

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Ochrana životního prostředí



**PŘÍRODOVĚDECKÁ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

Ema Vodičková

Pěstování polykultur a trvalých plodin – cesta k udržitelnému zemědělství
Polycultures and perennials way to sustainable agriculture

Typ závěrečné práce:

Bakalářská

Vedoucí práce/Školitel:

prof. Mgr. Ing. Jan Frouz, CSc.

Praha, 2024

Prohlášení

Závazně prohlašuji, že jsem práci sepsala samostatně, všechny použité zdroje a literatura jsou v práci řádně citovány a práce nebo její podstatná část nebyla využita jako závěrečná práce k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 30.července 2024

Ema Vodičková

Poděkování

Chtěla bych moc poděkovat prof. Mgr. Ing. Jan Frouz, CSc., mému vedoucímu práce, za nasměrování, jak vést bakalářskou práci, a dále za jeho vstřícné vedení a spolupráci, trpělivost a cenné informace. Na závěr bych chtěla vyjádřit velké díky mé rodině a přátelům, kteří mi byli podporou po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Moderní zemědělství využívá zejména monokulturní pole jednoletých plodin pro uspokojení lidských potřeb, které jsou spojovány s dlouhodobou degradací půdy a mnoha dalšími negativními vlivy na životní prostředí. Tato bakalářská práce dopodrobna rozebírá důvody pěstování jednoletých plodin a monokultur a vlivy tohoto moderního zemědělství na životní prostředí. Zároveň tento typ zemědělství porovnává s jeho udržitelnější formou, a to pěstování vytrvalých plodin a polykultur. Analýza ukazuje, že ekonomické důvody, efektivita a tržní požadavky jsou hlavními důvody pro pěstování monokultur jednoletých plodin. Nicméně, toto pěstování přináší významné negativní dopady na životní prostředí, jako jsou degradace půdy, snížení biodiverzity, zvýšená půdní eroze a větší závislost na chemických hnojivech a pesticidech. Udržitelné způsoby pěstování, jako jsou polykultury a pěstování vytrvalých plodin, nabízejí efektivní využívání půdních živin a vláhy, podporují obnovu půdy, zvyšují biodiverzitu a zlepšují ekologickou stabilitu. Práce tak zdůrazňuje nutnost hledání rovnováhy mezi ekonomickými cíli a environmentálními potřebami prostřednictvím inovativních a udržitelných zemědělských praktik.

Klíčová slova: monokultury, jednoleté plodiny, udržitelné zemědělství, polykultury, víceleté plodiny, dopady na životní prostředí

Abstract

Modern agriculture primarily utilizes monoculture fields of annual crops to meet human needs, which are associated with long-term soil degradation and many other negative environmental impacts. This bachelor's thesis thoroughly examines the reasons for cultivating annual crops and monocultures and the effects of this modern agriculture on the environment. At the same time, it compares this type of farming with its more sustainable forms, such as the cultivation of perennial crops and polycultures. The analysis shows that economic reasons, efficiency, and market demands are the main factors driving the cultivation of monocultures of annual crops. However, this type of farming brings significant negative environmental impacts, such as soil degradation, reduced biodiversity, increased soil erosion, and greater dependence on chemical fertilizers and pesticides. Sustainable farming practices, such as polycultures and the cultivation of perennial crops, offer efficient use of soil nutrients and moisture, support soil restoration, increase biodiversity, and improve ecological stability. This work thus emphasizes the necessity of finding a balance between economic goals and environmental needs through innovative and sustainable agricultural practices.

Keywords: monocultures, annual crops, sustainable agriculture, polycultures, perennial crops, environmental impacts

Obsah

Úvod.....	2
1. Domestikace rostlin.....	4
1.1. Pojem domestikace.....	5
1.2. Domestikační syndrom.....	5
1.3. Důsledky domestikace pro interakce rostlin s prostředím.....	6
1.4. Hlavní domestikované druhy.....	7
2. Plodiny – význam a dopad na ekosystémy.....	9
2.1. Jednoleté plodiny a jejich ekologické dopady na životní prostředí.....	9
2.2. Vytrvalé plodiny a jejich ekologické dopady na životní prostředí.....	12
2.2.1. Možnosti zvýšení podílu stávajících víceletých plodin.....	14
2.2.2. Pokusy o vyšlechtění vytrvalých plodin.....	14
2.3. Porovnání jednoletých a víceletých plodin.....	17
3. Zemědělské systémy: polykultury vs monokultury.....	19
3.1. Globální rozšíření monokultur, jejich výhody a nevýhody.....	19
3.1.1. Výhody pěstování monokultur.....	20
3.1.2. Nevýhody pěstování monokultur.....	21
3.2. Pěstování polykultur a jejich vliv na životní prostředí.....	23
3.2.1. Nevýhody pěstování polykultur.....	23
3.2.2. Výhody pěstování polykultur.....	24
3.2.3. Kalkulace LER (Land Equivalent Ratio).....	27
3.2.4. Osevní postupy pěstování polykultur.....	28
3.3. Porovnání polykultur a monokultur.....	30
Závěr.....	33
Použitá literatura.....	36

..

Úvod

Před zhruba 10 000 lety začalo docházet k postupné domestikaci nejvyužívanějších zemědělských plodin, aby jejich vlastnosti lépe vyhovovaly požadavkům lidských potřeb (Meyer et al., 2012). Lidé se tak stali do značné míry závislí na produkci těchto plodin a začali vyvíjet vysoký tlak na zdokonalování jejich pěstování. Se stoupající světovou populací začala v průběhu tisíciletí stoupat i poptávka po zemědělské produkci.

V období průmyslové revoluce začalo docházet k postupné mechanizaci zemědělství a zvýšení efektivity produkce (Altieri, 1999). Právě kvůli efektivitě se začalo přecházet z pěstování vytrvalých plodin na plodiny jednoleté, které poskytují značný výnos za poměrně krátké časové období (Frouz a Frouzová, 2021). Kromě světově rozšířeného pěstování převážně jednoletých plodin se přešlo i na monokulturní pěstování, kdy se na jedno pole vysazuje pouze jedna plodina. Přednost pěstování jednoletých plodin v monokulturách je ovlivněna mnoha faktory, včetně ekonomických motivací, zemědělských politik a technologického pokroku (Power a Follett, 1987).

I když se na první pohled zdá pěstování monokultur a jednoletých plodin jako ekonomicky efektivní a produktivní cesta, v dlouhodobém horizontu přináší řadu environmentálních a ekologických výzev. Monokultury jednoletých plodin jsou často zmiňovány v souvislosti s problémy, jako je degradace půdy (Glover, 2003), ztráta biodiverzity (Altieri, 1999), menší schopnost rostlin spolupracovat mezi sebou a přijímat živiny z půdy (Frouz a Frouzová, 2021) a bránit se patogenním organismům (Altieri a Nicholls, 2004).

Jednoleté plodiny, jako jsou kukuřice, pšenice nebo slunečnice, jsou často vybírány pro jejich vysoký výnos a relativně snadnou sklizeň (Power a Follett, 1987). Nicméně tento systém zemědělství má také svá negativa, která upozorňují na dlouhodobé negativní environmentální dopady, zahrnující nejen zmíněnou degradaci a erozi půdy (Gantzer et al., 1990; Glover, 2003), ale také znečištění vodních zdrojů chemickými hnojivy a pesticidy (McGuinness, 1993) a snižování biodiverzity (Michalko et al., 2024).

Alternativním přístupem k pěstování plodin je využívání vytrvalých plodin a polykultur. Vytrvalé plodiny, které žijí a produkují po několik let bez potřeby každoročního přesazování, mohou přispět k udržitelnosti zemědělství snížením potřeby orby a chemických vstupů (Galvez et al., 2001; Scheinost et al., 2001). Polykultury, na druhé straně, využívají pěstování více druhů

plodin na jednom poli, což může zlepšit biodiverzitu (Li et al., 2009) a odolnost agroekosystému (Altieri, 2002).

V této bakalářské práci se budu zabývat dvěma hlavními otázkami: 1) Jaké příčiny vedou moderní zemědělství k pěstování monokultur jednoletých plodin? 2) Jaké environmentální dopady má pěstování monokultur a jednoletých plodin? Zároveň tyto dvě otázky porovnáám s udržitelnějším zemědělstvím, jako je pěstování vytrvalých plodin a polykultur.

1. Domestikace rostlin

Před zhruba 10 000 lety došlo v různých zeměpisných oblastech k postupné domestikaci rostlin a lidský život se stal do značné míry závislý na zemědělských produktech (Meyer et al. 2012). Domestikované plodiny jsou využívány nejen jako potrava, ale i jako krmivo pro hospodářská či domácí zvířata, k výrobě biopaliv či vláken (Frouz a Frouzová, 2021).

Na Zemi je známo přibližně 250 až 300 tisíc rostlinných druhů a 10 až 50 tisíc je druhů jedlých, přičemž z toho je domestikováno asi 100 až 200 druhů (FAO, 1993). V jiných studiích a jejich odhadech se hovoří až o 500 druzích, které jsou z části domestikovány (Frouz a Frouzová, 2021). Pokud porovnáme množství domestikovaných a nedomestikovaných jedlých druhů mezi sebou, dojdeme k výsledku, že pouhé 1 % jedlých druhů je domestikováno. Domestikované druhy se oproti původnímu rozšíření jejich divokých předků významně rozšířily a staly se, přinejmenším z pohledu celkové pokrývnosti, nejhojnějšími druhy na planetě (Frouz a Frouzová, 2021).

Zároveň existují často využívané druhy plodin, u kterých k domestikaci ještě nedošlo. Jedná se například o řadu evropských lesních bobulovin jako je brusnice brusinka (*Vaccinium vitis-idaea*), brusnice klikva (*Vaccinium subg. Oxycoccus*) a brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus*). Tyto plané plodiny jsou využívány zejména díky jejich nenahraditelné chuti a obsahu množství tělu prospěšných látek, jako je například vysoká koncentrace fytonutrientů, z nichž jsou nejdůležitější antokyany nacházející se v lidské kůži a masu (Wu et al., 2021). Dále není domestikována řada bylin, které jsou používány jako koření. Nedomestikovanou bylinou s výraznou a typickou chutí a vůní používanou v gastronomii je například česnek medvědí (*Allium ursinum*) (Frouz a Frouzová, 2021).

Jiné byliny byly vyšlechtěním a změnou genetického materiálu tak pozměněny, že se již jen ve velmi málo rysech podobají svým planým předchůdcům. To poukazuje na zánik genetické rozmanitosti rostlin, který je jedním z hlavních důsledků domestikace (Zsögön et al., 2018). Jedná se zejména o plodiny, které pokrývají hlavní lidské potřeby sacharidů a bílkovin pro získání energie. Mezi dominantní druhy, které převažují v populaci k pokrytí lidských potřeb patří zrniny, pšenice, rýže a kukuřice. Tyto zmíněné plodiny představují více než 60% lidské spotřeby (FAO, 1998). Na plodiny, které nám poskytují vitamíny, jako je ovoce a zelenina, byl tlak domestikace menší.

1.1. Pojem domestikace

Z biologického hlediska se domestikace týká geneticky založených fenotypů charakterizující rostliny vybrané lidmi (Smýkal, 2009). Z kulturního hlediska je domestikace brána jako zprvu neuvědomělý a následně cílený sběr semen z rostlin s co nejvýhodnějšími vlastnostmi. Tímto způsobem došlo v průběhu několika generací k postupné přeměně druhu planého na plodinu kulturně produktivní (FAO, 1993). Genetické mechanismy, které se podílejí na domestikaci rostlin, zahrnují polyploidizaci, genetický drift, mutace a v některých případech velmi složité hybridizační procesy, které ale nejsou předmětem této práce (Meyer et al. 2013). Většina domestikovaných druhů se od svých planých předchůdců liší fyziologickými a morfologickými rysy spojenými s jejich růstem, velikostí, zbarvením, změnami v době kvetení, uchováváním a klíčením semen a mnoho dalších. (Smýkal, 2009. FAO, 1993) Soubor těchto pozměněných vlastností domestikovaných plodin od jejich planých předků je nazýván domestikační syndrom. (FAO, 1993) Obecně došlo díky šlechtění rostlin k zvyšování podílu částí určujících výnos v celkové biomase rostliny a zlepšování užitečných vlastností těchto částí.

1.2. Domestikační syndrom

Člověku domestikace pomohla k výhodnějšímu a snazšímu využití rostliny a usnadnila jejich pěstování v kultuře. Hlavním nejrozšířenějším znakem domestikovaných rostlin je závislost rostliny na člověku. Tato závislost se může objevit například u kukuřice nebo banánu v podobě ztráty nebo omezení přirozené schopnosti reprodukce (Smýkal, 2009). Část domestikovaných forem stále jeví některé rysy jejich předků, jako je například praskání lusků u sóji luštěnaté (*Glycine max*) nebo pukání šešulí u brukve řepky (*Brassica napus*) (Smýkal, 2009). Mezi další znaky patřící do domestikačního syndromu je zvýšení množství a velikosti semen v rostlině, omezení vypadávání semen z rostliny, zvětšení velikosti plodů, zlepšení fertility a klíčivosti, zkrácení dormance rostliny, eliminace toxických či inhibujících látek, na druhé straně zvýšení obsahu cukru či jiných látek v částech rostliny, ztráta trnů a obranných mechanismů a mnoho dalších (Smýkal, 2009). Další významnou vlastností, která je při domestikaci modifikována, je ztráta vytrvalosti rostliny, kdy z trvalé rostliny vznikne jednoletá. Příkladem takto vyšlechtěné rostliny je rod bavlník (*Gossypium*), jehož plody divokých vytrvalých forem se rozpadají a u domestikovaných jednoletých forem zůstávají pohromadě (Frouz a Frouzová, 2021). Další klíčovou vlastností související s domestikací je podpora synchronizovaného klíčení. Zatím co u divokých rostlin vyklíčí i při příhodných podmínkách zpravidla jen část semen a ostatní zůstanou jako „záloha“ a vyklíčí později, u kulturních rostlin

vzejde naprostá většina semen najednou, jakmile jsou pro klíčení vhodné podmínky (Frouz a Frouzová, 2021).

1.3. Důsledky domestikace pro interakce rostlin s prostředím

Kromě již zmíněných pozměněných vlastností domestikovaných rostlin se odlišuje i jejich interakce s okolím a šance na přežití v divoké přírodě v porovnání s planými druhy. Na rozdíl od planých rostlin nejsou domestikované druhy tolik chráněné před nepříznivými vlivy okolí, což posiluje jejich závislosti na člověku (Smýkal, 2009). Souvisí to jednak s tím, že člověk si k domestikaci přednostně vybíral jednoleté druhy (r strategů), které se obecně soustřeďují na rychlý růst a využívání vhodných stanovišť s dostatkem živin a malou konkurencí a méně na interakce s jinými druhy (Frouz a Frouzová et al., 2021), jednak je to výsledkem samotného domestikačního procesu popsaného výše. Uvedeme si zde pár příkladů vlastností, které u domestikovaných rostlin vymizely (Smýkal, 2009).

Domestikace rostlin měla poměrně značný vliv na rostlinnou mikrobiotu, která souvisí se zdravím a růstem rostliny. Domestikované rostliny často čelí většímu vlivu patogenů a mají nižší toleranci vůči stresovým podmínkám. Z tohoto důvodu se vědci zaměřili na hledání řešení tohoto problému. Začalo docházet k hledání genů v planých druzích rostlin a ke genové introgresi do druhů domestikovaných. Tyto geny by vedly k větší ochraně rostliny proti patogenům, ke schopnosti více tolerovat stres a zároveň by zmírnila omezenou genetickou rozmanitost domestikovaných rostlin (Mazur et al., 1995). Domestikace zároveň vedla k rozšíření geografického areálu rostlin, což vedlo k vystavení rostlin novým rozmanitým bakteriím, které se mohly stát kolonizátory rostliny. Domestikované rostliny se dostaly do úzkého kontaktu s přidruženými plodinami, například v polykulturách, a jejich bakteriemi (Harlan, 1971). K zániku symbiotických bakterií či hub dochází vlivem využívání chemických látek k ochraně rostlin. Jedná se například o herbicidy, fungicidy, antibiotika (Al Abboud, 2014) a hnojiva obsahující dusík (Fan et al., 2019) či fosfor (Kobae, 2019).

