu mění chemické složení půdy, což snižuje rozmanitost půdních mikroorganismů. Snížení biodiverzity činí půdu méně odolnou vůči stresovým faktorům a dává výhodu patogenním organismům (Geisseler & Scow, 2014).

Intenzivní používání minerálních hnojiv má navíc dlouhodobý dopad na fyzikální vlastnosti půdy. Neobsahují organické látky, které podporují pórovitou strukturu půdy, což vede k jejímu zhutnění a snížení vodní propustnosti. Tyto změny, na rozdíl od přirozených procesů v ekosystémech, zvyšují náchylnost půdy vůči erozi a vyplavování živin (Ali et al., 2009; Howe et al., 2024).

Moderní doporučení pro použití hnojiv zahrnují kombinované používání organických a minerálních materiálů. Organická hnojiva mohou zmírnit mnoho negativních účinků chemických hnojiv. Hnůj a kompost neutralizují kyselost zvýšením pH půdy, snižují koncentraci minerálních

látek a zvyšují rozmanitost uhlíkových sloučenin. To vytváří příznivé podmínky pro mikroorganismy, podporuje obnovu mykorhizních hub a posiluje strukturu půdy (Tahat et al., 2021). Organické materiály, přeměněné na humus, zadržují dusičnany a fosfáty a zabraňují jejich vyplavování (Ali et al., 2009; Howe et al., 2024).

Minerální hnojiva zůstávají důležitá pro zemědělství díky své vysoké účinnosti, rychlosti působení a dostupnosti. Organická hnojiva naopak zajišťují dlouhodobé zdraví půdy a podporují přirozené procesy. Kombinovaný přístup umožňuje udržet rovnováhu mezi zachováním zdraví půdy a dosažením vysoké produktivity (Krasilnikov et al., 2022; Tahat et al., 2021).

4.3.3 Systémy zemědělství

Existují různé způsoby a praktiky využívání půdy pro pěstování zemědělských plodin. Každý systém zahrnuje výběr rostlin, způsoby jejich výsadby, péče a střídání, které závisí na přírodních, ekonomických a sociálních podmínkách. V přirozených ekosystémech je základem stability a produktivity biodiverzita – na jednom území roste mnoho druhů rostlin, které se vzájemně doplňují a podporují přirozené ekosystémové procesy, jako je koloběh živin, regulace vody a ochrana půdy před erozí (Crews et al., 2018; Lefroy et al., 1999). S rozvojem intenzivního zemědělství a technologických postupů však došlo k cílené selekci rostlin, která přizpůsobila kulturní plodiny podmínkám monokultur. Byly preferovány jednoleté rostliny s kompaktním kořenovým systémem, vyšší reakcí na hnojiva a schopností rychlého růstu, což umožnilo zvýšení produktivity (Altieri, 2009). V důsledku toho dnes v globálním měřítku dominují monokultury, vyznačující se pěstováním jedné plodiny na jednom poli po dlouhou dobu (Altieri, 2009; Suarez & Gwozdz, 2023). Tento systém sice zjednodušuje obhospodařování a mechanizaci, ale narušuje přirozené procesy v půdě a zvyšuje závislost na hnojivech a pesticidech. U polykultur je naopak na jedné ploše pěstováno několik plodin současně (Crews et al., 2018), což podporuje biodiverzitu a omezuje negativní vliv na půdu. Střídání různých plodin na jednom poli v průběhu let, známé jako osevní postup, napomáhá regeneraci půdy a omezuje výskyt škůdců (Hennessy, 2006). Každý z těchto přístupů ovlivňuje, jak efektivně jsou využívány půdní zdroje a ekosystémové služby, a má zásadní dopad na výnosy, zdraví půdy, biodiverzitu a dlouhodobou udržitelnost zemědělství (Lefroy et al., 1999).

Nejvíce pěstované potravinářské plodiny na světě – kukuřice, rýže, pšenice, sója (Faostat 2022) – jsou jednoleté rostliny a jsou pěstovány v monokulturách, s výjimečně vzácnými odchylkami (Altieri, 2009; Suarez & Gwozdz, 2023). Tyto plodiny byly během procesu selekce vyšlechtěny tak, aby se ještě lépe přizpůsobily intenzivnímu zemědělství. Jedním z klíčových výsledků této selekce bylo zmenšení a zjednodušení jejich kořenového systému. Kompaktní kořeny umožnily

