Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Katedra Ekologie

Studijní program: Ekologická a evoluční biologie

Studijní obor: B-EKOEVO

František Mestek

Hledání udržitelných přístupů: Biodiverzitní indikátory v hodnocení ekologického zemědělství

Sustainability in Focus: Biodiversity Indicators in Organic Farming Assessment

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Zdenka Křenová, Ph.D.

Praha, 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny informační zdroje a literaturu. Bakalářská práce je totožná s prací vloženou do SIS. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného akademického titulu.

V Praze dne 3. 8. 2025

František Mestek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především svojí přítelkyni Anežce za její psychickou podporu, svým rodičům za trpělivost a své školitelce, paní RNDr. Zdence Křenové, Ph.D. a internímu konzultantovi RNDr. Ondřeji Sedláčkovi, Ph.D. za odborné vedení při psaní této práce.

Abstrakt

Biodiverzita zemědělské krajiny čelí významným tlakům intenzivního hospodaření. Tato bakalářská práce se zaměřuje na hodnocení ekologického zemědělství z hlediska jeho dopadů na biologickou rozmanitost pomocí biodiverzitních indikátorů. Na základě rešerše odborné literatury jsou analyzovány různé skupiny indikátorových organismů – ptáci, opylovači, predátoři škůdců, půdní fauna a cévnaté i bezcévné rostliny – a jejich reakce na rozdílné způsoby hospodaření. Práce porovnává ekologické a konvenční zemědělské systémy a hodnotí jejich vliv na druhovou bohatost, abundanci a funkční diverzitu jednotlivých taxonomických skupin. Ekologické zemědělství vykazuje pozitivní vliv na biodiverzitu napříč taxonomickými skupinami, přičemž největší přínos je v intenzivně obhospodařovaných krajinách. Jednotlivé skupiny bioindikátorů se ukázaly jako účinný nástroj pro monitoring různých aspektů zemědělských systémů. Nejvyšších hodnot biodiverzity je dosahováno kombinací ekologického hospodaření s opatřeními ekologické správy krajiny jako celku. Bioindikátory se v tomto kontextu ukazují jako účinný nástroj pro ekologické hodnocení a plánování udržitelného zemědělství. Jejich využití umožňuje kvantifikovat dopady různých forem hospodaření, identifikovat priority ochrany a přispět k informovanému rozhodování v oblasti zemědělské a environmentální politiky.

Klíčová slova:

bioindikátory, ekologické zemědělství, biodiverzita, zemědělská krajina, monitoring, ekosystémové služby, krajinné plánování

Abstract

Biodiversity in agricultural landscapes faces significant pressures from intensive farming practices. This bachelor's thesis focuses on evaluating organic farming in terms of its impacts on biological diversity using biodiversity indicators. Based on a review of scientific literature, various groups of indicator organisms are analyzed – birds, pollinators, pest predators, soil fauna, and vascular and non-vascular plants – and their responses to different farming methods. The work compares organic and conventional agricultural systems and evaluates their influence on species richness, abundance, and functional diversity of individual taxonomic groups. Organic farming shows a positive impact on biodiversity across taxonomic groups, with the greatest benefit occurring in intensively managed landscapes. Individual groups of bioindicators proved to be an effective tool for monitoring various aspects of agricultural systems. The highest biodiversity values are achieved through a combination of organic farming with ecological landscape management measures as a whole. Bioindicators in this context prove to be an effective tool for ecological assessment and planning of sustainable agriculture. Their use enables quantification of impacts from different forms of farming, identification of conservation priorities, and contribution to informed decision-making in agricultural and environmental policy.