Tím, že došlo ke změně architektury rostliny a jejích kořenů, lze očekávat rozdíly v rhizosférické mikrobiotě (Pérez-Jaramillo et al., 2016). Funkční důsledky bakteriálních změn rhizosféry kořene rostlin v důsledku domestikace nejsou známy, ale předpokládá se, že souvisejí s architekturou kořenů (Martínez-Romeroa et al., 2020). Díky redukci toxických metabolitů či inhibujících látek v rostlině, které by činily rostlinu nepoživatelnou, došlo pravděpodobně ke zvýšení citlivosti rostlin vůči patogenům i vůči neúčinným symbiontům

(Kiers et al., 2007). Zároveň vysoká hustota porostů domestikovaných rostlin také zvyšuje jejich náchylnost k patogenům (Martínez-Romeroa et al., 2020).

1.4. Hlavní domestikované druhy

Zde budu zmiňovat jen hlavní plodiny, které jsou pěstované ve velkém měřítku a z velké části kryjí lidské potřeby. Většinu potravinové produkce tvoří obilniny, což z nich dělá jedny z nejvýznamnějších plodin pro lidstvo (Pimm, 2001). Obilniny jsou vesměs jednoleté trávy pěstované zejména pro jejich plod – zrno. Zrno obsahuje velmi málo vody, proto je vhodné pro skladování a přepravu. Mezi nejvyžívanější obilniny patří kukuřice (kultivar druhu *Zea mays*), rýže (druh *Oryza sativa*), pšenice (rod *Triticum*), ječmen (*Hordeum vulgare*), žito (*Secale cereale*), oves (druh *Avena sativa*) a mnoho dalších u nás méně známých obilnin (Frouz a Frouzová, 2021).

Dále do plodin pokrývajících velké měřítko lidských potřeb patří luštěniny, skupina plodin z čeledi bobovitých (*Fabaceae*), která je charakteristická fixací vzdušného dusíku pomocí symbiotických bakterií v půdě, a jejich plodem je lusk (Carlsson & Huss-Danell, 2003). Nejvýznamnější luštěninou obsahující vysoký podíl proteinů je sója (*Glycine max*). Dále sem patří fazol (rod *Phaseolus*) s jeho domestikovanými druhy, hrách setý (*Pisum sativum*), čočka jedlá (*Lens culinaris*), podzemnice olejná (*Arachis hypogaea*) a mnoho dalších (Hasanuzzaman et al., 2020).

Fylogeneticky různorodou skupinu tvoří okopaniny. Jejich společným znakem je jejich využití a způsob pěstování těchto plodin, kdy půdu okolo plodin kultivujeme. U okopanin se sklízí zejména hlízy či bulvy. Brambory (*Solanum tuberosum*), řepa (*Beta vulgaris*) a tuřín (*Brassica napus* var. *napobrassica*) jsou příkladem velmi známých plodin z této skupiny (Frouz a Frouzová, 2021).

Do samostatné skupiny se řadí olejniny, které pěstujeme pro získání oleje, a technické plodiny. Nejvýznamnější olejninou je palma olejná (*Elaeis guineensis*), s kterou je spojené ustupování tropických deštných lesů a mnoho dalších problémů. V České republice je významná řepka olejka (*Brassica napus*), hořčice setá (*Sinapis alba*), len setý (*Linum usitatissimum*), bavlník chlupatý (*Gossypium hirsutum*) a mák setý (*Papaver somniferum*), jehož pěstování v České republice není regulováno na rozdíl od ostatní země kvůli výrobě opia (Frouz a Frouzová, 2021). Významnou technickou plodinou pocházející z Nové Guiney je cukrová třtina (*Sacharum officinalis*), z jejíž stonků vyrábíme cukr (Weiss, 1983).

Pícniny jsou pěstovány pro píci, tedy jako objemové krmivo pro hospodářská zvířata. Do této skupiny se řadí velké množství plodin. Ze skupiny jetelovitých sem patří jetel luční (*Trifolium pratense*), jetel prostřední (*Trifolium medium*) a jetel plazivý (*Trifolium repens*). Druhá nejdůležitější čeleď spadající do pícnin jsou lipnicovité. Do travin se řadí ovsík vyvýšený (*Arrhenatherum elatius*), srha říznačka (*Dactylis glomerata*), psárka luční (*Alopecurus pratensis*) a jílek vytrvalý (*Lolium perene*) (Skinner, 2007).

Dále rozlišujeme ovoce a zeleninu. Dělení ovoce a zeleniny je do jisté míry arbitrární, kdy lidé často neví, zdali je plodina ovocem či zeleninou. Příkladem může být rajče, o kterém by většina z nás řekla, že je zelenina, ale podle Evropského parlamentu z roku 2011 se jedná o ovoce (European Parliament, 2011). V České republice se z ovoce pěstují zejména jablka, což jsou plody jabloně z čeledi růžovitých (*Malus domestica*), dále hrušky z hrušně obecné (*Pyrus communis*), švestky z rostliny slivoň švestka (*Prunus domestica*), višně z višně obecné (*Prunus cerasus*), rajče jedlé (*Solanum lycopersicum*) a mnoho dalších. Co se týče zeleniny, nejvíce je u nás pěstována řada variací cibule kuchyňské (*Allium cepa*), česnek kuchyňský (*Allium sativum*), okurka setá (*Cucumis sativus*), brukev zelná (*Brassica oleracea*) a mnoho dalších. Jako vytrvalá rostlina je pěstován například chřest lékařský (*Asparagus officinalis*) anebo artyčok kardový (*Cynara cardunculus*) (Frouz a Frouzová, 2021).

Do samostatné skupiny patří víno a chmel. Evropská vinná réva spadá do druhu *Vitis vinifera*. Od 19. století, kdy bylo velké množství révy infikováno mšičkou révokazem (*Dactylospheera vitifoliae*) se prakticky veškeré evropské odrůdy révy vinné roubují na americké podnože, které jsou proti tomuto škůdci rezistentní. Chmel obecný (*Humulus lupulus*) se pěstuje pro samčí šišťice obsahující hořčiny (Frouz a Frouzová, 2021).

Poslední velmi variabilní skupinou jsou léčivé, aromatické a kořeninové byliny. Zařazení rostlin do této skupiny neomezuje jejich využití, některé mohou být pěstovány zároveň jako zelenina či například okrasné rostliny. Charakteristické je jejich přímé využití k léčení či k výrobě koření a čajovin. Často jsou zpracovány farmaceutickým a potravinářským průmyslem a extrakty z nich jsou využívány při výrobě kosmetiky, bylinných likérů a dalších (Ministerstvo zemědělství, 2021).

2. Plodiny – význam a dopad na ekosystémy

Základním a jedním z nejdůležitějších úkolů 21. století je, a do budoucna bude, uspokojit základní potřeby lidstva společně se zachováním integrity přírodních ekosystémů pomocí udržování globální biologické rozmanitosti. Mezi základní potřeby lidstva patří i zajištění dostatečných živin – potravin a vody. Potravinou pochází nejčastěji právě z vysoce řízených zemědělských systémů (Glover, 2003). V průběhu několika posledních desetiletích se vědci začali obávat negativních dopadů globálního zemědělství na produkci potravin, ale také na integritu našich přirozených ekosystémů (Faeth, 2000; Tilman, 2001). Udržení přirozených ekosystémů je důležité, jak z hlediska biologické diversity organismů, tak z hlediska ochrany půdy, vodních zdrojů a efektivního cyklu nutrientů v prostředí (Ewell, 1999).

Pokud se budeme snažit pochopit, jak nejlépe a nejefektivněji hospodařit s půdou, vodními zdroji a částečně i s biologickou rozmanitostí v našich zemědělských systémech, dojdeme ke dvěma odpovědím – 1. rozmanitost a 2. vytrvalost rostlinných společenstev. Rozmanitost ekosystémů můžeme vidět po tropické deštné pralesy až po travnaté plochy mírného pásma. V porovnání se zemědělskou půdou, kdy více než dvě třetiny světové orné půdy zaujímají jednoleté plodiny pěstované v monokulturách (FAO, 2003). Tato drastická vegetační přeměna v posledních tisíciletích zapříčinila snížení ekologické rozmanitosti a zánik či zhoršení přírodních ekosystémů (Pimm, 2001). Dopady této přeměny mohou ovlivnit i zdánlivě dobře chráněné systémy vzdálené tisíce kilometrů daleko od konkrétní hospodářské oblasti (Burkhart a James, 1999). Výsledek nevhodného hospodaření můžeme pozorovat od mrtvých zón kontaminovaných živinami v pobřežních vodách až po globální změnu klimatu (Glover, 2003).

Z řady důvodů, v neposlední řadě kvůli zajištění potravinové bezpečnosti, nemůžeme každou zemědělskou půdu s jednoletými monokulturami přeměnit na původní biologicky rozmanitou oblast, tak je potřeba inovativního a produktivního řešení pěstování plodin.

2.1. Jednoleté plodiny a jejich ekologické dopady na životní prostředí

Jednoleté plodiny hrají klíčovou roli v zemědělství díky jejich schopnosti rychle poskytovat úrodu v krátkém časovém období. Mezi hlavní jednoleté plodiny patří různé druhy obilovin, luštěnin, olejnin a dalších skupin, které jsme si již v práci představili. Každá z těchto skupin plodin má své specifické agronomické a ekonomické charakteristiky, které ovlivňují jejich pěstování a využití.

Jednoleté plodiny se vyznačují jejich poměrně krátkým životním cyklem. Ten se může u každé rostliny lišit, ale nejčastěji trvá od jednoho do dvou vegetačních období. To zároveň souvisí i s vlastností jednoletých rostlin většinu energie vkládat do kvetení a posléze tvorbu semen (Frouz a Frouzová, 2021). Tato vlastnost umožňuje v zemědělství rychlou rotaci plodin na polích a flexibilní plánování osevních postupů. Kvůli využití energie především do kvetení a semen nezbývá již dostatek energie na tvorbu rozsáhlých kořenových systému a na obranu proti škůdcům a patogenům. Právě kvůli ztrátě hlubokého kořenového systému na pole s jednoletými rostlinami působí větší půdní eroze.

Klíčovým faktorem pro optimalizaci výnosů jednoletých plodin je správné hnojení a příprava půdy. Pěstování těchto plodin často zahrnuje aplikaci minerálních hnojiv pro zajištění dostatečné výživy rostlin a udržení úrodnosti půdy. Hnojiva a využívání různých chemických látek na zemědělské půdě je spojeno s nedostatečným obsahem živin v půdě, která podléhá erozi (Pimentel et al., 1995).

Obecně platí, že zemědělci aplikují podstatně větší množství různých pesticidů na jednoleté plodiny než na víceleté plodiny, a to zejména kvůli vysokým požadavkům konvenčního zemědělství na orné půdě (Michalko et al., 2024) a neschopnosti rostliny se bránit proti škůdcům a patogenním organismům (Frouz a Frouzová, 2021). Na polích s jednoletými plodinami je také nutné používání poměrně značného množství herbicidů, které potlačují růst plevelů.

U jednoletých plodin pěstovaných ve velkém měřítku dochází ke změně a poklesu biodiverzity (Michalko et al., 2024). To může být způsobeno nadměrným využívání pesticidů nebo narušením potravních sítí v jednoletých plodinách kompletním odstraněním plodiny a nutnou každoroční rekolonizací organismů (Mestre et al. 2018; Knapp et al. 2022).

Pěstování jednoletých plodin na velkých polích ovlivňuje, jak jsem již zmiňovala, i vodní erozi a vodní průtok v půdě, kde rostou. Je prokázáno, že průtok vody půdními profily může být až 5 krát větší pod jednoletými plodinami než pod víceletými (Randall et al., 1997). Půda přichází o schopnost zadržování půdní vody kvůli snížení obsahu půdní organické hmoty (SOM) a množství jílu (den Biggelaar et al., 2001), což je jedním z důsledků půdní eroze. Tím, že půda není schopná zadržovat dostatek vody dochází poté i ke ztrátám ročního úhrnu srážek. Ten se může pohybovat v oblastech pěstování jednoletých rostlin až okolo 45 % (Dinnes et al., 2002). Malá hloubka kořenového systému jednoletých rostlin hraje v tomto ohledu také

poměrně významnou roli. Neefektivní využívání vody a ztráta živin může mít za následky i podmáčení půd, kde je nedostatek kyslíku, což omezuje mineralizaci organické hmoty anaerobních rozkladných procesů (Ministerstvo zemědělství, 2021). Vzrůst v půdním průtoku současně odpovídá třiceti-pěti násobnému vzrůstu ročních ztrát dusičnanů v polích s jednoletými rostlinami s porovnáním s vytrvalými (Randall et al., 1997).

Půdní eroze a používání různých agrochemikálií může vést ke zhoršování problémů s kvalitou vody v regionu. Do povrchových vod se ze zemědělských ploch převážně s jednoletými rostlinami dostávají části půdy (Kelley a Nater, 2000), velké množství dusíku a fosforu (Faeth, 2000). Obohacování vod těmito živinami podporuje růst řas ve vodách, které spotřebovávají kyslík, který je vyžadován mnoha vodními organismy. Tyto zóny s nízkým obsahem kyslíku se v podstatě stávají mrtvými zónami. Pobřežní ekologové monitorující tento jev po desetiletí sledovali primární příčinu tohoto jevu, kterou byla přeměna krajiny z původní vegetace na jednoleté zemědělské plodiny v povodí řeky Mississippi (Rabalais et al., 2002). Zároveň se ve vzorcích vody či v tělech sladkovodních ryb velmi často najdou různé druhy pesticidů (USGS, 2002).

Největším problémem z dlouhodobého hlediska produktivity je ale ztráta půdy jako takové. Ke ztrátě půdy dochází díky vodní či větrné erozi, která na pole s jednoletými rostlinami působí ve větší míře než na pole s víceletými rostlinami (Glover, 2003). Odhaduje se, že míra půdní eroze se celosvětově pohybuje okolo 15.2 Mt/ha za rok (Laal, 2003b). Zatímco proces tvorby půdy se pohybuje v měřítku 1 Mt/ha za rok (Laal, 1998), což z půdy činí neobnovitelný zdroj.

Americká studie zabývající se vlivem jednoletých a víceletých produkčních systémů na ztrátu půdy trvajících 100 let v Missouri porovnávala trvalý travní porost s dvěma jednoletými systémy pěstování plodin (Gantzer et al, 1990). Mechanismus této studie bylo srovnání 3 systémů mezi sebou. Prvním bylo pěstování víceletých travních porostů, které bylo následně vystřídáno čtyřletým pěstováním jednoletých plodin. Druhý systém se skládal z pěstování pouze kukuřice seté jakožto jednoleté rostliny a třetím systémem byl trvalý travní porost. Po sto letech bylo dokázáno, že trvalý travní porost dokáže udržet o 30 % více ornice neboli vrchní vrstvy půdy, než dokáží udržet oba dva systémy s jednoletými plodinami, i pokud se v systému zakomponuje dvouletá fáze s víceletými plodinami. Data získána od roku 1918 do roku 1931 ukázala že roční eroze systému pouze s jednoletými plodinami činila 44 Mg ha⁻¹. Eroze systému se zakomponovanou fází víceletých plodin a jednoletých činila 6 Mg ha⁻¹ a roční eroze systému pouze s trvalým travním porostem činila 0.8 Mg ha⁻¹ (Gantzer et al, 1990). Způsob pokrývky

terénu (jednoleté či vytrvalé porosty) bylo 35 krát významnější než vlastní erodovatelnost půdy (Gantzer et al, 1990), na kterou má vliv zrnitostní složení půdy, obsah organických částí, na struktuře a propustnosti půdy (Vlašný, 2008). Hospodaření s porostem hrálo 28krát důležitější roli, než sklon svahu při vysvětlování rozdílů v erozi (Gantzer et al, 1990). Víceleté porosty byly 54krát účinnější při řízení eroze ve srovnání s jednoletými plodinami (Gantzer et al, 1990).