roślinám efektywniejszy przyjmować składniki z powierzchniowych warstw gleby, co ułatwiło ich uprawę w monokulturach i zwiększyło produktywność (Hennessy, 2006). Nicméně tento proces měl vážné důsledky pro půdní ekosystémy. Redukce kořenového systému způsobila snížení interakce rostlin s půdními mikroorganismy, včetně mykorhizních hub, které hrají zásadní roli v přirozeném získávání živin, jako je fosfor a dusík (McKenna et al., 2020). Snížení rozsahu a rozmanitosti kořenových exsudátů vedlo k úbytku půdního mikrobiomu, což dále oslabilo přirozené cykly živin a schopnost půdy regenerovat se. Tyto změny zvýšily závislost na syntetických hnojivech, která se stala hlavním zdrojem živin pro tyto rostliny (Mishra, 2011). Na rozdíl od přirozených ekosystémů, kde různé druhy rostlin vzájemně spolupracují a přispívají k udržení biodiverzity půdy, monokultury eliminují přirozenou konkurenci a spolupráci mezi rostlinami. Rostliny stejného druhu pěstované na jednom poli rok co rok odebírají z půdy stále stejné živiny, což způsobuje rychlé vyčerpání půdy (Altieri, 2009). Nedostatek různorodé organické hmoty oslabuje půdní mikroorganismy a omezuje schopnost půdy podporovat zdraví rostlin a dlouhodobou úrodnost (Crews et al., 2018). Jednoleté rostliny pěstované v monokulturách nepodporují rozvoj složitých kořenových systémů, které by přispívaly ke stabilitě půdy. Dochází ke ztuhnutí půdy, ztrátě její propustnosti pro vzduch a vodu a zvyšuje se riziko eroze (Lefroy et al., 1999). Monokultury rovněž omezují přirozené procesy, jako je zadržování uhlíku, regulace vody a obnova živin (Suarez & Gwozdz, 2023). Tyto negativní důsledky dělají z monokultur neudržitelný systém z dlouhodobého hlediska (Hennessy, 2006).

V polykulturách se častěji využívají víceleté rostliny nebo kombinace jednoletých a víceletých plodin, což napodobuje přirozené ekosystémy (Crews et al., 2018). Různé druhy rostlin na jedné ploše se vzájemně doplňují a plní různé ekologické funkce. Například bobovité rostliny fixují dusík, čímž zvyšují jeho dostupnost v půdě, zatímco jiné plodiny svými hlubokými kořeny zlepšují strukturu půdy a zabraňují erozi (Mishra, 2011). Tento přístup nejen napodobuje přirozené procesy, ale také výrazně snižuje závislost na chemických hnojivech a pesticidech, protože vyšší biodiverzita omezuje šíření škůdců a patogenů (Iverson et al., 2014). Víceleté polykultury navíc umožňují lepší uchovávání živin v půdě a podporují její dlouhodobou úrodnost. Rostliny s různou délkou životního cyklu a kořenovými systémy společně zvyšují schopnost půdy regenerovat se a zachovat přirozený koloběh živin (Crews et al., 2018; Lefroy et al., 1999). Tento systém rovněž pomáhá obnovovat ekosystémy a udržovat biodiverzitu, což je zásadní pro dlouhodobou stabilitu zemědělství. Jednoleté rostliny mohou být také součástí polykultur, ale jejich pěstování je efektivnější v kombinaci s víceletými plodinami. Tato kombinace umožňuje synergický efekt, kdy různé plodiny vzájemně zlepšují své podmínky růstu, čímž zvyšují produktyvnost i udržitelnost celého systému (Iverson et al., 2014).

Osevní postup je jednou z nejúčinnějších a nejudržitelnějších zemědělských praktik, známou již od pradávna (Hennessy, 2006). Princip fungování osevního postupu je založen na pozitivní heterovazbě PSF (Plant-Soil Feedback), tedy na tom, že jedna rostlina zlepšuje stav půdy a vytváří příznivé podmínky pro růst jiných druhů plodin (McKenna et al., 2020). Různé rostliny využívají různé živiny a zanechávají v půdě organickou hmotu, která je užitečná pro následné plodiny (Mishra, 2011). Využití osevního postupu snižuje koncentraci patogenů, protože při změně plodin ztrácejí patogeny v půdě svého „hostitele“ (Hennessy, 2006). Kořeny různých plodin vylučují do půdy různé exsudáty, což podporuje rozmanitost půdních mikroorganismů a hub (McKenna et al., 2020). Víceleté plodiny mohou být také součástí osevního postupu pro obnovu půdy a zvýšení její odolnosti (Crews et al., 2018).