Key words:

bioindicators, organic farming, biodiversity, agricultural landscape, monitoring, ecosystem services, landscape planning

Obsah

1. Úvod....8
1.1. Zemědělství a biodiverzita....8
1.2. Land sharing vs Land sparing....10
1.3. Úbytek biodiverzity....12
1.4. Alternativní formy zemědělství....12
2. Biodiverzitní indikátory....13
2.1. Ptáci....14
2.2. Hmyz....15
2.3. Půdní bezobratlí....17
2.4. Cévnaté rostliny....19
2.5. Mechorosty a lišejníky....20
2.6. Mikrobiální indikátory....22
3. Symptomy degradace....22
3.1. Ztráta strukturální diverzity krajiny....22
3.2. Degradace půdního prostředí....25
3.3. Hydrologické zásahy a meliorace....26
3.4. Eutrofizace a trofické rozvrácení....28
4. Shrnutí a Porovnání....31
5. Závěr....34
5.1. Shrnutí hlavních zjištění....34
5.2. Srovnání indikátorových skupin....34
5.3. Doporučení a výhled....35
6. Reference....36

1. Úvod

Současné zemědělství stojí před zásadní výzvou: jak zajistit produkci potravin, aniž by docházelo k dalšímu poškozování životního prostředí. Konvenční zemědělské praktiky, zejména ty spojené s intenzivním využíváním půdy, použitím monokultur, syntetických hnojiv a agrochemikálií mají kromě dalších dopadů prokazatelně negativní vliv na biologickou rozmanitost krajiny. Biodiverzita přitom není jen estetickou nebo etickou hodnotou, ale klíčovým prvkem fungujících ekosystémů, které poskytují zemědělství nezbytné služby, jako je opylování, regulace škůdců či obnova půdy.

V reakci na tyto dopady se v posledních desetiletích rozvíjejí alternativní formy hospodaření, spadající do široké kategorie ekologického či organického zemědělství a agrolesnictví. Tyto přístupy se snaží omezit chemické vstupy, posílit přirozené procesy a podporovat krajinnou heterogenitu. Abychom však mohli objektivně hodnotit, do jaké míry jsou tyto metody skutečně přínosné pro biodiverzitu, potřebujeme nástroje, které umožňují srovnání různých systémů hospodaření na základě ekologických kritérií.

Jedním z takových nástrojů jsou biodiverzitní indikátory – specifické skupiny organismů, jejichž přítomnost, druhové bohatství nebo populační trendy odrážejí ekologický stav prostředí. Správná volba indikátorových skupin je však zásadní: různé taxony reagují odlišně na změny v hospodaření a krajinné struktuře, a proto je důležité znát jejich ekologické nároky a citlivost.

Tato bakalářská práce si klade za cíl zmapovat současné poznatky o využití biodiverzitních indikátorů při hodnocení alternativních zemědělských systémů. Pomocí rešerše odborné literatury se pokusí identifikovat nejčastěji používané indikátorové skupiny, analyzovat jejich vhodnost pro ekologické hodnocení a syntetizovat závěry o vlivu zemědělského hospodaření na biodiverzitu a s ní asociované ekosystémové funkce. Cílem práce je syntetizovat dostupné poznatky tak, aby poskytly přehled o možnostech a limitech využití biodiverzitních indikátorů jako nástrojů pro udržitelné zemědělství.

1.1. Zemědělství a biodiverzita

Zemědělství představuje jeden z hlavních způsobů využití krajiny v Evropě i celosvětově. Podílí se na zabezpečení potravinové bezpečnosti, ale zároveň výrazně formuje strukturu a funkce ekosystémů. Intenzifikace zemědělské výroby, k níž došlo především v druhé polovině 20. století, vedla ke značnému nárůstu výnosů, avšak za cenu zjednodušení krajiny, redukce biotopové rozmanitosti a narušení potravních sítí (Benton et al., 2003). Mezi hlavní dopady intenzivního zemědělství na biodiverzitu patří:

- Ztráta a fragmentace stanovišť, např. likvidace mezí, remízků a trvalých travních porostů (Krauss et al., 2010). Tím dochází také k homogenizaci krajiny, která snižuje ekologickou heterogenitu a tím i počet ekologických nik;
- Chemizace prostředí – používání herbicidů, insekticidů a umělých hnojiv ovlivňuje přímou i nepřímou mortalitu necílových organismů (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019);

- Mechanizace a časová synchronizace zemědělských zásahů, které mohou negativně ovlivnit hnízdící ptáky, opylovače nebo jiné bezobratlé (Charalambous et al., 2024);
- Vysoušení a meliorace, aridizace, eroze, půdní degradace (Szabó et al., 2017, Postma-Blaauw et al., 2012, Schreefel et al., 2020).