Navzdory pokrokům ve strategiích pěstování zůstává účinnost využití živin u jednoletých plodin nízká a silně závislá na povětrnostních podmínkách (Dinnes et al., 2002). I přesto, že zavedení bezorebného a konzervačního zpracování půdy snížilo v posledních letech ztráty půd, přijetí alternativních způsobů zpracování půdy zůstává v mnoha severních oblastech obtížné kvůli potřebě teplých, dobře odvodněných osivových lůžek. Většina snížení míry eroze je však způsobena přeměnou orné půdy na víceleté vegetace v programu Conservation Reserve Program, což představuje více než 60 % celkového snížení ztráty půdy (Brady a Weil, 1999).

2.2. Vytrvalé plodiny a jejich ekologické dopady na životní prostředí

Přestože vytrvalé plodiny dnes tvoří jen velmi malou část globální orné půdy. V současném zemědělství jsou vytrvalé plodiny pěstované na orné půdě zastoupeny zejména víceletými pícninami jako je jetel, vojtěška, či jetelotravní směsy, případně v malé míře energetickými plodinami na produci biomasy (Frouz Frouzová 2021). Existuje mnoho výhod pěstování těchto rostlin (Glover et al., 2010b). Dnes probíhá mnoho výzkumných programů trvalých rostlin, kde procházejí rostlinné druhy různými genetickými modifikacemi a šlechtěním s cílem získání lepších vybraných vlastností rostlin pro zemědělskou produkci (Glover et al., 2010b). Vytrvalé plodiny poskytují na rozdíl od jednoletých plodin celoroční pokrytí zemědělské půdy a hrají klíčovou roli při tvorbě půdy. Tím, že víceleté plodiny zůstávají v půdě i v období úhoru, může dojít ke zlepšení přirozeného prostředí pro organismy a mikroorganismy, zvýšení retence vrchní vrstvy půdy a efektivního využívání vody, snížení obdělávání půdy, potřeby práce a pohonných hmot, snížení spotřeby chemických látek a zejména ke snížení půdní eroze (Jackson, 1980; Scheinost et al., 2001). Díky kořenům dochází k přísunu značného množství uhlíku do půdního profilu (Schmidt et al.2011), což následně přispívá k tvorbě půdní organické hmoty (SOM) (Crews et al., 2017). A právě organická hmota v půdě je hlavní příčinou úrodnosti zemědělské půdy.

Svou energii vytrvalé rostliny investují nejen do kvetení, ale zejména do jejich přežití v daném prostředí. To znamená, že si vyvíjí mohutný a hluboký kořenový systém, kterým právě

pozitivně ovlivňují půdu. Jejich kořenový systém usnadňuje infiltraci vody (Glover et al., 2010a), a umožňuje lepší využívání vody a živin z půdy (DeHaan et al., 2005). Komplexní kořenový systém vytrvalých rostlin zadržuje a využívá více podpovrchové vody než kořenový systém jednoletých rostlin, což snižuje vodní ztráty (Glover et al., 2010b) podpovrchovým a povrchovým odtokem. Vytrvalé rostliny jsou méně náchylné ke ztrátám živin než rostliny jednoleté (Crews, 2004). Tato pozitivní stránka vytrvalých rostlin snižuje spotřebu chemických látek na zemědělských plochách. Plodina si dokáže ve větší míře sama zajistit přísun živin z půd a je více chráněná proti patogenům vyskytujících se v okolním prostředí. Zároveň plodiny s hlubšími kořeny mají větší potenciál snižovat salinizaci prostřednictvím větší schopnosti půdy zadržovat vodu (White et al., 2000; Davies et al., 2005; Ward et al., 2006). Například nahrazení nyní pěstované jednoleté pšenice víceletou pšenicí by mohlo snížit negativní účinky zasolení půdy (Bell et al., 2010a).

U vytrvalých plodin vzniká více symbiotických interakcí s bakteriemi, mikroorganismy či mykorhizními houbami (Frouz a Frouzová, 2021). Obecně jsou vytrvalé rostliny více odolné vůči abiotickým a biotickým stresům než rostliny jednoleté, a to díky charakteristické modularitě jejich kořenů (Munné-Bosch, 2014). Kořeny vytrvalých rostlin jsou schopny produkovat nové laterální a apikální meristémy, které umožňují rostlině přizpůsobit se měnícím se půdním podmínkám. Apikální meristémy kořenů umožňují rostlinám prozkoumávat půdu vertikálně, zatímco laterální meristémy vyvíjejí nové kořeny z pericyklu a poskytují rostlině živiny a vodu laterálně (Munné-Bosch, 2014).

Jak jsem již zmínila, náklady a energie na zemědělskou činnost při pěstování trvalých rostlin jsou značně menší než při práci s jednoletými rostlinami. Některé vytrvalé plodiny potřebují přesít například jednou za tři až pět let (Glover et al., 2010a).

U pěstování vytrvalých plodin nedochází ke každoročnímu obdělávání půdy, což prospívá ke zvýšení mikrobiální komplexity, která napomáhá k udržování živin v půdním profilu (Galvez et al., 2001). Kořeny rostlin mohou být kolonizované arbuskulárními mykorhizními houbami, které pomáhají rostlině zachycovat živiny jako je fosfor (Galvez et al., 2001). Experimentální studie dokazují, že kolonizace kořenů arbuskulárními mykorhizními houbami je vyšší na plochách s bezorebným zpracováním půdy než na plochách s konvenčním zpracováním půdy. Tyto mutualistické vztahy by mohly být využity v trvalkové zemědělství (Boerner, 1992), kdyby vytrvalé plodiny mohly mít vyšší účinnost využití živin díky sníženým postupům obdělávání půdy.

Nenarušování půdy také prospívá k větší biodiverzitě půdní fauny a přirozeným půdním procesům (Culman et al., 2010). Na rozdíl od jednoletých plodin umožňují víceleté plodiny různým organismům přežít zimu, rozmnožovat se a udržovat životaschopné populace (Michalko et al. 2022). Přechod na vytrvalé plodiny by také mohl podpořit rozvoj terestrických volně žijících organismů na zemědělských plochách (e.g., Riffell et al., 2008).

Půdní potravní sítě zároveň napomáhají vstřebávání uhlíku a dusíku (Glover et al., 2010b). Rozvinutá půdní fauna a flóra podporuje půdní strukturu, koloběh vody, růst rostlin, zvětšuje provzdušnění půdy a tím se výrazně lepší zdraví půdy (Neher, 1999). Systémy vytrvalých plodin by tak mohly nejen zvýšit zdraví půdy, ale také z něj těžit.

2.2.1. Možnosti zvýšení podílu stávajících víceletých plodin

Jak již bylo zmíněno, víceleté plodiny v současných osevních postupech jsou představovány zejména víceletými pícninami, jejich osevní plocha přitom v současné době v České republice spíše klesá (Frouz, Frouzová 202). Je to dáno tím, že došlo k poklesu stavu skotu. To souvisí jednak se změnou zdravotních preferencí zákazníků, jednak se snížením efektivity produkce mléka, kdy pro stejnou produkci mléka je třeba méně skotu. Svoji roli mohla sehrát i často diskutované negativní role skotu v globálním oteplování díky produkci metanu, který je významným skleníkovým plynem. Zvyšování podílu víceletých pícnin na orné půdě není problém z pohledu agronomického (máme dostupné plodiny a odrůdy, ověřenou agrotechniku atp.), ale naráží na problém odbytu. Jak využít napěstovanou biomasu. V současné době se objevují pokusy o technologickou úpravu biomasy víceletých pícnin tak, aby mohla sloužit jako krmivo pro nepřežvýkavá hospodářská zvířata jako jsou prasata či drůbež (Santamaria-Fernandez, 2017). Tento výzkum je pořád daleko od technologického využití, ale nabízí potenciální cestu, jak snížit dovoz sóji pro zajištění krmiva monogastrických hospodářských zvířat, a přitom zvýšit podíl pěstování víceletých pícnin s příznivým dopadem na půdu.

2.2.2. Pokusy o vyšlechtění vytrvalých plodin

V posledních letech se klade ještě větší důraz na výzkum a vývoj víceletých obilovin, zejména tedy rýže, pšenice a kukuřice, jakožto hlavních světových plodin. Výzkum probíhá na několika místech na světě jako je například The Land Institute v Kansasu, Future Farm Industries Cooperative Research Center v Austrálii, University of Buenos Aires, Švédská univerzita zemědělských věd, Washington State University a the Yunnan Academy of Agricultural Science v Číně (Cox et al., 2010). Jak bylo výše uvedeno, významným rysem

domestikace je ztráta víceletosti a pěstování původně víceletých plodin jako plodiny jednoleté (Frouz a Frouzová 2021). Nicméně negativní environmentální dopady pěstování jednoletých plodin vedly některé badatele ke snaze vyšlechtit vytrvalé alternativy rozšířených jednoletých plodin, zejména obilovin. Vývoj víceletých obilovin využíval konvenční šlechtitelské technologie s dvěma obecnými přístupy: domestikace divokých druhů vytrvalých trav, které mají potenciál jako komerční obiloviny, anebo hybridizace současných druhů jednoletých obilovin s příbuznými vytrvalými druhy pro získání požadovaných vlastností vytrvalých rostlin (Cox et al., 2010).

2.2.2.1. Vytrvalé obiloviny

U pšenice, jakožto globálně nejvíce využívané jednoleté plodiny, se docílilo vyvinout dvouletou odrůdu, která se dožívá dvou až pěti let. Tato pšenice dokáže přežít suchá léta, chladné zimy a každé léto produkuje semena podobné kvality jako semena jednoleté pšenice (KBS, 2010). Bohužel odrůdy trvalé pšenice nepřesáhly výnosy jednoleté pšenice a výrazně se po první sklizni snižují (Murphy et al., 2009). Zároveň se v průběhu let snižuje množství lepku obsaženého v plodině, což znemožňuje část jejího využití například při kynutí.

V The Land Institute dochází k vývoji víceleté pšenice křížením ročních druhů pšenice s druhem pýru (The Land Institute, 2024). Jedním z příkladů již používané vytrvalé obiloviny pocházející z rodu *Thinopyrum* je *Thinopyrum intermedium*, kerzka, která se pěstuje po celé USA, Kanadě a také v Eurasii (Culman, 2015). Od 80. let 20. století podléhá tento druh domestikaci pro zlepšení plodnosti semen a výnosu zrna. Většina výzkumu této plodiny probíhá právě v The Land Institute v Kansasu, USA (de Oliveira et al., 2020). *Thinopyrum intermedium* také produkuje jedlá zrna, která lze využít jako náhradu pšenice seté, žita nebo ječmenu (DeHaan, 2017). Hlavní aspekty, které pozitivně ovlivňují prostředí je schopnost kerzky efektivně udržovat a využívat vodu po celé vegetační období rostliny díky poměrně hlubokému a hustému kořenovému systému, což je velmi prospěšné pro zemědělství v době extrémních výkyvů počasí. Kerzka má také vyšší evapotranspiraci a příjem uhlíku v porovnání s jednoletými plodinami (Culman, 2015).

Výzkum vytrvalé rýže čelí několika problémům. Rýže setá, jedna ze základních obilovin lidstva, je obvykle jednoletá plodina. Přesto se často stává, že produkuje druhou úrodu, což z ní činí slabě vytrvalou plodinu (Sacks et al., 2003a). Díky této vlastnosti je považována za nejnázve vyvinutelnou a přijatelnou vytrvalou plodinu pro farmáře. Nicméně hlavní výzvou je, že se rýže setá pěstuje převážně v chudších a méně rozvinutých zemích v Asii (Santos et al.,

2003). Tato skutečnost vytváří politickou bariéru, která omezuje finanční prostředky směřující do výzkumu a vývoje vytrvalé rýže. Místem, kde dochází k nejefektivnějšímu výzkumu je Yunnanská akademie zemědělských věd v Číně. Pro vývoj vytrvalé verze jednoleté rýže je používána mezidruhová hybridizace, konkrétně s vytrvalými příbuznými *Oryza sativa*, *O. rufipogon* a *O. longistaminata* (Sacks et al., 2003a). Pěstování vytrvalé rýže by zároveň mohlo v Asii (zejména teda v Číně) pozitivně ovlivnit erozi půdy a žďáření lesů. Celoroční přítomnost vytrvalých plodin a jejich rozsáhlých kořenových systémů stabilizuje a zúrodňuje erodující půdu tak, že na ní i v dalších letech mohou zemědělci produkovat plodiny. Tím by došlo k omezení žďáření dalších oblastí potřebných k zemědělské činnosti kvůli neúrodnosti předešlé půdy. Dalším problémem pro výnosy rýže seté jsou období sucha a dešťů, které rýže vytrvalá zvládá o mnohem lépe (Pimentel et al., 2012).

Vznik vytrvalé kukuřice je jeden z více problémovějších, vzniká zde mnoho biologických, technických a genetických výzev. Kukuřice setá a její vytrvalý příbuzní jako je například *Zea perennis* mají genetické rozdíly, které ztěžují hybridizaci a následný genový tok. Navíc *Zea perennis* je tetraploidní, což znamená, že má čtyři sady chromozomů, zatímco kukuřice setá je diploidní rostlina. Křížení těchto dvou druhů by mohlo vést k aneuploidii neboli nepravidelnému počtu chromozomů, která by mohla způsobit problémy v růstu a reprodukci hybridů (Tang et al., 2015). Dnes probíhají výzkumy a experimenty přenosu genového toku mezi *Zea perennis* a kukuřice seté prostřednictvím speciální aneuploidní rostliny (MDT) odvozené z mezidruhového hybridu těchto dvou druhů (Fu et al., 2015).

Sorghum neboli čirok je také jednou z nejpěstovanějších zemědělských plodin. Jedná se o tropickou obilovinu z čeledi lipnicovitých, která je pěstována například na výrobu mouky a ke krmným či technickým účelům. U této plodiny také probíhá vývoj trvalých druhů. Nejčastěji dochází k hybridizaci mezi *Sorghum bicolor* a *Sorghum halepense* nebo *Sorghum propinquum*. Vytrvalé rostliny čiroku produkují podzemní stonky známé jako oddenky, které klíčí a vytvářejí úrodu pro příští sezónu. Právě oddenek je klíčovou částí rostliny pro její přežití, avšak v určitých klimatických podmínkách může uhynout. Například oddenkové linie, které nepřežijí zimy v Kansasu, jsou vytrvalé v subtropických nebo tropických oblastech Severní Ameriky a Afriky. Selektivní šlechtění a zpětné křížení prováděné v letech 2002–2009 vedly ke zvýšení výnosů zrna a hmotnosti semen šlechtitelských linií. Výnosy zrna čiroku ve druhé sezóně z regeneračních oddenků byly srovnatelné s výnosy v první sezóně (Kantar, 2014). Pozornost při

šlechtění je obrácena na velikost a chuť semen. Zda dokáží vytrvalí hybridi přežít i období sucha v subsaharské Africe testuje The Land Institute (The Land Institute, 2024).

2.2.2.2. Slunečnice

Slunečnice, zejména tedy slunečnice olejná je bylina z čeledi hvězdnicovitých a lidská populace ji využívá především k získání slunečnicového oleje. The Land Institute pracuje na domestikaci jejího vytrvalého příbuzného, a to *Silphium integrifolium* (The Land Institute, 2024). Tato vytrvalá forma by mohla nahradit olejnaté plodiny jako je právě slunečnice olejná a sója luštinatá (The Land Institute, 2024). Domestikace *Silphium integrifolium* zvýšila výnos semene a nadzemní biomasu v sazenicích (Vilela, 2018). Zajímavé je, že *Silphium integrifolium* získává dusík a vodu z podkořenné zóny mnoha jednoletých a možná i vytrvalých trav (Weaver, 1935). Proto jsou cílovými prostředními pro zavedení této nové plodiny pravděpodobně oblasti s nespolehlivou vlhkostí půdy, s vyplavováním dusíku a s problémy se zavlažováním. Další výzvou při domestikaci této plodiny se stává rez *Puccinia silphii* a mol *Eucosma giganteana*, kteří na této rostlině parazitují. Proto se i dnes nadále pracuje na hybridizaci a šlechtění tohoto druhu za cílem získání odolnosti a tolerance vůči některým patogenům. Dále je cílem šlechtění snížení výšky rostliny (Vilela, 2018).