Kombinace polykultur a osevního postupu spojuje výhody obou systémů pro zvýšení udržitelnosti zemědělství. Na jednom poli se pěstují polykultury a poté se střídají s jinými sadami plodin (Iverson et al., 2014). To zvyšuje zadržování živin, snižuje erozi a pomáhá kontrolovat patogeny (Lefroy et al., 1999). Nicméně to není univerzální, protože je nutné přizpůsobit se místním podmínkám, včetně typu půdy, klimatu a ekonomiky (Suarez & Gwozdz, 2023).

Přechod k efektivnějším a ekologicky odpovědnějším způsobům využívání půdy je pro moderní zemědělství nesmírně důležitý. Zavádění nových technologií, zvyšování úrovně informovanosti zemědělců a státní podpora jsou klíčové kroky k prevenci další degradace půdy a zajištění udržitelnosti zemědělských systémů. Rovnováha mezi produktivitou a rozumným využíváním ekosystémových služeb by měla být základem moderní zemědělské politiky.

4. Závěr

V úvodu této práce byly položeny tři klíčové otázky: 1) jaké faktory ovlivnily výběr rostlin pro domestikaci a jaké důsledky to mělo; 2) jak šlechtění zaměřené na produktivitu změnilo chemické a fyzikální vlastnosti půdy; 3) jaké moderní techniky mohou minimalizovat negativní dopady na půdu.

Na základě analýzy dostupné literatury bylo zjištěno, že hlavním faktorem při výběru rostlin pro domestikaci byla jejich produktivita (Abbo et al., 2017). To vedlo k zaměření na vlastnosti, které zvyšovaly výnosy, jako je krátký životní cyklus, což bylo spojeno s řadou změn, například s jednodušší strukturou kořenového systému. Kořeny domestikovaných rostlin se staly méně hlubokými a méně rozvětvenými, což významně ovlivnilo jejich schopnost udržovat strukturu půdy, zadržovat vlhkost a předcházet její erozi (Alam and Purugganan, 2024; Szoboszlai et al., 2015; Martín-Robles et al., 2019). Na rozdíl od víceletých rostlin, které mají stabilnější kořenový systém a aktivně interagují s mikrobiálním společenstvím, jednoleté plodiny přispívají k půdní degradaci nižším množstvím organické hmoty (Pérez-Jaramillo et al., 2016; Roucou et al., 2018; García-Palacios et al., 2013)

Šlechtění zaměřené na zvýšení výnosů vedlo k tomu, že současné kulturní plodiny se staly závislými na antropogenních zásazích (Glazko et al., 2021; Fradgley et al., 2020; Li et al., 2023; Yue et al., 2023). Postupné změny chemického složení půdy, způsobené šlechtěním a intenzivním používáním hnojiv, vedly ke snížení její úrodnosti. Například ztráta symbiotických vazeb s arbuskulárními mykorhizními houbami a zhoršení mikrobiální rozmanitosti brání přirozené obnově živin (Martín-Robles et al., 2018; Sawers et al., 2018). To se obzvláště projevuje při pěstování monokultur, které půdu vyčerpávají a vyžadují neustálé vnější zásahy k udržení produktivity rostlin (McKenna et al., 2020).

Nesprávné používání hnojiv, absence střídání plodin a zjednodušené zemědělské postupy zhoršily celkový stav půdních ekosystémů (FAO 2018). Nadměrné používání chemických hnojiv vedlo k okyselení půdy, zvýšení eroze a snížení obsahu organického uhlíku. Tyto procesy již způsobily závažné důsledky, včetně degradace úrodné půdy, což ohrožuje potravinovou bezpečnost v mnoha regionech světa.

Pro zastavení další degradace půdy nabízejí moderní agrotechnologie několik řešení. Patří mezi ně přechod od jednoletých monokultur k polykulturám, které zvyšují biologickou rozmanitost a zlepšují strukturu půdy. Klíčové jsou také metody střídání plodin, které napomáhají obnově rovnováhy živin v půdě, využívání organických hnojiv a konzervační nebo minimální zpracování

půd. Tyto metody podporují mikrobiální společenstva a přispívají ke zlepšení zdraví půdy. Tyto postupy však vyžadují nejen zavádění, ale i aktivní informování zemědělců a státních orgánů o významu udržitelných zemědělských praktik.

Závěrem této práce lze říci, že lidstvo musí přehodnotit svůj přístup k využívání půdy. Je nezbytné přejít od intenzivní exploatace k vyváženým přístupům, které zohledňují produktivitu rostlin i zdraví ekosystémů. Ochrana úrodné půdy není jen výzvou pro zemědělství, ale pro celou společnost. Vyžaduje mezioborový přístup a koordinaci úsilí na všech úrovních.