Ekologické a další alternativní formy hospodaření se snaží tyto dopady zmírnit. Podporují nižší intenzitu vstupů, vyšší míru diverzifikace produkce a zachování přírodě blízkých prvků v krajině. Významným poznatkem současné ekologie je skutečnost, že nejvyšší biodiverzita se často vyskytuje v biotopech obhospodařovaných člověkem při nízké až střední intenzitě zásahů. Takzvané semi-přírodní ekosystémy, jako jsou mozaikovitě kosené louky, proředěné lesy s vysokou druhovou pestrostí dřevin, osekávané stromy vytvářející různorodé světelné podmínky nebo extenzivně obhospodařované rybníky s nízkou rybí obsádkou, často vykazují vyšší druhové bohatství než oblasti ponechané přirozeným sukcesním procesům (Bignal & McCracken, 1996, Prach et al., 2014). Tento fenomén je způsoben tím, že mírné antropogenní disturbance vytvářejí heterogenní prostředí s pestrou nabídkou ekologických nik, zatímco nerušená příroda směřuje k dominanci konkurenčně silnějších druhů a postupné homogenizaci stanovišť. Tradiční extenzivní zemědělské a lesnické praktiky tak paradoxně mohou být účinnějším nástrojem ochrany biodiverzity než úplné vyloučení lidského zásahu, což má zásadní význam pro současné strategie krajinného plánování a ochrany přírody. Výsledky však nejsou vždy úplně jednoznačné – vliv alternativních metod na biodiverzitu se může lišit v závislosti na konkrétních podmínkách (např. geografické oblasti, typu plodin, velikosti farem), ale také v závislosti na použitém metodologickém rámci hodnocení (Bengtsson et al., 2005; Tuck et al., 2014). Vyhodnocujícím rámcem těchto metod a výzkumem jejich praktické implementace se zabývá vědecká disciplína agroekologie.

Zemědělství a biodiverzita v České republice

Česká republika patří mezi země s relativně vysokým podílem zemědělské půdy – více než 50 % území je využíváno k zemědělské činnosti. Charakteristickým rysem české krajiny je vysoká míra konsolidace pozemků a existence rozsáhlých monokulturních bloků, které vznikly v důsledku kolektivizace v období socialistického hospodaření. Tento strukturální rys je jedním z klíčových faktorů přispívajících k úbytku biodiverzity v české zemědělské krajině (Fanta et al., 2022).

Souvisejícím problémem je nízká míra krajinné heterogenity a nedostatek krajinotvorných prvků, jako jsou remízky, meze, mokřady či stromořadí, které slouží jako útočiště pro mnoho druhů organismů (Fanta et al., 2022). V rámci programů agroenvironmentálně-klimatických opatření (AEKO) se sice české zemědělství snaží tyto prvky opětovně začleňovat, ale výsledky jsou zatím nerovnoměrné a často závislé na ochotě jednotlivých zemědělců. Ekologické zemědělství v ČR sice zaznamenalo v posledních letech nárůst výměry (v roce 2023 tvořilo přibližně 15 % zemědělské půdy), ale jeho rozložení není rovnoměrné (MZČR, 2023). Největší podíl ekologického hospodaření připadá na extenzivní trvalé travní porosty, zatímco orná půda zůstává z velké části pod konvenčním režimem. Tím je omezen potenciální dopad ekologického zemědělství na diverzitu typických polních druhů, které jsou však z hlediska ochrany biodiverzity

často nejohroženější. V českém kontextu je tedy zvláště důležité soustředit pozornost na zvýšení diverzity na intenzivně obhospodařovaných orných půdách, a to nejen prostřednictvím přechodu na ekologické hospodaření, ale také skrze integrované systémy, zlepšení prostorového uspořádání krajiny a podporu cílených ochranářských opatření.