2.2.2.3. Luštěniny

Většina druhů luštěnin spadá do čeledi bobovitých, které jsou typické pro jejich plod, lusk (Rahman, 2014). Vývoj a výzkum luštěnin probíhá zejména kvůli jejich charakteristické vlastnosti fixace dusíku. Díky jejich symbióze s bakteriemi fixujícími dusík s názvem *Rhizobia* mají vytrvalé luštěniny velký potenciál zvýšit udržitelnost a úrodnost zemědělských oblastí právě prostřednictvím přidávku dusíku do půdy pro následné plodiny (Carlsson & Huss-Danell, 2003). Kromě toho poskytují tyto plodiny i velmi výživná vysoce proteinová semena pro lidskou potřebu nebo jako krmivo pro hospodářská zvířata (The Land Institute, 2024).

2.3. Porovnání jednoletých a víceletých plodin

Jednoleté plodiny mají krátký životní cyklus, který trvá obvykle od jednoho do dvou vegetačních období. Díky tomu můžeme rychle sklízet úrodu a flexibilně plánovat osevnické postupy. Tato vlastnost však znamená, že rostliny většinu své energie investují do kvetení a tvorby semen (Frouz a Frouzová, 2021). To se projevuje i na jejich kořenovém systému, který bývá mělký, což může přispět k erozi půdy a omezené schopnosti zadržovat vodu (Randall et al., 1997; Gantzer et al., 1990). Na druhou stranu, vytrvalé plodiny zůstávají na poli několik let, což umožňuje kontinuální pokrytí půdy a zlepšení její kvality (Jackson, 1980; Scheinost et al.,

2001). Vytrvalé plodiny investují svou energii zejména do přežití, proto si budují velmi hluboký a rozsáhlý kořenový systém, který je schopen efektivněji vycytávat živin a vodu z různých vrstev půdy (DeHaan et al., 2005). Kořenový systém vytrvalých plodin snižuje půdní odtok a nejen, že stabilizuje půdu, ale také zlepšuje její strukturu a úrodnost (Glover et al., 2010b; Neher, 1999; Galvez et al., 2001). Tento dlouhodobý přístup přináší pravidelnou úrodu a přispívá k udržitelnějšímu zemědělství.

Jednoleté plodiny často potřebují vyšší množství hnojiv, pesticidů a herbicidů (Michalko et al., 2024). Tato vyšší spotřeba chemických látek může negativně ovlivnit kvalitu vody a půdy, a také snížit biodiverzitu (Faeth, 2000; Michalko et al., 2024). Vytrvalé plodiny, díky svým hlubokým kořenům a dlouhodobému vegetativnímu krytu, obvykle vyžadují méně chemických látek (Crews, 2004). Tím se snižuje ekologický dopad a podporuje udržitelnější zemědělství.

Jednoleté plodiny mohou mít negativní vliv na biodiverzitu a ekologické procesy, protože vyžadují časté změny a obdělávání půdy (Mestre et al. 2018; Knapp et al. 2022). Vytrvalé plodiny, které zůstávají na poli několik let, pomáhají udržovat přirozené prostředí pro různé organismy a přispívají k ekologické rovnováze (Culman et al., 2010).

Časté obdělávání, výsev a sklizeň, zvyšuje finanční náklady, pracovní náročnost a využívání fosilních paliv. Naopak u vytrvalých plodin vyžadující méně časté zásahy, se náklady na práci a pohonné hmoty snižují. Tento aspekt přispívá k ekonomické efektivitě a udržitelnosti vytrvalých zemědělských systémů (Glover et al., 2010a).



Obrázek 1.: Porovnání ekosystémových služeb ekosystému s jednoletými druhy a ekosystému s vytrvalými druhy (převzato od Crews et al., 2018).

3. Zemědělské systémy: polykultury vs monokultury

Před nástupem průmyslového zemědělství bylo charakteristické pěstování více rozmanitých druhů plodin na jedné ploše neboli polykultur (Vandermeer, 2011). Pole zahrnovala zejména několik hlavních plodin, jako byla například kukuřice, dýně či fazole, společně s menším množstvím plodin, které byly vysazovány do mezer mezi hlavními plodinami (Altieri, 1995). Pěstování polykultur bylo pro farmáře v minulosti přínosné právě kvůli nedostatku chemických a biologických možností pro boj se škůdci (Altieri, 1995). S příchodem průmyslové revoluce a moderního zemědělství se začal klást větší důraz na pěstování monokultur, jakožto polí s jedním druhem plodiny. Motivace pro tuto změnu byly zejména ekonomické, technologické, vědecké a politické (Altieri, 1999). V této kapitole si přiblížíme pozitivní a negativní stránky a dopady na ekosystémy pěstování plodin v těchto dvou odlišných zemědělských systémech.

3.1. Globální rozšíření monokultur, jejich výhody a nevýhody

Monokultury, jakožto zemědělské plochy s vysetým jedním druhem plodiny v daném čase tvoří nejvíce globálně využívaný zemědělský systém. Razantní přechod na monokultury byl zapříčiněn mechanizací zemědělství, což usnadnilo a zefektivnilo zpracování a sklizeň na velkých zemědělských plochách. Stroje pro obhospodařování zemědělských polí jsou sestaveny pro rozsáhlé homogenní pole, což vede k preferenci monokultur (Altieri, 1999).

Monokultury usnadňují výrobní procesy a umožňují specializaci, což vede k nižším nákladům na jednotku produkce (Altieri, 1999).

3.1.1. Výhody pěstování monokultur

3.1.1.1. Efektivita práce

Hlavním důvodem, proč se zemědělci rozhodují pro monokulturní zemědělství, je jejich snaha maximalizovat výnos a minimalizovat práci, která je s tím spojena (Power a Follett, 1987). Zemědělec například nakoupí stroje specializované pouze na sběr a práci s pšenicí, tyto stroje pak použije na všech svých pozemcích. Tento přístup obvykle vede k nejefektivnějšímu využití strojů a minimalizuje náklady na vybavení na jednotku produkce. Na efektivitu zemědělství tlačí nárůst lidské populace jako takové. Předpokládá se, že do roku 2050 bude světová populace dosahovat 8 až 10 miliard (Bhat a Huang, 2021). To znamená, že do roku 2050 musí celosvětová potravinová produkce vzrůst alespoň o 70 % (Alfred et al., 2021). Tato skutečnost vyvíjí na již tak omezené zdroje a životní prostředí velký tlak. Společně s tímto problémem se začalo vyvíjet precizní zemědělství, které řeší geografické a časové variability na zemědělských polích (Monteiro et al., 2021). Jedním z klíčových aspektů precizního zemědělství je integrace nejmodernějších technologií a shromažďování dat, podle kterých mohou posléze zemědělci činit rozhodnutí ohledně zdraví plodin, alokaci zdrojů a optimalizaci výnosů (Karunathilake et al., 2023). Přístup k modernizaci a mechanizaci zemědělských postupů je nezbytný zejména v kontextu stále se snižujícího počtu lidí pracujících v zemědělství, kteří musí uživit rostoucí populaci. Například v České republice od roku 2000 ubylo osob pracujících v zemědělství o jednu čtvrtinu, v roce 2020 v tomto sektoru pracovalo jen 178 815 osob (Český statistický úřad, 2021). Na porovnání například v odvětví služeb pracovalo v roce 2022 průměrně 1 097 647 zaměstnanců (Český statistický úřad, 2023).

3.1.1.2. Ekonomická podpora monokultur

Globálně jsou monokultury také podporovány ať už přímo či nepřímo. Například mezinárodní obchod podporuje specializaci na několik hlavních plodin, s kterými se obchoduje na světových trzích. Mnohé vlády a mezinárodní organizace podporují modernizaci zemědělství a používání chemických látek (Gliessman, 2014). V různých zemích jsou monokultury podporovány vládními dotacemi a granty. Tyto dotace mohou zahrnovat finanční podporu, subvencované půjčky a technickou pomoc, což činí monokultury finančně atraktivními pro zemědělce.

3.1.1.3. Vývoj zemědělských chemických látek

Postupný výzkum a vývoj nových účinných pesticidů, syntetických hnojiv a dalších chemických látek také podpořil pěstování monokultur, díky jejich snadné a účinné aplikaci na homogenní pole (Power a Follett, 1987). Při pěstování jedné plodiny má zemědělec možnost vyvinout nejlepší postupy pro hnojení, ochranu před škůdci, orbu a podobně (Power a Follett, 1987). Zároveň od velmi dávných dob se ví, že monokultura často vede z dlouhodobého hlediska k poklesu výnosů, i při dodatečném hnojení (Power a Follett, 1987). Zároveň tyto látky zvýšily výnosy plodin a snížily závislost na přírodních procesech (Gliessman, 2014).

3.1.2. Nevýhody pěstování monokultur

I přes celosvětově rozšířené pěstování monokultur má tento typ zemědělství i své nevýhody, které si zde představíme.

3.1.2.1. Ekonomická nestabilita

Jednou z nich je, že vystavuje zemědělce riziku ekonomické nestability. Při pěstování jediné plodiny je pěstitel závislý na jediném trhu a specifických ekonomických podmínkách. Toto riziko bylo sníženo díky federálním podpůrným programům a pojištění plodin, ale stále existuje (Power a Follett, 1987). Zároveň pokud dojde ke kalamitě na monokulturním poli, ve většině případech je celé pole zdevastováno, což z monokultur dělá také ekonomicky nestabilní zemědělský systém (Frouz a Frouzová, 2021).

3.1.2.2. Snižování biodiverzity

Existence monokultur je úzce spojena se snižováním biologické diverzity krajiny jako takové. Pokles biodiverzity je způsoben několika faktory. Vytváření homogenní zemědělské krajiny, která neposkytuje různorodé životní prostředí pro různé druhy rostlin, zvířat a mikroorganismů, snižuje počet dostupných stanovišť pro mnoho druhů, čímž dochází ke snížení celkové biodiverzity. Zavádění monokultur způsobuje devastaci přirozených stanovišť, což také přispívá k poklesu biodiverzity (Foley et al., 2011). Degradovaná půda má nižší schopnost podporovat růst různých druhů rostlin a mikroorganismů, což negativně ovlivňuje biodiverzitu půdního ekosystému (Lal, 2001).

Narušování přirozené krajiny rozsáhlými monokulturními plochami může mít přímý dopad na hojnost a rozmanitost přirozených nepřátel, protože čím větší je plocha monokultury, tím nižší je životaschopnost příslušných populací (Altieri, 1994). Dochází ke snižování rostlinné a živočišné druhové diverzity, k fragmentaci krajiny narušující další přirozené procesy, ke snížení ekologické funkce krajiny a ke změnám v mikroklimatu (Altieri, 1999).

Ubytování biodiverzity živočichů, jako jsou zejména opylovači, přirození nepřátelé plodinových škůdců a obecně volně žijící zvířata, je také způsobeno nadměrným používáním pesticidů. Přestože používáme pesticidy v obrovském množství (až 500 milionů kilogramů ročně), ztráta výnosů kvůli škůdcům (mezi 20 a 30 % u mnoha plodin) ukazuje na ekologickou zranitelnost tohoto typu zemědělství (Altieri, 2009). Momentálně i nadále spotřeba pesticidů roste, přičemž tento nárůst poukazuje spíše na zintenzivnění využívání chemikálií nežli na rozšiřování zemědělských ploch (Liebman, 1997).

3.1.2.3. Náchylnost k patogenním organismům a škůdcům

Zavedení rozsáhlých monokultur snížilo výskyt přirozených nepřátel škůdců, což narušilo schopnost regulace škodlivých organismů, chorob a plevelů v krajině a vedlo k extenzivním kalamitám s nimi spojenými (Altieri a Nicholls, 2004). Ke snížení přirozených škůdců došlo zejména kvůli využívání pesticidů a chemických látek ve velkých mírách, jelikož se jim nedaří v toxickém prostředí. Monokultury zároveň představují neomezený zdroj potravy pro škůdce plodin právě při konkrétních kalamitách (Frouz a Frouzová, 2021). Homogenní monokultury postrádají mechanismy, které by jim pomohly vyrovnat se s extrémními klimatickými jevy, jako jsou sucha nebo hurikány (Altieri a Nicholls, 2004). Celková úroda je náchylnější k výkyvům počasí a při jediném extrémním výkyvu může dojít k devastaci celého pole najednou (Frouz a Frouzová, 2021).

3.1.2.4. Dopady na životní prostředí

Půda je v monokulturách znehodnocována, a to především jejím jednostranným využíváním, kdy je z půdy vyčerpáno velké množství živin. Různé plodiny mají odlišné nároky na živiny, a když se na jednom místě stále pěstuje stejná plodina, určité živiny se mohou vyčerpat rychleji než jiné. Například, pokud se na poli neustále pěstuje pšenice, která má vysoké nároky na dusík, může dojít k rychlému vyčerpání tohoto prvku v půdě. Bez adekvátní aplikace hnojiv a dalšího managementu může docházet k degradaci půdní úrodnosti a snížení výnosů (Tilman et al., 2002). Stejný typ plodin z půdy odebírá stejné nutrienty, což omezuje spolupráci a vzájemnou výměnu látek mezi jednotlivými plodinami jako se děje například u polykultur (Frouz a Frouzová, 2021). Jednostranné pěstování stejné plodiny může negativně ovlivnit strukturu a kvalitu půdy. Monokultury obvykle vedou k opotřeбенí půdní struktury, protože stejná plodina s konstantními kořenovými systémy a pěstebními praktikami nevyváženě ovlivňuje půdní vlastnosti. To může vést k erozi, zhutnění půdy a snížení schopnosti půdy zadržovat vodu (Pimentel et al., 1995).

Velké monokulturní plochy, zejména když jsou plodiny pěstovány na strmých svazích nebo v oblastech s nízkým vegetačním pokryvem, mohou být náchylnější k erozi. Absence různých druhů rostlin, které by pomohly udržet půdu na místě a zlepšit její strukturu, zvyšuje riziko eroze, což může vést k odplavení úrodné vrstvy půdy a dalším ekologickým problémům (Lal, 2001). Zároveň jsem monokulturní pole více náchylná k extrémním výkyvům počasí (Wright et al., 2021).

Monokultury, zejména v oblastech s nízkou dostupností vody, mohou zvýšit tlak na vodní zdroje. Rostliny s vysokými nároky na vodu, pěstované na velkých plochách, mohou vyčerpat místní vodní zdroje a přispět k problémům s dostupností vody pro ostatní využití a ekosystémy (Foley et al., 2011).

Kvůli nadměrnému využívání chemických látek můžeme vidět environmentální dopady zavádění monokultur na eutrofizaci povrchových vod způsobené zejména dusíkatými hnojivy. Tato chemická hnojiva znečišťují životní prostředí, protože se často používají nadměrně a plodiny je nevyužívají efektivně. Nutrienty z hnojiv, které se dostávají do povrchových vod, podporují proces eutrofizace, který je spojen s nadměrným růstem řas a vodních rostlin. Tento rychlý růst řas zhoršuje kvalitu vody tím, že blokuje světlo, zabíjí podvodní organismy a snižuje obsah kyslíku ve vodě, což může vést k zániku veškerého života ve vodním ekosystému. (McGuinness, 1993).

3.2. Pěstování polykultur a jejich vliv na životní prostředí

Pokud mluvíme o polykultuře, myslíme tím pěstování dvou či více druhů na jedné zemědělské ploše. Může docházet i k pěstování více odrůd téže plodiny současně. Plodiny mohou být promíseny, odděleny v pásech či alejích nebo odděleny časově. Časové oddělení funguje tak, že se nejdříve vyseje první plodina a následně po nějakém čase nebo až při dozrání první plodiny se zaseje plodina druhá (Selecký, 2010). Dnes je využití polykultur v agro hospodářství spíše výjimkou. K jejich zavádění dochází spíše na menších zemědělských plochách nebo na rodinných zahradách.