5. Seznam literary

1. Aerts, R. (1997). Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 79(3), 439–449.
2. Abbo, S., Gopher, A., & Lev-Yadun, S. (2017). The domestication of crop plants. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 3, 50–54.
3. Alam, O., & Purugganan, M. D. (2024). Domestication and the evolution of crops: variable syndromes, complex genetic architectures, and ecological entanglements. *The Plant Cell*, 36(5), 1227–1241.
4. Ali, M. E., Islam, M. R., & Jahiruddin, M. (2009). Effect of integrated use of organic manures with chemical fertilizers in the rice-rice cropping system and its impact on soil health. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 34(1), 81–90.
5. Altieri, M. A. (2009). Green deserts: Monocultures and their impacts on biodiversity. In Emanuelli MS, Jons J, Monsalve S, Eds. *Red Sugar, Green Deserts: Latin American Report on Monocultures and Violations of the Human Rights to Adequate Food and Housing, to Water, to Land and to Territory*. Sweden: FIAN International, 67-76.
6. Ardestani, M. M., & Frouz, J. (2020). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus intraradices* and other microbial groups affect plant species in a copper-contaminated post-mining soil. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 62, 126594.
7. Bâ, A. M., Guissou, T., Thioye, B., Duponnois, R., Fall, F., & Sylla, S. N. (2023). Arbuscular mycorrhizal symbiosis is a key factor to domesticate *Ziziphus mauritiana* Lam. in orchards. *South African Journal of Botany*, 160, 166-179.
8. Bardgett, R. D., & Wardle, D. A. (2010). *Aboveground-Belowground Linkages: Biotic Interactions, Ecosystem Processes, and Global Change*. Oxford University Press.
9. Bergmann, J., Verbruggen, E., Heinze, J., Xiang, D., Chen, B., Joshi, J., & Rillig, M. C. (2016). The interplay between soil structure, roots, and microbiota as a determinant of plant-soil feedback. *Ecology and Evolution*, 6(18), 7633–7644.
10. Bever, J. D. (2003). Soil community feedback and the coexistence of competitors: Conceptual frameworks and empirical tests. *New Phytologist*, 157(3), 465-473.
11. Bever, J.D., Westover, K.M., & Antonovics, J. (1997). Incorporating the soil community into plant population dynamics: the utility of the feedback approach. *Journal of Ecology*, 85(5), 561-573.
12. Bezemer, T. M., Lawson, C. S., Hedlund, K., Edwards, A. R., Brook, A. J., Igual, J. M., Mortimer, S. R., & Van Der Putten, W. H. (2006). Plant species and functional group

- effects on abiotic and microbial soil properties and plant-soil feedback responses in two grasslands. *Journal of Ecology*, 94(5), 893-904.
13. Bradshaw, J. E. (2017). Plant breeding: past, present and future. *Euphytica*, 213.
 14. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils* (14th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
 15. Briggs, D. (2009). *Plant Microevolution and Conservation in Human-influenced Ecosystems*. Cambridge University Press.
 16. Brummer, E. C., Barber, W. T., Collier, S. M., Cox, T. S., Johnson, R., Murray, S. C., Olsen, R. T., Pratt, R. C., & Thro, A. M. (2011). Plant breeding for harmony between agriculture and the environment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 561-568.
 17. Brundrett, M. (2004) Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*, 79(3), 473-495
 18. Callaway, R. M., & Ridenour, W. M. (2004). Novel weapons: Invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(8), 436-443.
 19. Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59–67.
 20. Chapman, E., & Williams, D. (2022). Perennials as Future Grain Crops: Opportunities and Challenges. *Frontiers In Plant Science*(13).
 21. Comas, L. H., Callahan, H. S., & Midford, P. E. (2014). Patterns in root traits of woody species hosting arbuscular and ectomycorrhizas: Implications for the evolution of belowground strategies. *International Journal of Plant Sciences*, 175(1), 45–55.
 22. Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., ter Steege, H., Morgan, H. D., van der Heijden, M. G. A., Pausas, J. G., & Poorter, H. (2003). Handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335–380.
 23. Cornelissen, J. H. C., Aerts, R., Cerabolini, B., Werger, M. J. A., & van der Heijden, M. G. A. (2001). Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy. *Oecologia*, 129(4), 611-619.
 24. Cornwell, W. K., & Cornelissen, J. H. (2013). A broader perspective on plant domestication and nutrient and carbon cycling. *New Phytologist*, 198(2), 331-333.