3.2.1. Nevýhody pěstování polykultur

Uvedeme si hlavní výhody a nevýhody zemědělských praktik založených na pěstování plodin v polykulturách. Hlavními nevýhodami je komplikovanost současné sklizně více druhů najednou, které by se sklízely například pro zisk semena (Frouz a Frouzová, 2021). Problém se

může objevit i v náročnosti plánování a znalosti vlastností jednotlivých druhů plodin. Kvůli vzájemné koexistenci dvou a více druhů na sebe druhy působí určitými alelopatickými vlastnostmi, proto plánování jednotlivých plodin v jedné polykultuře musí provádět specialista, aby nedocházelo k vzájemné inhibici plodin (Selecký, 2010). Pro maximalizaci pozitivních a vzájemně prospěšných interakcí mezi plodinami v polykulturním systému je tedy zásadní pečlivě vybírat vhodné druhy, stejně jako správně naplánovat časy setí a sklizně, hustotu výsadby a prostorové uspořádání (Ren et al., 2014). Pro kalkulaci ohodnocení a porovnání účinnosti hospodaření s polykulturami se zabývá systém LER, o kterém se zmiňují níže v práci.

Na polokulturní pole je obtížnější aplikovat hnojiva a podpůrné chemické látky, jelikož se zde nachází více plodin s odlišnými preferencemi na živiny a jiné látky (Selecký, 2010).

3.2.2. Výhody pěstování polykultur

Jak jsem již zmínila, pěstování polykultur má velké množství výhod, které pozitivně ovlivňují plodiny jako takové, ale mohou mít i globální důsledky. Řada z nich se často projevuje až u starších porostů, proto ze začátku pěstování polykultur mohou být zemědělci skeptičtí.

3.2.2.1. Biodiverzita

Při pěstování různorodých rostlin na jedné ploše vzniká velká diverzita stanovišť, útočišť a úkrytů pro rozličné organismy. Proto se očekává, že při zvýšení rozmanitosti plodin na poli by se měla zvýšit i biologická rozmanitost (Lichtenberg et al., 2017). Na rozdíl od velkých monokulturních polí, která vytvářejí mozaiku stanovišť na velkém měřítku, a polokulturních prvků, které mohou být přítomné na jejich okrajích, vytvářejí polykultury mnohem jemnější mozaiku stanovišť v rámci pěstební plochy. Tyto rozmanité pěstební systémy mohou nabídnout širší spektrum a kontinuitu zdrojů pro různé skupiny organismů, jako jsou bezobratlí (Lichtenberg et al., 2017), obojživelníci (Collins & Fahrig, 2017), netopýři (Monck-Whipp et al., 2018), ptáci (Yahya et al., 2022) či půdní mikroorganismy (Guzman et al., 2021). Může se jednat o půdní organismy, kteří zlepšují půdní strukturu a její fyzikální vlastnosti, nebo terestrické organismy jako je například množství opylovačů a živočichů, kteří zbavují pole škůdců (Larkin a Honeycutt, 2005). Díky těmto organismům stoupá úrodnost a zdraví plodin a půdy a zároveň i jejich odolnost proti škůdcům (Pereira et al., 2015). Nicméně, dopady rozmanitosti plodin na přidruženou divokou biodiverzitu jsou složité a vysoce heterogenní, protože jednotlivé taxony reagují na diverzifikaci plodin různými způsoby na různých prostorových a/nebo časových škálách. Vliv rozmanitosti plodin na úrovni pole je často ovlivněn charakteristikami okolní krajiny (Tuck et al., 2014).

3.2.2.2. Odolnost proti patogenům spojená s vyššími hospodářskými výnosy

Polykulturní pole se stává více odolným vůči patogenním organismům a škůdcům právě díky zvyšování biologické diverzity. Dochází k nárůstu organismů, kteří dokážou pole zbavit škodlivých organismů a parazitů. Díky odlišnému vzrůstu a jejich výšce se zlepšuje vzduchová prostupnost, což vede k omezení vlhkosti a plísni. Uvedeme si zde dva pokusy, které dokazují menší podíl patogenních organismů na polokulturních polích. Pro odolnost systému stačí pěstovat například jen více různých odrůd jednoho druhu plodiny, o čem svědčí pokus s rýží v Číně.

Experiment od Zhu et al. (2000) probíhal v letech 1998 a 1999 v čínské provincii Yunnan, kde byly na všech rýžových polích v pěti městských obvodech vysázeny geneticky diverzifikované rýžové plodiny. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, zda zvýšení genetické diverzity v rámci rýžových plodin může snížit závažnost a výskyt nemocí, zejména houby *Magnaporthe grisea*, která představuje nejrozšířenější patogen rýže a způsobuje plísňové onemocnění. Výsledky ukázaly, že se zvýšením genetické diverzity se snižuje výskyt a závažnost tohoto patogenu. Tato skutečnost byla vysvětlena vyšší genetickou variabilitou v rámci jedné plodiny, která obsahovala více rezistentní odrůdy vůči patogenům. Dalším vysvětlením mohly být pozměněné mikroklimatické podmínky, jako je teplota, vlhkost a světelné podmínky, které nevyhovovaly patogennímu organismu natolik. Tyto podmínky byly způsobeny rozdílným vzrůstem jednotlivých odrůd. Pokus byl natolik úspěšný, že zemědělci zcela přestali používat fungicidy. Pěstováním dvou odrůd rýže došlo k redukci výskytu patogenní houby o 94% a celkový výnos rýže byl o 89% vyšší. Tímto studie poukázala na důležitost genetické diverzity v zemědělských praktikách, zejména v posilování odolnosti vůči chorobám a podpoře udržitelné produkce plodin (Zhu et al., 2000).

Podobný experiment, zkoumající výhody pěstování geneticky variabilních polykultur ve srovnání s monokulturou jednoho druhu, byl proveden Li et al. v roce 2009. Na 15,3 hektarech půdy v Číně byly vysazeny různé kombinace odrůd rýže, přičemž některé plochy obsahovaly monokultury a některé byly tvořeny směsí různých polykultur. Plodiny, které byly v různých kombinacích vysázeny na polích byla pšenice, tabák, kukuřice, cukrová třtina, brambory a fazol. Pro efektivní sklizení polykultury byly plodiny vysázeny v souběžných střídavých monokulturních pásech. Pokud došlo k pěstování kukuřice současně s tabákem, výnos tabáku na jednotku plochy byl srovnatelný s výnosy monokultury tabáku. Avšak tím, že byl pěstován v polykultuře s kukuřicí, mohl si farmář k výnosu z tabáku přičíst i sklizeň kukuřice, která se pohybovala okolo hodnoty 85% monokulturní produkce. Zároveň došlo až k 19% redukci

patogenního organismu, houby *Exserohilum turcicum*, která parazituje na kukuřici. Při polykulturním pěstování kukuřice a cukrové třtiny vědci získali podobné výsledky. Souběžné pěstování fazolu a pšenice se ukázalo též jako výhodné. Výnos pšenice v polykultuře byl stejný jako v monokultuře, zatímco výnos fazolu činil 34 % výnosu z monokultury. Bobová plíseň způsobena houbou *Botrytis fabae* byla redukována o 33 %. Redukci onemocnění rostlin si můžeme například vysvětlit právě výsevem jednotlivých plodin mezi sebou, kdy řady fazolu byly oddělené řadami pšenice, což omezilo přenos parazitické houby (Li et al. 2009). Nejefektivnější bylo pěstování brambor a kukuřice v jedné polykultuře. Daný prostor byl nejúčinněji využit právě kombinací těchto dvou plodin, kde se doplňovaly vysoké rostliny kukuřice a nízké rostliny bramboru. Výnosy kukuřice byly v polykultuře o 47 % vyšší než v monokultuře, zatímco výnosy brambor byly vyšší o 20 %. Hodnota LER dosáhla významné hodnoty 2,67, což naznačuje, že současné pěstování brambor a kukuřice zvýšilo efektivitu produkce více než dva a půl krát. Výskyt plísně bramborové, způsobené *Phytophthora infestans*, patogenem patřící do oomycet zodpovědným za hladomor v Irsku v 19. století, byl snížen o 39 %. Výskyt kukuřičné spály byl oproti monokultuře snížen o 30 % (Li et al. 2009).

3.2.2.3. Efektivnější využívání půdních živin a vláhy

Výsledky této studie poukázaly na velkou řadu výhod pro zemědělce při souběžném pěstování více plodin na jednom poli. Mezi hlavní výhody patří lepší využívání zdrojů na daném stanovišti díky různě hlubokému kořenovému systému jednotlivých plodin, a tak dochází k využívání vláhy a nutrientů z různých půdních hloubek (Frouz a Frouzová, 2021). Zároveň mají také odlišné požadavky na množství jednotlivých živin a jejich vzájemný poměr. Některé druhy v polykulturách využívají zdroje, které jsou nedostupné pro jiné druhy. Tím si napomáhají například k mobilizaci živin z hluboké vrstvy půdy nebo některé druhy dokáží fixovat dusík pomocí symbiózy s bakteriemi, a tím dodávají dusík do půdy a poskytují ho jiným rostlinám (Kahn et al., 1998). Existuje mnoho dalších interakcí mezi rostlinami, které podporují polykulturní růst plodin. Výsledkem spolupráce rostlin je úrodnější půda s výhodnějšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi.

3.2.2.4. Koexistence jednotlivých plodin v polykulturách

Rozdílnou výškou odlišných plodin se zlepšuje vzduchová prostupnost vedoucí k omezení vlhkosti a plísní. Jednotlivé rostliny mají různé požadavky na světlo, takže správným výběrem kombinace rostlin lze optimálně využít dostupné světelné podmínky. Efektivita zachycování světla v průběhu vegetační sezóny může být také maximalizována, pokud se plodiny pěstované v polykultuře liší časovým rozložením období svého vrcholového růstu, zralosti a období

senescence (Li et al., 2020). Odlišný vzrůst jiný plodin může poskytovat úkryt, vhodné podmínky a strukturální podporu jinému druhu plodiny (Li et al., 2014). Pokud tedy vhodně zkombinujeme plodiny v polykultuře, výsledkem mohou být výrazně vyšší výnosy a nižší náchylnost k nemocem a kompetici o světlo v porovnání s monokulturami (Li et al., 2009).

3.2.2.5. Ochrana před extrémní počasí

Zemědělství je nejvíce zranitelný hospodářský sektor, co se klimatických změn týče. Je závislý na dostatečném množství srážek, teplotě a rovnováze plynů v atmosféře jako je oxid uhličitý a metan. Nové formy patogenů a škůdců se mohou vyvinout, pokud se klima Země změní natolik, že nebudou existovat chladnější zimy, kdy za normálních okolností dochází k úhynu patogenních organismů (Altieri et al., 2015). Zároveň globální bezpečnost potravin a změna klimatu je velmi úzce spojeny. Přeměna monokulturních polí na polokulturní pole představuje jednu z možných cest ke zvýšení produktivity, udržitelnosti a odolnosti zemědělské výroby při současné změně klimatu (Altieri, 2002). Předpokládá se, že změnou klimatu a následnými zemědělskými ztrátami budou nejvíce postiženy tropické oblasti. Například od roku 1981 do roku 2002 bylo zaznamenáno značné snížení globálních výnosů nejpěstovanějších plodin, jako je kukuřice, pšenice a další, související se změnou klimatu o 40 milionů tun ročně (Lobell et al. 2011). Větší rozmanitost agroekosystémů může pomoci vyrovnat se s proměnlivými srážkami a teplotními vzorci a možná i zvrátit klesající výnosy v dlouhodobém horizontu. Různé plodiny a odrůdy totiž reagují na tyto změny odlišně (Altieri a Koohafkan 2013), což může zemědělci zajistit alespoň část úrody (Selecký, 2010)

3.2.3. Kalkulace LER (Land Equivalent Ratio)

Kvůli komplexnosti jednotlivých plodin a jejich spolupráce a soužití s ostatními plodinami došlo k vyvinutí systému LER (=Land Equivalent Ratio), který slouží k ohodnocení a porovnání účinnosti jednotlivých metod hospodaření. Lze jej definovat jako relativní plochu půdy pro jednotlivé plodiny, která je potřebná k dosažení výnosů dosažených při smíšeném pěstování (Willey, 1979). Kromě výhod vyšších výnosů díky smíšenému pěstování nabízí také možnost ochrany proti tržnímu riziku a/nebo infekcím rostlinnými chorobami, a zároveň zlepšuje úrodnost půdy (Zhang a Li, 2003).

Tento systém funguje na principu měření pozitivních a negativních interakcí plodin a následným matematickým vyjádřením míry efektivity daného specifického polykulturního systému. Pro výpočet LER je třeba provést následující kroky, vydělit výnos každé plodiny

pěstované v polykultuře výnosem té samé plodiny pěstované v monokultuře a poté výsledky těchto výpočtů (poměry výnosů) sečíst (Willey, 1979). Pokud je hodnota LER vyšší než 1,0, souběžné pěstování plodin je výhodné. Naopak, pokud je LER menší než 1,0, pěstování plodin v polykultuře je nevýhodné. Hodnota LER = 2 znamená, že polykultura je dvakrát produktivnější než jednotlivé monokultury dohromady, což znamená, že k produkci stejného množství plodin stačí poloviční plocha zemědělské půdy (Kantor, 1999).

Tabulka 1 – Příklad výpočtu hodnoty LER (Land Equivalent ratio) pro smyšlenou polykulturu, složenou ze tří různých plodin.

	Výnos v polykultuře [t/ha]	Výnos v monokultuře [t/ha]	Dílčí LER
Plodina A	5,4	5	$5,4/5=1,08$
Plodina B	9	17	$9/17=0,53$
Plodina C	2	4,5	$2/4,5=0,44$
Celkový LER			2,05

LER se rovná 2,05, to znamená, že daná polykultura je dvakrát produktivnější, než jednotlivé monokultury dohromady.

3.2.4. Osevní postupy pěstování polykultur

Plodiny v polykulturách se mohou pěstovat a na poli se střídají různými způsoby. Zde si uvedeme jen ty nejnámější a nejdůležitější metody pěstování více plodin na jedné zemědělské ploše.

3.2.4.1. Vícenásobné pěstování plodin (Multiple cropping)

Vícenásobné pěstování, definované jako sklizeň více než jednou ročně, je běžný způsob, jak efektivně využívat půdu v tropických a subtropických oblastech, kde jsou dešťové sezóny dostatečně dlouhé nebo je možné zavlažování. Většina zemědělských ploch s tímto specifickým pěstováním plodin se nachází ve východní a jižní Asii. Tato metoda zahrnuje pěstování polykulturních či monokulturních plodin na stejné ploše půdy během jedné vegetační sezóny. Jakmile dojde k první sklizni plodin, je třeba co nejrychleji nebo okamžitě zasít plodiny nové. Na 70 % plochy, která praktikuje tento způsob pěstování plodin, se pěstují polykultury a na zbylých 30 % monokultury. Celosvětově největší vícenásobné pěstební systémy podle plochy je polykultura více odrůd rýže, polykultura pšenice s rýží, pšenice s kukuřicí a pšenice s bavlnou.

Tento přístup pomáhá zvýšit zemědělskou produkci a rozmanitost plodin, což přináší jak ekonomické, tak ekologické výhody (Waha et al., 2020).

3.2.4.2. Pěstování ve fázích (Relay cropping)

Relay cropping je jedním z neúčinnějších a nejpraktičtějších způsobů pěstování, který využívá různé technologie šetrné k přírodním zdrojům. Přístup spočívá v tom, že se nová plodina zasévá do stojící druhé plodiny ještě před tím, než se ta druhá sklízí (Queen et al., 2009). Tento osevní způsob je obzvláště užitečný pro farmáře v oblastech, kde se pěstební sezóna zkracuje kvůli změně klimatu (Zhang et al., 2007a; Jabbar et al., 2010), jelikož mohou pěstovat dvě plodiny během jednoho vegetačního období. Jedná se o udržitelný způsob přístup, který optimalizuje produktivitu systému a umožňuje sklizeň dvou plodin současně, čímž řeší časové kolize mezi výsevem různých plodin. Tento systém může také zlepšit kvalitu půdy, vody a vzduchu (Schepers et al., 2005), zvýšit ekonomický přínos a efektivitu využití půdy a zároveň pomoci kontrolovat plevely a škůdce, což snižuje potřebu chemických pesticidů (Jabbar et al., 2011; Bandyopadhyay et al., 2016). Z tohoto důvodu se tento systém stává stále atraktivnějším pro malé farmáře.

3.2.4.3. Smíšené pěstování (Intercropping)

Tato metoda zahrnuje pěstování dvou nebo více plodin na jedné zemědělské ploše. Meziplodiny mohou zahrnovat: pěstování jednoletých plodin s jinými jednoletými plodinami; pěstování jednoletých plodin s vytrvalými plodinami; a pěstování vytrvalých plodin s jinými vytrvalými plodinami (Eskandari et al., 2009a; Ghanbari and Lee, 2003). Tato metoda je vhodná v oblastech s nízkým množstvím dostupné zemědělské půdy. Ve většině případech se pěstuje hlavní plodina a na zbývajícím prostoru se pěstují další meziplodiny. Intercropping může být realizovaný různými způsoby. Řádkový intercropping zahrnuje zasetí hlavních plodin v pravidelných řádcích, přičemž meziplodiny mohou být pěstovány buď v řádcích, nebo náhodně mezi prvními plodinami. U smíšeného intercroppingu se pěstují dvě nebo více plodin současně bez jakéhokoliv specifického řádkového uspořádání. Tato metoda je často využívána pro pěstování trávy a luštěnin na pastvinách. Pásový intercropping má systém pěstování různých plodin v samostatných, širokých pásch. Každý pás je dostatečně široký pro nezávislé pěstování, ale dostatečně úzký na to, aby plodiny mohly interagovat s (Vandermeer, 1992; Ofori a Stern, 1987).

3.2.4.4. Zelené hnojení (Cover cropping)

Cover cropping využívá plodiny jako „plodiny, které pokrývají půdu“. Jedním z jejich původních účelů bylo zabránit erozi půdy během období, kdy se pole nechávalo ležet ladem mezi sklizněmi. Proto je tento osevní postup označován jako „zelené hnojení“. Plodiny využívané na cover cropping jsou většinou luštěniny, které fixují dusík a obohacují tím půdu pro další plodiny. Luštěniny se pěstují během období, kdy se pole nechává prázdné, aby využily živiny v poli a zároveň ho obohatily právě dusíkem. Tyto plodiny se mohou pěstovat i současně v období růstu hlavní plodiny, kdy musejí být řízeny tak, aby se snížila mezidruhov故事 konkurence. Zahnutí krycích plodin do období, kdy půda není osazena zemědělskými plodinami může dosáhnout mnoha pozitivních následků. Půda s krycími plodinami zůstává krytá a chráněná proti půdní erozi, nedochází ke ztrátám živin a organické hmoty naopak může docházet k dodávání živin do půdy. Nedochází ke zvyšování půdního odtoku, ke stresu půdní fauny a k celkovému snižování produktivity pole (Kaspar a Singer, 2011).

3.2.4.5. Osevní rotace (Crop rotation)

Crop rotation, neboli osevní rotace, je osvědčená zemědělská technika, která zahrnuje střídání různých plodin na stejném poli v průběhu několika sezón. Tato metoda je praktikována již po staletí a je uznávána jako efektivní metoda zlepšení zemědělských výnosů a udržitelnosti. Je potřeba dlouhodobý plán pro správný výběr a vysetí jednotlivých plodin pěstovaných v určitých sezónách. Vysetí jednotlivých plodin musí mít dlouhodobější plán. Tento osevní postup pozitivně ovlivňuje půdy díky obohacování půdy živinami, efektivnímu využívání vody a živin z půdy a zároveň předchází úplnému vyčerpání živin v půdě. Samozřejmě má i mnoho dalších pozitivních vlivů na okolní prostředí. Celkově pomáhá zlepšit zdraví půdy, zvýšit výnosy a snížit ekologické dopady zemědělství (Bullock, 1992).

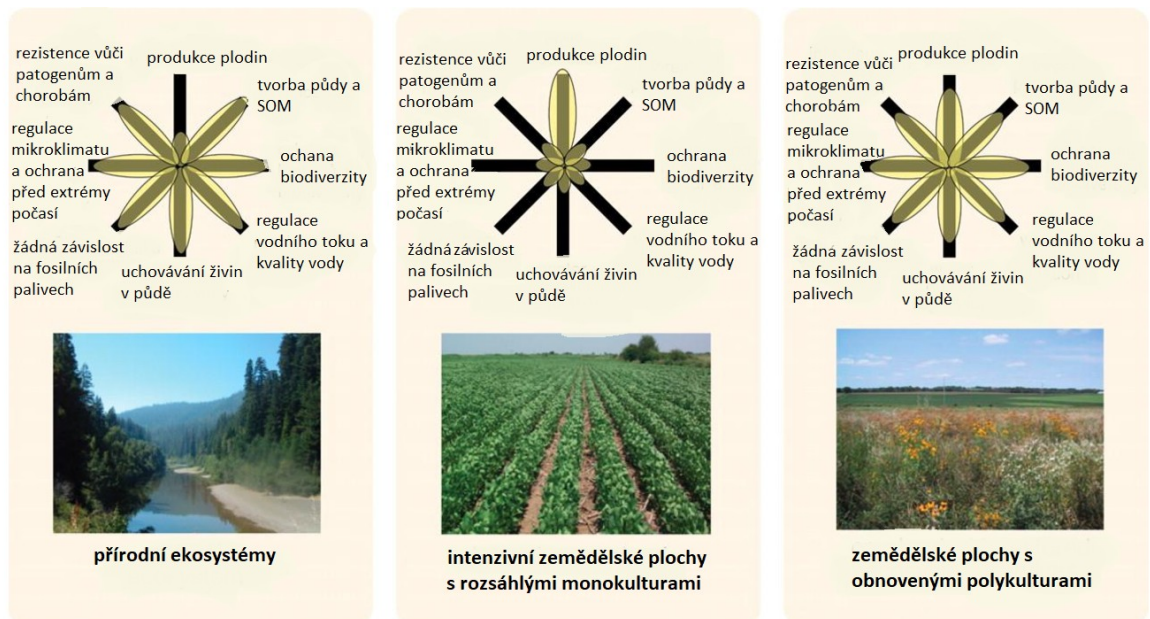
3.3. Porovnání polykultur a monokultur

Pokud porovnáme monokulturní a polokulturní pěstování plodin přijdeme na několik zajímavých skutečností. Monokulturní pěstování je globálně rozšířené, a i přes veškerou ekonomickou podporu může představovat několik rizik pro ekosystém (Gliessman, 2014). Pokud srovnáme obdělávání a efektivitu polokulturních a monokulturních polí, dojdeme k tomu, že efektivita práce na monokulturních polí je vyšší (Power a Follett, 1987). Monokultury usnadňují mechanizaci, standardizaci a optimalizaci zemědělských praktik, což může snížit náklady a zvýšit krátkodobé výnosy (Altieri, 1999). Využívání fosilních paliv je v monokulturním pěstování o mnohem vyšší než v polykulturním. Pěstování polykultur se

může často jevit jako obtížné při sklizení jednotlivých plodin, ale všechno je to o správném výběru systému a charakteru plodin (Frouz a Frouzová, 2021; Selecký. 2010).

Polykultury, přinášejí několik významných výhod. Předně zvyšují biodiverzitu, tím, že poskytují odlišné typy habitatu pro osidlující organismy, čímž vytvářejí bohatší ekologické nika, které podporují přirozené predátory a opylovače, a tím přispívají ke zdraví ekosystému (Lichtenberg et al., 2017; Pereira et al., 2015). Tato rozmanitost může také zvyšovat odolnost vůči patogenům a škůdcům, z části, protože různé plodiny s různými vlastnostmi brání adaptaci škůdců na homogenní prostředí, což může vést ke snížení potřeby chemických zásahů (Zhu et al., 2000). Na rozdíl od monokulturních polí, u kterých je biodiverzita nízká a může vést k ekologické nerovnováze a degradaci půdy (Foley et al., 2011; Lal, 2001). Uniformita plodin v monokulturách zvyšuje riziko šíření patogenů a škůdců, protože se mohou rychle adaptovat na homogenní prostředí (Altieri a Nicholls, 2004). To často vede k větší závislosti na chemických prostředcích, jako jsou hnojiva a pesticidy (Liebman, 1997).

Efektivnější využívání půdních živin a vody je další výhodou polykultur. Díky různým kořenovým systémům a odlišným nárokům plodin na živiny a vodu dochází k lepšímu využívání půdních zdrojů (Frouz a Frouzová, 2021). Často může docházet i k obohacování půdy důležitými živinami, které mohou později využít jiné plodiny, a vzniku půdní organické hmoty (Kahn et al., 1998). Monokulturní plodiny získávají stejný typ a množství živin ze stejných vrstev půdy, proto je potřeba půdu často hnojit a postupně dochází k její degradaci (Tilman et al., 2002). V neposlední řadě, polykultury mohou být odolnější vůči klimatickým změnám a extrémním povětrnostním podmínkám, protože různé plodiny reagují na tyto změny různými způsoby, což může přispět ke stabilitě výnosů i při proměnlivém klimatu (Altieri a Koohafkan, 2013). Na rozdíl od monokultur, které jsou velmi citlivé na výkyvy počasí (Wright, A. J., Mommer, L., Barry, K., & Van Ruijven, J., 2021).



Obrázek 2.: Porovnání intenzivních zemědělských ploch s rozsáhlými monokulturami a zemědělských ploch s obnovenými polykulturami (Malinga, 2016).

Závěr

V úvodu bakalářské práce jsme si uvedly hlavní otázky této práce, které zahrnovali: 1) Jaké příčiny vedou moderní zemědělství k pěstování monokultur jednoletých plodin. 2) Jaké environmentální dopady pěstování monokultur a jednoletých plodin má. Zároveň jsem tyto dvě otázky porovnávala s udržitelnějším pěstování plodin.

Na základě provedené analýzy jsme zjistili, že hlavními příčinami vedoucími k pěstování monokultur jednoletých plodin jsou ekonomické faktory, efektivita a mechanizace zemědělské výroby, stejně jako požadavky trhu. Moderní zemědělské technologie a metody umožňují vysokou produkci potravin při relativně nízkých nákladech, což činí monokultury atraktivní volbou pro mnoho zemědělců (Gliessman, 2014).

Jednoleté plodiny se vyznačují jejich poměrně krátkým životním cyklem, což hraje pro zemědělství klíčovou roli v poskytování úrody v krátkém časovém období. Svou energii investují zejména do kvetení a tvorbu semen (Frouz a Frouzová, 2021), na stavbu rozsáhlého kořenového systému mají už jen malé množství energie. To je důvodem, proč jednoleté plodiny neefektivně zachytávají živiny a vodu v půdě a málo stabilizují půdu, což vede k větší půdní erozi (Glover, 2003). Jsou méně schopné se bránit patogenním organismům (Frouz a Frouzová, 2021) a způsobují snižování biodiverzity (Michalko et al., 2024). Pro efektivní hospodaření s jednoletými plodinami se na pole musí aplikovat poměrně velké množství chemických látek, které potom kontaminují životní prostředí (Michalko et al., 2024; Kelley a Nater, 2000).

Při pěstování vytrvalých plodin můžeme pozorovat efektivitu zemědělského systému až po delším časovém období a řada z plodin má určité negativní či nedostatečné vlastnosti. Momentálně je snaha o zdokonalování jednotlivých vytrvalých plodin, které by mohly nahradit plodiny jednoleté (Cox et al., 2010). Pěstování vytrvalých plodin má mnoho výhod. Svou energii investují do přežití, proto si budují hluboký kořenový systém, který jim umožňuje lepší využívání vody a živin z půdy (DeHaan et al., 2005). Kořenový systém stabilizuje půdu a zadržuje a využívá více podpovrchové vody, což snižuje vodní ztráty (Glover et al., 2010b) podpovrchovým a povrchovým odtokem. Celoroční pokrytí zemědělské půdy pozitivně ovlivňuje biodiverzitu a snižuje obdělávání půdy, čímž zároveň snižuje i půdní erozi a potřeba využívání chemických látek a pohonných hmot (Jackson, 1980; Scheinost et al., 2001). Pěstování vytrvalých plodin zvyšuje prosperitu půdy (Crews et al., 2017), díky zachytávání a

přísunu živin (Schmidt et al.2011; Galvez et al., 2001), rozvinuté půdní fauně Neher, 1999) a tvorbě půdní organické hmoty (Crews et al., 2017).

Hlavními překážkami pro větší rozšíření vytrvalých rostlin se liší u vytrvalých pícnin a u vytrvalých kulturních jednoletých zrnin. U víceletých pícnin je hlavní překážkou malý odbyt v důsledku poklesu stavů skotu a s tím snižující se poptávky po píci. Zde by mohlo být řešením vyvíjení nových technologií zpracování píce víceletých pícnin na krmivo využitelný i pro nepřežvýkavce jako jsou kuřata či prasata. U víceletých analogů jednoletých zrnin jde pak o výrazně nižší výnos. Řešením by mohlo být šlechtění na větší výnos, ale též sklizeň celé biomasy a její využití pro výrobu krmiva pro nepřežvýkavce, jak bylo zmíněno výše.

Globálně nejrozšířenější monokulturní pěstování plodin je další nejefektivnější cestou zemědělské produkce plodin, která poskytuje maximální výnos plodin a nejefektivnější využití strojů a vyvinutých chemických látek (Power a Follett, 1987). Nicméně pěstování monokultur má i své stinné stránky. Mezi hlavní negativní dopady patří degradace půdy kvůli jednostrannému vyčerpávání živin (Frouz a Frouzová, 2021; Tilman et al., 2002), ztráta biodiverzity (Altieri,1999), zvýšené riziko půdní eroze (Pimentel et al., 1995) spojené s vyšším půdním odtokem (Randall et al., 1997) a větší potřeba chemických hnojiv a pesticidů spojená s znečišťováním povrchových vod (Foley et al., 2011). Se zaváděním monokulturních ploch jednoletých plodin se zvyšuje riziko napadení zemědělské plochy patogenními organismy a chorobami, kvůli snížené biodiverzitě přirozených nepřátel a uniformitě plodin má škůdce neomezené zdroje potravy (Altieri a Nicholls, 2004; Li et al., 2009). Tyto faktory vedou k dlouhodobému poškozování ekosystémů a oslabují schopnost krajiny se obnovovat.

Když srovnáme tento přístup s udržitelnějším způsobem pěstování, jako je polykulturní pěstování plodin, zjistíme, že udržitelné zemědělství má řadu výhod. Polykulturní pěstování často zahrnuje rotaci plodin či pěstování více druhů plodin na jednom poli. Polykultury vytrvalých plodin tvoří integrovanou ochranu proti škůdcům a chorobám (Zhu et al., 2000), zvyšují biodiverzitu ekosystému díky poskytnutí diverzifikovaného porostu (Lichtenberg et al, 2017; Culman et al., 2010), efektivně využívají půdní živiny a vláhu díky odlišnému kořenovému systému (Frouz a Frouzová, 2021) a lépe mezi sebou spolupracují (Kahn et al., 1998; Li et al., 2014). Při momentální klimatické krizi tvoří polykultury významný prvek v ochraně proti extrémnímu vlivu počasí na zemědělskou produkci, například díky jejich odlišnému zacházení s vodou či obraně proti škůdcům, ale i na ekosystém jako takový (Altieri, 2002). V tomto udržitelnějším pěstování plodin je potřeba aplikace jen minimálního množství

chemických látek na pole (Zhu et al., 2000), což vede k méně kontaminovanému životnímu prostředí. Z dlouhodobého hlediska jsou polykultury ekonomicky výhodnější a zejména stabilnější a prosperující vůči životnímu prostředí, i přes různé překážky jako je komplikovanost současné sklizně více druhů najednou či náročnosti plánování (Selecký, 2010). Z tohoto pohledu by tedy cestou k většímu rozšíření polykultur mohl být vývoj mechanizace a souvisejících způsobů pěstování, umožňujících polykulturu mechanizovaně obdělávat a sklízet. Na to navazuje i rozvoj možností zpracování směsi plodin sklizených najednou.