25. Crews, T. E., Carton, W., & Olsson, L. (2018). Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures. *Global Sustainability*, 1, e11
26. Da, F., Fan, C., Zhang, C., Zhao, X., & Gadow, K. (2023). Are absorptive root traits good predictors of ecosystem functioning? A test in a natural temperate forest. *New Phytologist*, 239(1), 75-86.
27. De Baets, S., Poesen, J., Knapen, A., & Galindo, P. (2007). Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant and Soil*, 294(1-2), 169–183.
28. Delgado-Baquerizo, M., Reich, P. B., García-Palacios, P., & Milla, R. (2016). Biogeographic bases for a shift in crop C: N: P stoichiometries during domestication. *Ecology Letters*, 19(5), 564-575.
29. Denham, T., Barton, H., Castillo, C., Crowther, A., Dotte-Sarout, E., Florin, S. A., Fuller, D. Q., et al. (2020). The domestication syndrome in vegetatively propagated field crops. *Annals of Botany*, 125(4), 581-597.
30. Derpsch, R. (2004) – History of crop production, with and without tillage. *Leading Edge*, 3(1), 150–154.
31. Diamond, J. And P. Bellwood (2003). *Farmers and Their Languages: The First Expansions*. *Science*, 300, 597 – 603.
32. Duret, M., Wallner, A., Buée, M., & Aziz, A. (2024). Root microbiome assembly, its drivers, and functions in the health of perennial woody plants. *Microbiological Research*, 287, 127860.
33. Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., & Böhm, W. (1983). Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research*, 3(3), 261-275.
34. FAO. (2018). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Managing systems at risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
35. FAO. (2022). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
36. FAOSTAT (2022) *Organizace pro výživu a zemědělství OSN (FAO)*
37. Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B., & Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(40), 10572–10577.
38. Filser, J., Faber, J. H., Tiunov, A. V., Brussaard, L., Frouz, J., De Deyn, G., et al. (2016). Soil fauna: key to new carbon models. *SOIL*, 2(4), 565–582.

39. Fradgley, N., Evans, G., Biernaskie, J. M., Cockram, J., Marr, E. C., Oliver, A. G., ... & Jones, H. (2020). Effects of breeding history and crop management on the root architecture of wheat. *Plant and Soil*, 452, 587-600.
40. Frouz, J. (2018). Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 332, 161–172.
41. Frouz, J. (2023). Plant-soil feedback across spatiotemporal scales from immediate effects to legacy. *Soil Biology and Biochemistry*, 189, 109289.
42. Frouz, J., & Frouzová, J. (2021). *Applied Ecology* (p. 414). Springer International Publishing.
43. García-Palacios, P., Milla, R., Delgado-Baquerizo, M., Martín-Robles, N., Álvaro-Sánchez, M., & Wall, D. H. (2013). Side-effects of plant domestication: ecosystem impacts of changes in litter quality. *New Phytologist*, 198(2), 504–513.
44. Geisseler, D., & Scow, K. M. (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 54–63.
45. Ghestem, M., Veylon, G., Bernard, A., Vanel, Q., & Stokes, A. (2014). Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant and Soil*, 377(1-2), 43–61.
46. Glazko, V. I., Zybaylov, B. L., Kosovsky, Y. G., Glazko, G. V., & Glazko, T. T. (2021). Domestication and microbiome. *The Holocene*, 31(10), 1635-1645.
47. Goyal, R. K., Mattoo, A. K., & Schmidt, M. A. (2021). Rhizobial–host interactions and symbiotic nitrogen fixation in legume crops toward agriculture sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 12, 669404.
48. Gutierrez, A., & Grillo, M. A. (2022). Effects of domestication on plant–microbiome interactions. *Plant and Cell Physiology*, 63(11), 1654-1666.
49. Helgason, T., & Fitter, A. H. (2009). Natural selection and the evolutionary ecology of the arbuscular mycorrhizal fungi (Phylum Glomeromycota). *Journal of Experimental Botany*, 60(9), 2465-2480.
50. Hennessy, D. A. (2006). On monoculture and the structure of crop rotations. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(4), 900-914.
51. Hoad, S. P., Russell, G., Lucas, M. E., & Bingham, I. J. (2001). The management of wheat, barley, and oat root systems. *Advances in Agronomy*, 74, 193–246.
52. Howe, J. A., McDonald, M. D., Burke, J., Robertson, I., Coker, H., Gentry, T. J., & Lewis, K. L. (2024). Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review. *Soil Security*, 16, 100155.