Osevních postupů pěstování polykulturních plodin je značné množství. Mezi hlavní patří vícenásobné pěstování plodin, které zlepšuje využití půdních živin a zvyšuje odolnost proti škůdcům (Waha et al., 2020), pěstování ve fázích, jež umožňuje lepší využití sezónních podmínek (Zhang et al., 2007a; Jabbar et al., 2010), a smíšené pěstování, které podporuje biodiverzitu (Eskandari et al., 2009a; Ghanbari and Lee, 2003). Zelené hnojení a osevní rotace pak přispívají k obnově a udržení kvality půdy (Kaspar a Singer, 2011; (Bullock, 1992). Tyto postupy diverzifikace rostlin v čase jsou dobře teoreticky rozpracovány a řada současných zemědělských politik podporuje jejich větší rozšíření, což je trend, ve kterém je radno pokračovat. Celkově tyto praktiky nabízejí nejen environmentální výhody, ale také dlouhodobou ekonomickou udržitelnost a ekologickou stabilitu, čímž zdůrazňují potřebu rovnováhy mezi produkcí potravin a ochranou životního prostředí.

Závěrem lze říci, že i když pěstování monokultur jednoletých plodin nabízí krátkodobé ekonomické výhody a efektivitu, jejich environmentální dopady jsou značně negativní. Udržitelné metody pěstování představují životaschopnou alternativu, která může přispět k ochraně životního prostředí a k dlouhodobé udržitelnosti zemědělské produkce. Pro budoucí rozvoj zemědělství je tedy klíčové najít rovnováhu mezi ekonomickými potřebami a environmentálními omezeními, a to prostřednictvím inovativních a udržitelných zemědělských praktik.

Použitá literatura

1. **Abbo, S., Van-Oss, R.P., Gopher, A., Saranga, Y., Ofner, I., et al.** (2014) 'Plant domestication versus crop evolution: a conceptual framework for cereals and grain legumes', *CellPress*, pp. 351-360. (Accessed: 10 March 2024).
2. **Al Abboud, M.A.** (2014) 'Bioimpact of application of pesticides with plant growth hormone (gibberellic acid) on target and non-target microorganisms', *Journal of Saudi Chemical Society*, 18, pp. 1005–1010.
3. **Alfred, R., Obit, J.H., Chin, C.P.-Y., Haviluddin, H. and Lim, Y.** (2021) 'Towards paddy rice smart farming: A review on big data, machine learning, and rice production tasks', *IEEE Access*, 9, pp. 50358–50380.
4. **Altieri, M.A.** (1995) *Agroecology: The science of sustainable agriculture*. Florida: CRC Press.
5. **Altieri, M.A.** (1999) 'The ecological role of biodiversity in agroecosystems', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1–3), pp. 19–31.
6. **Altieri, M.A.** (2002) 'Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93, pp. 1–24. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3) [Accessed 24 July 2024].
7. **Altieri, M.A. (2009) 'Green deserts: Monocultures and their impacts on biodiversity', In: Jons, M.S., Monsalve, S. and Emanuelli, M.S. (eds.) Red sugar, green deserts: Latin American perspectives on monocultures**, pp. 10–20.
8. **Altieri, M.A. and Koohafkan, P.** (2013) 'Strengthening resilience of farming systems: a key prerequisite for sustainable agricultural production', In: UNCTAD, *Wake up before it is too late: make agriculture truly sustainable now for food security in a changing climate*. TER13 Report, Geneva.
9. **Altieri, M.A. and Nicholls, C.I.** (2004) *Biodiversity and pest management in agroecosystems*. University of Arizona Press.
10. **Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A.** (2015) 'Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems', *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), pp. 869–890.
11. **Bandyopadhyay P.K., Singh K.C., Mondal K., Nath R., Ghosh P.K., Kumar N., Singh S.S.** (2016) 'Effects of stubble length of rice in mitigating soil moisture stress and on yield of lentil (*Lens culinaris* Medik) in rice-lentil relay crop'. *Agric Water Manag* 173:91–102
12. **Bhat, S.A. and Huang, N.-F.** (2021) 'Big data and AI revolution in precision agriculture: Survey and challenges', *IEEE Access*, 9, pp. 110209–110222.
13. **Boerner, R.E.J.** (1992) 'Plant life span and response to inoculation with vesicular–arbuscular mycorrhizal fungi. I. Annual versus perennial grasses', *Mycorrhiza*, 1, pp. 153–161.
14. **Brady, N.C. and Weil, R.R.** (1999) *The nature and properties of soils*. 12th edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
15. **Bullock, D. G.** (1992). 'Crop rotation. *Critical reviews in plant sciences*', 11(4), 309-326.
16. **Burkhart, M.R. and James, D.E.** (1999) 'Agricultural-nitrogen contributions to hypoxia in the Gulf of Mexico', *Journal of Environmental Quality*, 28, pp. 850-859.
17. **Carlsson, G. and Huss-Danell, K.** (2003) 'Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field', *Plant and Soil*, 253, pp. 353–372. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1024847017371> [Accessed 6 July 2024].
18. **Collins, S.J. and Fahrig, L.** (2017) 'Responses of anurans to composition and configuration of agricultural landscapes', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, pp. 399–409.
19. **Cox, T.S., Van Tassel, D.L., Cox, C.M. and DeHaan, L.R.** (2010) 'Progress in breeding perennial grains', *Crop and Pasture Science*, 61, pp. 513–521.

20. **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. doi:10.1017/sus.2018.11
21. **Crews, T.E.** (2004) 'Perennial crops and endogenous nutrient supplies', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 20, pp. 25–37.
22. **Crews, T.E., Rumsey, B.E.** (2017) 'What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter: a review', *Sustainability (Switzerland)*, 9(4), pp. 1–18.
23. **Culman, S.W., DuPont, S.T., Glover, J.D., Buckley, D.H., Fick, G.W., Ferris, H., Crews, T.E.** (2010) 'Long-term impacts of high-input annual cropping and unfertilized perennial grass production on soil properties and belowground food webs in Kansas, USA', *Agric. Ecosyst. Environ.*, 137, pp. 13–24.
24. **Culman, S.W., Snapp, S.S., Ollenburger, M., Basso, B. and DeHaan, L.R.** (2013) 'Soil and water quality rapidly responds to the perennial grain Kernza wheatgrass', *Agronomy Journal*, 105, pp. 735–744.
25. **Český statistický úřad** (2021) Souhrnné a strukturální údaje. [online] Available at: <https://csu.gov.cz/souhrnne-a-strukturni-udaje?pocet=10&start=0&podskupiny=271&razeni=-datumVydani> [Accessed 24 July 2024].
26. **Český statistický úřad** (2023) Roční (strukturální) statistiky služeb. [online] Available at: <https://csu.gov.cz/rocní-strukturální-statistiky-sluzeb?pocet=10&start=0&podskupiny=182&razeni=-datumVydani> [Accessed 24 July 2024].
27. **Davies, C.L., Waugh, D.L., Lefroy, E.C.** (2005) 'Perennial grain crops for high water use: the case for *Microlaena stipoides*', *A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation*. RIRDC Publication No. 05/024. Available at: <https://rirdc.infoservices.com.au/downloads/05-024> (Accessed: 9 February 2012).
28. **DeHaan, L.R. and Ismail, B.P.** (2017) 'Perennial cereals provide ecosystem benefits', *Cereal Food World*, 62, pp. 278–281.
29. **DeHaan, L.R., Van Tassel, D.L., Cox, T.S.** (2005) 'Perennial grain crops: a synthesis of ecology and plant breeding', *Renew. Agric. Food Syst.*, 20, pp. 5–14.
30. **den Biggelaar, C., Lal, R., Wiebe, K. and Breneman, V.** (2001) 'Impact of soil erosion on crop yields in North America', *Advances in Agronomy*, 72, pp. 1-52.
31. **Dinnes, D.L., Karlen, D.L., Jaynes, D.B., Kaspar, T.C., Hatfield, J.L., Colvin, T.S. and Cambardella, C.A.** (2002) 'Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils', *Agronomy Journal*, 94, pp. 153-171.
32. **European Parliament** (2011) Classification of Tomatoes as Fruit. Official Journal of the European Union. Available from EU Law.
33. **Ewell, J.J.** (1999) 'Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use', *Agroforestry Systems*, 45, pp. 1-21.
34. **Faeth, P.** (2000) 'Fertile ground: Nutrient trading's potential to cost-effectively improve water quality', *World Resources Institute*, Washington DC, pp. 5-6.
35. **Fan, K., Delgado-Baquerizo, M., Guo, X., Wang, D., Wu, Y., Zhu, M. and Chu, H.** (2019) 'Suppressed N fixation and diazotrophs after four decades of fertilization', *Microbiome*, 7, pp. 1–10.
36. **FIAN International** (2020) American Report on Monocultures and Violations of the Human Rights to Adequate Food and Housing, to Water, to Land and to Territory. Sweden, pp. 67–76.
37. **Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Cramer, W., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helmut, S., Holt, A., Howard, E.A., Karthik, D., Mather, A., Mortsch, L.D., Polasky, S., Reidmiller, D.R., Sanderson, S., Schlesinger, W.H., Shvidenko,**

- A., Skole, D., Smith, J., Stern, D.I., Stevenson, S., Tilman, D., Tyler, R., Vörösmarty, C.J. and Woodwell, G.M., (2011). 'Solutions for a cultivated planet'. *Nature*, 478(7369), pp.337-342.
38. **Food and Agriculture Organization** (1993) *FAOSTAT Agricultural Data*. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000680937400001>
 39. **Food and Agriculture Organization** (2003) 'FAOSTAT Agricultural Data'. Available at: <http://apps.fao.org/cgi-bin/nphdb.pl?subset=agriculture> (Accessed: 17 February 2003).
 40. **Frouz, J. and Frouzová, J.** (2021) *Aplikovaná ekologie - Environmentální texty 3*. Praha: Karolinum. ISBN 978-80-246-4577-3.
 41. **Fu, J., Yang, X.-Y., Cheng, M.-J., Lü, G.-H., Wang, P., Wu, Y.-Q., Zheng, M.-M., Zhou, S.-F., Rong, T.-Z. and Tang, Q.-L.** (2015) 'Perennial aneuploidy as a potential material for gene introgression between maize and *Zea perennis*', *ScienceDirect*, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scidata.2015.01.002> [Accessed 6 July 2024].
 42. **Gabriel de Oliveira, N.A., Brunzell, N.A., Crews, T.E., DeHaan, L.R. and Vico, G.** (2020) 'Carbon and water relations in perennial Kernza (*Thinopyrum intermedium*): An overview', *Plant Science*, pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110234> [Accessed 6 July 2024].
 43. **Galvez, L., Douds, D.D., Wagoner, P.** (2001) 'Tillage and farming system affect AM fungus populations, mycorrhizal formation, and nutrient uptake by winter wheat in a high-P soil', *Am. J. Alternative Agric.*, 16, pp. 152–162.
 44. **Gliessman, S.R.** (2014) *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*. CRC Press.
 45. **Glover, J.D., Culman, S.W., DuPont, S.T., Broussard, W., Young, L., Mangan, M.E., Mai, J.G., Crews, T.E., DeHaan, L.R., Buckley, D.H., Ferris, H., Turner, R.E., Reynolds, H.L., Wyse, D.L.** (2010) 'Harvested perennial grasslands provide ecological benchmarks for agricultural sustainability', *Agric. Ecosyst. Environ.*, 137, pp. 3–12.
 46. **Glover, J.D., Reganold, J.P., Bell, L.W., Borevitz, J., Brummer, E.C., Buckler, E.S., Cox, C.M., Cox, T.S., Crews, T.E., Culman, S.W., DeHaan, L.R., Eriksson, D., Gill, B.S., Holland, J., Hu, F., Hulke, B.S., Ibrahim, A.M.H., Jackson, W., Jones, S.S., Murray, S.C., Paterson, A.H., Ploschuk, E., Sacks, E.J., Snapp, S., Tao, D., Van Tassel, D.L., Wade, L.J., Wyse, D.L., Xu, Y.** (2010) 'Increased food and ecosystem security via perennial grains', *Science*, 328, pp. 1638–1639.
 47. **Guzman, A., Montes, M., Hutchins, L., de la Cerda, G., Yang, P., Kakouridis, A., Dahlquist-Willard, R.M., Firestone, M.K., Bowles, T. and Kremen, C.** (2021) 'Crop diversity enriches arbuscular mycorrhizal fungal communities in an intensive agricultural landscape', *New Phytologist*, 231(1), pp. 447–459.
 48. **Harlan, J.R.** (1971) 'Agricultural origins: centers and noncenters', *Science*, 174, pp. 468–474.
 49. **Hasanuzzaman, M., Araújo, S. and Singh Gill, S.** (2020) *The plant family Fabaceae - Biology and physiological responses to environmental stresses*. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-4752-2> [Accessed 11 July 2024].
 50. **Chen Wu, C., Deng, C., Hilario, E., Albert, N.W., Lafferty, D., Grierson, E.R.P., Plunkett, B.J., Elborough, C., Saei, A., Günther, C.S., Ireland, H., Yocca, A., Edger, P.P., Jaakola, L., Karppinen, K., Grande, A., Kylli, R., Lehtola, V-P., Allan, A.C., Espley, R.V., Chagné, D.** (2021) 'A chromosome-scale assembly of the bilberry genome identifies a complex locus controlling berry anthocyanin composition', *Molecular Ecology Resources*, pp. 1-16. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1755-0998.13467> (Accessed: 6 July 2024).
 51. **Jabbar A, Ahmad R, Bhatti IH, Rehman A, Virk ZA, Vains SN** (2010) 'Effect of different rice-based intercropping systems on rice grain yield and residual soil fertility'. *Pak J Bot* 42:2339–2348

52. **Jabbar A., Ahmad R., Bhatti I.H., Aziz T., Nadeem M., Wasi-u-Din R.A.** (2011) 'Residual soil fertility as influenced by diverse rice-based inter/relay cropping systems'. *Int J Agric Biol* 13:477–483
53. **Jackson, W.** (1980) *New Roots for Agriculture*. Lincoln, NE: University of Nebraska Press.
54. **Jerry Glover** (2003) 'Characteristics of Annual vs Perennial Systems', University of Florida's Institute of Food and Agricultural Sciences.
55. **Kahn, Z.R., Ampong-Nyarko, K., Hassanali, A. and Kimani, S.** (1998) 'Intercropping increases parasitism of pests', *Nature*, 388, pp. 631–632. Available at: <https://doi.org/10.1038/41681> [Accessed 24 July 2024].
56. **Kantar, M.B., Betts, K., Michno, J.-M., Luby, J.J., Morrell, P.L., Hulke, B.S., Stupar, R.M. and Wyse, D.L.** (2014) 'Evaluating an interspecific *Helianthus annuus* × *Helianthus tuberosus* population for use in a perennial sunflower breeding program', *Field Crops Research*, 155, pp. 254–264.
57. **Kantor, M.** (1999) 'Land Equivalent Ratio and intercropping benefits', *Journal of Agricultural Science*, 130(1), pp. 75–83.
58. **Karunathilake, E.M.B.M., Le, A.T., Heo, S., Chung, Y.S. and Mansoor, S.** (2023) 'The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture', *Agriculture*, 13(8), pp. 1593.
59. **Kaspar, T. C., & Singer, J. W.** (2011). 'The use of cover crops to manage soil. *Soil management: Building a stable base for agriculture*', 321-337.
60. **Kelley, D.W. and Nater, E.A.** (2000) 'Historical sediment flux from three watersheds into Lake Pepin, Minnesota, USA', *Journal of Environmental Quality*, 29, pp. 561-568.
61. **Kiers, E.T., Hutton, M.G. and Denison, R.F.** (2007) 'Human selection and the relaxation of legume defences against ineffective rhizobia', *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, pp. 3119–3126.
62. **Knapp, J.L., Nicholson, C.C., Jonsson, O., de Miranda, J.R. and Rundlöf, M.** (2023) 'Ecological traits interact with landscape context to determine bees' pesticide risk', *Nature Ecology & Evolution*, 7, pp. 547–556. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41559-023-01990-5> [Accessed 6 July 2024].
63. **Kobae, Y.** (2019) 'Dynamic phosphate uptake in arbuscular mycorrhizal roots under field conditions', *Frontiers in Environmental Science*, 6, p. 159.
64. **Lal, R.** (1998) 'Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality', *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17, pp. 319-464.
65. **Lal, R.** (2003) 'Soil erosion and the global carbon budget', *Environment International*, 29, pp. 437-450.
66. **Lal, R.,** (2001). 'The role of soil organic matter in maintaining soil quality in crop production'. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 16(1), pp.35-40.
67. **Larkin, R.P. and Honeycutt, C.W.** (2005) 'Effects of different 3-year cropping systems on soil microbial communities and rhizoctonia diseases of potato', *Phytopathology*, 96, pp. 68–79.
68. **Li, C., He, X., Zhu, S., Zhou, H., Wang, Y., Li, Y., Yang, J., Fan, J., Wang, G., Long, Y., Xu, J., Tang, Y., Zhao, G., Yang, J., Liu, L., Sun, Y., Xie, Y. and Wang, H.** (2009) 'Crop diversity for yield increase', *PLoS One*, 4, e8049.
69. **Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T.W., Yu, Y., Zhang, C., Li, H., Zhang, F. and van der Werf, W.** (2020) 'Syndromes of production in intercropping impact yield gains', *Nature Plants*, 6(6), pp. 653–660.
70. **Li, L., Tilman, D., Lambers, H. and Zhang, F.** (2014) 'Plant diversity andoveryielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture', *New Phytologist*, 203(1), pp. 63–69.