53. Huang, R., Li, Z., Shen, X., Choi, J., & Cao, Y. (2022). The Perspective of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Rice Domestication and Breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12383.
54. Isaac, M. E., Nimmo, V., Gaudin, A. C., Leptin, A., Schmidt, J. E., Kallenbach, C. M., Martin, A., Entz, M., Carkner, M., Rajcan, I., Boyle, T. D., & Lu, X. (2021). Crop domestication, root trait syndromes, and soil nutrient acquisition in organic agroecosystems: A systematic review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 716480.
55. Iverson, A. L., Marín, L. E., Ennis, K. K., Gonthier, D. J., Connor-Barrie, B. T., Remfert, J. L., ... & Perfecto, I. (2014). Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 51(6), 1593-1602.
56. Jiménez, J., Filser, J., Barot, S., & Berg, M. (2020). Soil fauna: key to soil organic matter dynamics and modelling. *Handbook of Methods*, Version 1.
57. Kabir, Z. (2005) – Tillage or no-tillage: impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(1), 23–29.
58. Karlen, D. L., Wollenhaupt, N. C., Erbach, D. C., Berry, E. C., Swan, J. B., Eash, N. S., & Jordahl, J. L. (1994) – Long-term tillage effects on soil quality. *Soil and Tillage Research*, 32(4), 313–327.
59. Kladivko, E. J. (2001) – Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1–2), 61–76.
60. Klironomos, J. N. (2002). Feedback with soil biota contributes to plant rarity and invasiveness in communities. *Nature*, 417(6884), 67-70.
61. Kloepper, J. W., Ryu, C.-M., & Zhang, S. (2004). Induced Systemic Resistance and Promotion of Plant Growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology*, 94(11), 1259-1266.
62. Krasilnikov, P., Taboada, M. A., & Amanullah. (2022). Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability. *Agriculture*, 12(4), 462
63. Kulmatiski, A., Beard, K. H., & Stark, J. M. (2006). Soil history as a primary control on plant invasion in abandoned agricultural fields. *Journal of Applied Ecology*, 43(5), 868-876.
64. Kulmatiski, A., Beard, K. H., Stevens, J. R., & Cobbold, S. M. (2008). Plant-soil feedbacks: A meta-analytical review. *Ecology Letters*, 11(9), 980-992.
65. Kuzyakov, Y., Friedel, J. K., & Stahr, K. (2000). Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(11-12), 1485–1498.

66. Lal, R. (1991). Tillage and agricultural sustainability. *Soil and Tillage Research*, 20(2–4), 133–146.
67. Lal, R. (1993). Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil and Tillage Research*, 27(1–4), 1–8.
68. Lavelle, P. (1996). Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, 33, 3-16.
69. Li, C., Zhou, A., & Sang, T. (2006). Rice domestication by reducing shattering. *Science*, 311(5769), 1936-1939.
70. Li, J., Chen, L., Zhang, C., Ma, D., Zhou, G., Ning, Q., & Zhang, J. (2024) – Combining rotary and deep tillage increases crop yields by improving the soil physical structure and accumulating organic carbon of subsoil. *Soil and Tillage Research*, 244, 106252.
71. Li, P. F., Cheng, Z. G., Ma, B. L., Palta, J. A., & Kong, H. Y. (2014). Dryland wheat domestication changed the development of aboveground architecture for a well-structured canopy. *Annals of Botany*, 114(5), 921–931.
72. Li, Y., Chen, H., Gu, L., Wu, J., Zheng, X., Fan, Z., ... & Wang, Y. (2024). Domestication of rice may have changed its arbuscular mycorrhizal properties by modifying phosphorus nutrition-related traits and decreasing symbiotic compatibility. *New Phytologist*, 243(4), 1554-1570.
73. Li, Z., Dou, H., Zhang, W., He, Z., Li, S., Xiang, D., & Zhang, Y. (2023). The root system dominates the growth balance between the aboveground and belowground parts of cotton. *Crop and Environment*, 2(4), 221-232.
74. Lefroy, E. C., Hobbs, R. J., O'Connor, M. H., & Pate, J. S. (1999). What can agriculture learn from natural ecosystems? *Agroforestry Systems*, 45, 425-438.
75. Lv, G. C., Cheng, Z. G., Li, F. M., Akram, N. A., & Xiong, Y. C. (2019). Comparative response to drought in primitive and modern wheat: a cue on domestication. *Planta*, 250, 629-642.
76. Makkonen, M., Berg, M. P., Hättenschwiler, S., van Ruijven, J., van Bodegom, P. M., & Aerts, R. (2012). Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient. *Ecology Letters*, 15(9), 1033-1041.
77. Mangla, S., Inderjit, & Callaway, R. M. (2008). Exotic invasive plant accumulates native soil pathogens which inhibit native plants. *Journal of Ecology*, 96(1), 58-67.
78. Martín-Robles, N., Lehmann, A., Seco, E., Aroca, R., Rillig, M. C., & Milla, R. (2018). Impacts of domestication on the arbuscular mycorrhizal symbiosis of 27 crop species. *New Phytologist*, 218: 322-334.

79. Martín-Robles, N., Morente-López, J., Freschet, G. T., Poorter, H., Roumet, C., & Milla, R. (2019). Root traits of herbaceous crops: Pre-adaptation to cultivation or evolution under domestication? *Functional Ecology*, 33(2), 273-285.
80. Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
81. Martínez-Ainsworth, N. E., & Tenaillon, M. I. (2016). Superheroes and masterminds of plant domestication. *Comptes Rendus Biologies*, 339(7-8), 268-273.
82. Matesanz, S., & Milla, R. (2018). Differential plasticity to water and nutrients between crops and their wild progenitors. *Environmental and Experimental Botany*, 145, 54-63.
83. McKenna, T. P., Crews, T. E., Kemp, L., & Sikes, B. A. (2020). Community structure of soil fungi in a novel perennial crop monoculture, annual agriculture, and native prairie reconstruction. *PLoS One*, 15(1), e0228202.
84. Meyer, R. S., DuVal, A. E., & Jensen, H. R. (2012). Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops. *New Phytologist*, 196(1), 29-48.
85. Miller, R. M., & Jastrow, J. D. (2000). Mycorrhizal Fungi Influence Soil Structure. In Y. Kapulnik & D. D. Douds Jr. (Eds.), *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function* (pp. 3–18). Springer.
86. Mishra, B. P. (2011). Vegetation composition and soil nutrients status from polyculture to monoculture. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 363-366.
87. Nerva, L., Sandrini, M., Moffa, L., Velasco, R., Balestrini, R., & Chitarra, W. (2022). Breeding toward improved ecological plant–microbiome interactions. *Trends in Plant Science*, 27(11), 1134–1143.
88. Neher, D. A. (1999). Soil community composition and ecosystem processes: comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems. *Agroforestry Systems*, 45, 159–185.
89. Pauwels, J. M., Graefe, S., & Bitterlich, M. (2023). An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture specific way. *Mycorrhiza*, 33(6), 553–568.
90. Pérez-Jaramillo, J. E., Mendes, R., & Raaijmakers, J. M. (2016). Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions. *Plant Molecular Biology*, 90, 635-644.
91. Polverigiani, S., Monaci, E., Neri, D., Bianchelli, M., Santilocchi, R., Toderi, M., D'Ottavio, P., & Vischetti, C. (2017). Effect of contrasting crop rotation systems on soil

- chemical and biochemical properties and plant root growth in organic farming: First results. *Italian Journal of Agronomy*, 12(4), 364–373.
92. Ponge, J.-F. (2013). Plant-soil feedbacks mediated by humus forms: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 137–146.
 93. Primieri, S., Magnoli, S. M., Koffel, T., Stürmer, S. L., & Bever, J. D. (2022). Perennial, but not annual legumes synergistically benefit from infection with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia: A meta-analysis. *New Phytologist*, 233(1), 505–514.
 94. Purugganan, M. D., & Fuller, D. Q. (2009). The nature of selection during plant domestication. *Nature*, 457(7231), 843–848.
 95. Qin, M., Zhang, Q., Pan, J., Jiang, S., Liu, Y., Bahadur, A., Peng, Z., Yang, Y., & Feng, H. (2020). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on soil enzyme activity is coupled with increased plant biomass. *European Journal of Soil Science*, 71(1), 84–92.
 96. Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., & Richard, G. (2010) – Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 111(1), 33–40.
 97. Roucou, A., Violle, C., Fort, F., Roumet, P., Ecarnot, M., & Vile, D. (2018). Shifts in plant functional strategies over the course of wheat domestication. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 25–37.
 98. Rousk, J., Brookes, P. C., & Bååth, E. (2009). Contrasting Soil pH Effects on Fungal and Bacterial Growth Suggest Functional Redundancy in Carbon Mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*.
 99. Sánchez-Pérez, R., Jørgensen, K., Olsen, C. E., Dicenta, F., & Møller, B. L. (2008). Bitterness in almonds. *Plant Physiology*, 146(3), 1040–1052.
 100. Sawers, R. J., Ramírez-Flores, M. R., Olalde-Portugal, V., & Paszkowski, U. (2018). The impact of domestication and crop improvement on arbuscular mycorrhizal symbiosis in cereals: insights from genetics and genomics. *New Phytologist*, 220(4), 1135–1140.
 101. Schaal, B. (2019). Plants and People: Our shared history and future. *Plants, People, Planet*(1): 14 – 19.
 102. Singh, B., & Ryan, J. (2015). Managing fertilizers to enhance soil health. *International Fertilizer Industry Association*, Paris, France.
 103. Soldan, R., Fusi, M., Cardinale, M., Daffonchio, D., & Preston, G. M. (2021). The effect of plant domestication on host control of the microbiota. *Communications Biology*, 4(1), 1–9.