71. **Liebman, J.** (1997) *Rising toxic tide: pesticide use in California, 1991-1995*. Report of Californians for Pesticide Reform and Pesticide Action Network, San Francisco.
72. **Lichtenberg, E.M., Kennedy, C.M., Kremen, C., Batáry, P., Berendse, F., Bommarco, R., Bosque-Pérez, N.A., Carvalheiro, L.G., Snyder, W.E., Williams, N.M., Winfree, R., Klatt, B.K., Åström, S., Benjamin, F., Brittain, C., Chaplin-Kramer, R., Clough, Y., Danforth, B., Diekötter, T. and Crowder, D.W.** (2017) 'A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes', *Global Change Biology*, 23, pp. 4946–4957.
73. **Lobell, D.B., Schlenker, W. and Costa-Roberts, J.** (2011) 'Climate trends and global crop production since 1980', *Science*, 333, pp. 616–620. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1204531> [Accessed 24 July 2024].
74. **Malinga Rebecka** (2016), 'Ecosystem services in agricultural landscapes'. Stockholm University. ISBN 978-91-7649-507-0 (pdf)
75. **Martínez-Romero, E., Aguirre-Noyola, J.L., Taco-Taype, N., Martínez-Romero, J. and Zuniga-Dávila, D.** (2020) 'Plant microbiota modified by plant domestication', *Systematic and Applied Microbiology*, 43.
76. **Mazur, B.J. and Tingey, S.V.** (1995) 'Genetic mapping and introgression of genes of agronomic importance', *Current Opinion in Biotechnology*, 6, pp. 175–182.
77. **McGuinness, H.** (1993) *Living soils: sustainable alternatives to chemical fertilizers for developing countries*. Unpublished manuscript, Consumers Policy Institute, New York.
78. **Mestre, L., Schirmel, J., Hetz, J., Kolb, S., Pfster, S.C., Amato, M. et al.** (2018) 'Both woody and herbaceous semi-natural habitats are essential for spider overwintering in European agricultural landscapes', *Agricultural Ecosystems & Environment*, 263, pp. 70–80.
79. **Mestre, L., Schirmel, J., Hetz, J., Kolb, S., Pfster, S.C., Amato, M. et al.** (2018) 'Both woody and herbaceous semi-natural habitats are essential for spider overwintering in European farmland', *Agricultural Ecosystems & Environment*, 267, pp. 141–146. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.018> [Accessed 6 July 2024].
80. **Meyer, R.S. and Purugganan, M.D.** (2013) 'Evolution of crop species: genetics of domestication and diversification', *Nature Reviews Genetics*, 14, pp. 840–852.
81. **Meyer, R.S., DuVal, A.E. and Jensen, H.R.** (2012) 'Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops', *New Phytologist*, 196, pp. 29–48. Available at: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04253.x>
82. **Michalko, R., Gajski, D., Košulič, O., Khum, W., Michálek, O. and Pekár, S.** (2022) 'Association between arthropod densities suggests dominance of top-down control of predator-prey food-webs on pear trees during winter', *Food Webs*, 33, e00261. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2022.e00261> [Accessed 6 July 2024].
83. **Ministerstvo zemědělství** (2021) 'Podmáčení půdy', *Ministerstvo zemědělství*. Available at: <https://eagri.cz/public/portal/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/podmaceni-pudy> (Accessed: 24 July 2024).
84. **Ministerstvo zemědělství** (2021). 'Léčivé, aromatické a kořeninové rostliny', *Ministerstvo zemědělství*. Available at: <https://mze.gov.cz/public/portal/mze/zemedelstvi/roslinna-vyroba/roslinne-komodity/lecive-aromaticke-a-koreninove-rostliny>
85. **Monck-Whipp, L., Martin, A.E., Francis, C.M. and Fahrig, L.** (2018) 'Farmland heterogeneity benefits bats in agricultural landscapes', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253, pp. 131–139.
86. **Monteiro, A., Santos, S. and Gonçalves, P.** (2021) 'Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review', *Animals*, 11, 2345. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/8/2345> [Accessed 6 July 2024].

87. **Munné-Bosch, S.** (2014) 'Perennial roots to immortality', *Update on Perennial Roots and Lifespan*, pp. 1-6. Available at: <https://examplelink.com> (Accessed: 4 July 2024).
88. **Murphy, K.M., Hoagland, L.A., Reeves, P.G., Baik, B. and Jones, S.S.** (2009) 'Nutritional and quality characteristics expressed in 31 perennial wheat breeding lines', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24, pp. 285–292.
89. **Neher, D.A.** (1999) 'Soil community composition and ecosystem processes—comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems', *Agroforest. Syst.*, 45, pp. 159–185.
90. **Ofori, F. and W.R. Stern,** (1987). Cereal-legume intercropping system. *Advance in Agronomy*, 41: 41-90.
91. **Pereira, A.L.C., Taques, T.C., Valim, J.O.S., Madureira, A.P. and Campos, W.G.** (2015) 'The management of bee communities by intercropping with flowering basil (*Ocimum basilicum*) enhances pollination and yield of bell pepper (*Capsicum annuum*)', *Journal of Insect Conservation*, 19(3), pp. 479–486.
92. **Pérez-Jaramillo, J.E., Mendes, R. and Raaijmakers, J.M.** (2016) 'Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions', *Plant Molecular Biology*, 90, pp. 635–644. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s11103-015-0337-7>.
93. **Pimentel, D., Cerasale, D., Stanley, R.C., Perlman, R., Newman, E.M., Brent, L.C., Mulligan, A. and Tai-I Chang, D.** (2012) 'Annual vs. perennial grain production', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.009> [Accessed 6 July 2024].
94. **Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Spritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R.** (1995) 'Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits', *Science*, 267, pp. 1117-1122.
95. **Pimm, S.** (2001) *The world according to Pimm*. McGraw-Hill, New York, NY, p. 84.
96. **Power, J.F. and Follett, R.F.** (1987) 'Monoculture', *Scientific American*, 256(3), pp. 146–153. Available at: <https://www.jstor.org/stable/24979342?seq=1> [Accessed 20 July 2024].
97. **Queen A, Earl H, Deen W** (2009) 'Light and moisture competition effects on biomass of red clover under seeded to winter wheat'. *Agron J* 101: 1511–1521
98. **Rabalais, N.N., Turner, R.E. and Scavia, D.** (2002) 'Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River', *BioScience*, 52, pp. 129-142.
99. **Rahman, A.M. and Parvin, M.I.A.** (2014) 'Study of medicinal uses on Fabaceae family at Rajshahi, Bangladesh', *Research in Plant Sciences*, 2(1), pp. 6–8.
100. **Ren, W., Hu, L., Zhang, J., Sun, C., Tang, J., Yuan, Y. and Chen, X.** (2014) 'Can positive interactions between cultivated species help to sustain farming on biodiversity: A hierarchical meta-analysis', *Journal of Applied Ecology*, 51(3), pp. 746–755.
101. **Riffell, S., Scognamillo, D. and Burger, L.W.** (2008) 'Effects of the Conservation Reserve Program on northern bobwhite and grassland birds', *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, pp. 309–323.
102. **Sacks, E.J., Roxas, J.P. and Cruz, M.T.S.** (2003) 'Developing perennial upland rice I: field performance of *Oryza sativa/O. rufipogon* F1, F4 and BC1F4 progeny', *Crop Science*, 43, pp. 120–128.
103. **Santamaria-Fernandez, M., Molinuevo-Salces, B., Kiel, P., Steinfeldt, S., Uellendahl, H. and Lübeck, M.**, (2017). 'Lactic acid fermentation for refining proteins from green crops and obtaining a high quality feed product for monogastric animals'. *Journal of Cleaner Production*, 162, pp.875-881.
104. **Santos, A.B., Fageria, N.K. and Prabhu, A.S.** (2003) 'Rice ratooning management practices for higher yields', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34, pp. 881–918.

105. **Selecký, T.** (2010) Základní metody trvale udržitelného zemědělství. [online] Bachelor thesis, supervised by Prof. RNDr. Vojtěch Jarošík, CSc. Prague: Faculty of Science, Charles University. Available at: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/30857/BPTX_2009_1_11310_0_174555_0_76710.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 11 July 2024].
106. **Scheinost, P.L., Lammer, D.L., Cai, X., Murray, T.D., Jones, S.S.** (2001) 'Perennial wheat: the development of a sustainable cropping system for the U.S. Pacific Northwest', *Am. J. Alternative Agric.*, 16, pp. 147–151.
107. **Schepers J.S, Francis D.D., Shanahan J.F.** (2005) 'Relay cropping for improved air and water quality'. *J Biosci* 60:186–189
108. **Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E.** (2011) 'Persistence of soil organic matter as an ecosystem property', *Nature*, 478(7367), pp. 49–56.
109. **Skinner, R.H. and Moore, K.J.** (2007) 'Growth and development of forage plants', In: *Forages: The science of grassland agriculture*, 2nd ed., pp. 53–66.
110. **Smýkal, P.** (2009) 'Domestikace rostlin z pohledu současné genetiky', *Živa*. Available at: <https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pdf/domestikace-rostlin-z-pohledu-soucasne-genetiky.pdf> (Accessed: 7 July 2024).
111. **Tang, Q., Rong, T., Song, Y., Yang, J., Pan, G., Li, W., Huang, Y. and Cao, M.** (2005) 'Introgression of perennial teosinte genome into maize and identification of genomic in situ hybridization and microsatellite markers', *Crop Science*, 45, pp. 717–721.
112. **The Land Institute** (2024) 'Perennial Grain Crops: New Hardware for Agriculture', The Land Institute. Available at:
113. **The Land Institute** (2024) 'Transforming Agriculture, Perennially', The Land Institute. Available at: <https://landinstitute.org/our-work/perennial-crops/> [Accessed 6 July 2024].
114. **Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W.H., Simberloff, D. and Swackhamer, D.** (2001) 'Forecasting agriculturally driven global environmental change', *Science*, 292, pp. 281-284.
115. **USGS** (2002) *The quality of our nation's waters: nutrients and pesticides*. USGS Circular 1225.
116. **Vandermeer, J.H.** (2011) *The ecology of agroecosystems*. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning.
117. **Vandermeer, J.H.**, (1992). 'The Ecology of Intercropping'. Publisher: Cambridge University Press.
118. **Vilela, A., González-Paleo, L., Turner, K., Peterson, K., Ravetta, D., Crews, T.E. and Van Tassel, D.** (2018) 'Progress and bottlenecks in the early domestication of the perennial oilseed *Silphium integrifolium*, a sunflower substitute', *Sustainability*, 10(3), pp. 1–23. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/638> [Accessed 6 July 2024].
119. **Vlašný, M.** (2008) 'GIS modelování erozního účinku přívalových dešťů', *bakalářská práce*, vedoucí RNDr. Michal Bíl, PhD. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta katedra geoinformatiky. Available at: <https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/vlasany08/data/vlasany.pdf> (Accessed: 1 July 2024).
120. **W.K. Kellogg Biological Station (KBS)** (2010) 'Perennial wheat research at KBS', W.K. Kellogg Biological Station, Michigan State University. Available at: <http://www.kbs.msu.edu/component/content/article/41-faculty/467-perennial-wheat-research-at-kbs> [Accessed 3 August 2011].

121. **WAHA, K. et al.** (2020) 'Multiple cropping systems of the world and the potential for increasing cropping intensity', *Global Environmental Change*, 64, 102131.
122. **Ward, P.R., Micin, S.F., Dunin, F.X.** (2006) 'Using soil, climate, and agronomy to predict soil–water use by Lucerne compared with soil–water use by annual crops or pastures', *Aust. J. Agric. Res.*, 57, pp. 347–354.
123. **Weaver, J.E., Stoddart, L.A. and Noll, W.** (1935) 'Response of the Prairie to the Great Drought of 1934', *Ecology*, 16, pp. 612–629.
124. **Weiss, E.A.** (1983) Oilseed crops.
125. **White, R.E., Helyar, K.R., Ridley, A.M., Chen, D., Heng, L.K., Evans, J., Fisher, R., Hirth, J.R., Mele, P.M., Morrison, G.R., Cresswell, H.P., Paydar, Z., Dunin, F.X., Dove, H., Simpson, R.J.** (2000) 'Soil factors affecting the sustainability and productivity of perennial and annual pastures in the high rainfall zone of south-eastern Australia', *Aust. J. Exp. Agric.*, 40, pp. 267–283.
126. **Willey, R.W.** (1979) 'Intercropping - Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages', *Field Crop Abstracts*, 32(1), pp. 1–10.
127. **Wright, A. J., Mommer, L., Barry, K., & Van Ruijven, J.** (2021). Stress gradients and biodiversity: monoculture vulnerability drives stronger biodiversity effects during drought years. *Ecology*, 102(1), e03193.
128. **Yahya, M.S., Atikah, S.N., Mukri, I., Sanusi, R., Norhisham, A.R. and Azhar, B.** (2022) 'Agroforestry orchards support greater avian biodiversity than monoculture oil palm and rubber tree plantations', *Forest Ecology and Management*, 513, 120177.
129. **Zhang B.C., Haung G.B., Li F.M.** (2007a) 'Effect of limited single irrigation on yield of winter wheat and spring maize relay intercropping'. *Pedosphere* 17:529–537
130. **Zhang, F. and Li, L.** (2003) 'Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency', *Plant and Soil*, 248, pp. 305–312.
131. **Zhu, Y., Chen, H., Fan, J., Wang, Y., Li, Y., Chen, J., Yang, S., Hu, L., Leung, H., Mew, T.W., Teng, P.S., Wang, Z. and Mundt, C.C.** (2000) 'Genetic diversity and disease control in rice', *Nature*, 406, pp. 718–722. Available at: <https://doi.org/10.1038/35021046>.
132. **Zsögön, A., Cermák, T., Naves, E.R., Notini, M.M., Edel, K.H., Weinl, S., Freschi, L., Voytas, D.F., Kudla, J. and Peres, L.E.P.** (2018) 'De novo domestication of wild tomato using genome editing', *Nature Biotechnology*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.4272>.