104. Suarez, A., & Gwozdz, W. (2023). On the relation between monocultures and ecosystem services in the Global South: A review. *Biological Conservation*, 278, 109870.
105. Szoboszlay, M., Lambers, J., Chappell, J., Kupper, J. V., Moe, L. A., & McNear Jr, D. H. (2015). Comparison of root system architecture and rhizosphere microbial communities of Balsas teosinte and domesticated corn cultivars. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, 34-44.
106. Tahat, M. M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. I. (2021). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859.
107. Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 607–621.
108. Van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M.-A., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406-1423.
109. Van Der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Bever, J. D., Bezemer, T. M., Casper, B. B., Fukami, T., Kardol, P., Klironomos, J. N., Kulmatiski, A., Schweitzer, J. A., Suding, K. N., Van de Voorde, T. F. J., & Wardle, D. A. (2013). Plant–soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*, 101(2), 265–276.
110. Van Egeraat, A. W. S. M., & Huntjens, J. L. M. (1975). Preface. *Plant Soil* 43, VII.
111. Vilela, A. E., & González-Paleo, L. (2015). Changes in resource-use strategy and phenotypic plasticity associated with selection for yield in wild species native to arid environments. *Journal of Arid Environments*, 113, 51-58.
112. Vicena, J., Ardestani, M.M., Baldrian, P., & Frouz, J. (2022). The effect of microbial diversity and biomass on microbial respiration in two soils along the soil chronosequence. *Microorganisms*, 10(10), 1920.
113. Vives-Peris, V., de Ollas, C., Gómez-Cadenas, A., & Pérez-Clemente, R. M. (2020). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Reports*, 39(1), 3–17.
114. Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., van der Putten, W. H., & Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304(5677), 1629–1633.
115. Waines, J. G., & Ehdaie, B. (2007). Domestication and crop physiology: Roots of Green-Revolution wheat. *Annals of Botany*, 100(5), 991–998.

116. Weisdorf, J. L. (2005). From foraging to farming: explaining the Neolithic Revolution. *Journal of Economic surveys*, 19(4), 561-586.
117. Wilschut, R. A., ten Hooven, F. C., & Bezemer, T. M. (2019). Plant-soil feedback effects on plant quality and performance of an aboveground herbivore interact with fertilization. *Ecology and Evolution*, 9(14), 8143-8152.
118. Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 198(1), 97–107.
119. Wu, Q. S., Xia, R. X., & Zou, Y. N. (2008). Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. *European Journal of Soil Biology*, 44(1), 122–128.
120. Yang, Y., Huang, B., Xu, J., Li, Z., Tang, Z., & Wu, X. (2022). Heavy metal domestication enhances beneficial effects of arbuscular mycorrhizal fungi on lead (Pb) phytoremediation efficiency of *Bidens parviflora* through improving plant growth and root Pb accumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32988-33001.
121. Yue, H., Yue, W., Jiao, S., Kim, H., Lee, Y. H., Wei, G., ... & Shu, D. (2023). Plant domestication shapes rhizosphere microbiome assembly and metabolic functions. *Microbiome*, 11(1), 70.
122. Zadworny, M., & Eissenstat, D. M. (2011). Avoiding transport bottlenecks in an expanding root system: Xylem structure and function in pioneer and fibrous roots. *American Journal of Botany*, 98(5), 1–10.
123. Zillinsky, F. (1973). *Triticale Breeding and Research at CIMMYT: A Progress Report*. CIMMYT.
124. Zhao, X., Zhang, L., & Liu, D. (2006). Comparative analysis of response to salt stress among selected *Salvia* species. *Plant Science*, 170(3), 481-489.