1.2. Land sharing vs Land sparing

Debata (a též legislativa) charakterizující vztah mezi zemědělstvím a ochranou biodiverzity bývá často rámována jako dilematická volba mezi dvěma strategiemi (Balmford et al., 2005):

Land sharing (sdílení krajiny): forma zemědělství, která integruje produkci potravin s ochranou přírody přímo v zemědělské krajině. V praxi to znamená nižší intenzitu vstupů, zachování přírodních prvků a podporu diverzity přímo na produkční ploše.

Land sparing (oddělení krajiny): strategie, která usiluje o maximalizaci výnosů na omezené ploše zemědělské půdy, aby bylo možné ponechat jiné části krajiny extenzivněji obhospodařované, či v některých případech ponechané přirozenému vývoji, a tudíž podle teorie land sparingu chráněné pro přírodu.

Tato dichotomie se však ukazuje jako zjednodušená a v praxi často neudržitelná (Kremen, 2015). Předpoklad, že lze zcela oddělit produkční a přírodní funkce krajiny, ignoruje komplexní propojenost ekologických procesů. Například působnost opylovačů, predátorů škůdců nebo koloběhů živin není omezena jen na chráněné území, ale působí napříč celou krajinou.

„Land sparing“ strategie často nebere v úvahu socioekonomické aspekty – například skutečnost, že vysoce intenzivní zemědělství může vést k degradaci půdy, ztrátě živin a dlouhodobému snížení výnosů, což ohrožuje i samotnou produkční funkci. Kromě toho chráněná území vytvořená tímto způsobem mohou být izolovaná a málo funkční z hlediska dlouhodobého zachování biodiverzity.

Naopak přístup „land sharing“ je často kritizován pro nižší výnosy a vyšší požadavky na rozlohu půdy. Nicméně, pokud je doplněn krajinným plánováním, podporou ekosystémových služeb a cílenými opatřeními pro klíčové druhy, může představovat vyváženou strategii. Roste tedy počet odborníků (Sidemo-Holm et al., 2021), kteří upozorňují na to, že debata „buď, anebo“ je neproduktivní, a že udržitelný model zemědělství musí kombinovat prvky obou strategií – tzv. „hybridní přístup“, který reflektuje potřeby produkce i ochrany přírody v konkrétním prostorovém a ekologickém kontextu. Sidemo-Holm a kol. (2021) navrhují kontinuum, gradient land-use od extrémů obou strategií, který by vytvořil velice mozaikovitou krajinu.

Jedním z hlavních argumentů zastánců intenzivního (tj. high-yield) zemědělství je tvrzení, že vyšší produkce na hektar umožňuje „ušetřit půdu“ pro přírodu – klasický princip land sparing. Studie Phalan a kol. (2011) za předpokladů této dichotomie ukazuje, že pro ochranu samotných ohrožených druhů je land sparing výhodnou strategií (Phalan et al., 2011). Jejich výsledky stojí na faktu, že land sparing skutečně zachovává určitou rozlohu přírodních habitatů nedotčených, a tedy ekologicky funkčních oproti intenzivně využívané kulturní krajině. Není však zohledněno jakým způsobem jsou výnosy intenzivního zemědělství trhem ve skutečnosti využívány. Land sparing v principu benefity pro druhy přináší, ale celková ekologická funkčnost zemědělské

krajiny je zanedbána a rozloha intenzivního zemědělství je stále značná. Důležitým a často přehlíženým faktem je, že nadpoloviční část výnosu plodin pěstovaných v rámci intenzivního zemědělství neslouží k přímé lidské spotřebě, ale ke krmení hospodářských zvířat, která tvoří přes 60% biomasy všech suchozemských obratlovců (Bar-on et al., 2016). Podle údajů FAO se jedná přibližně o 60–70% globálně vyprodukovaných obilovin, a v některých regionech dokonce více než 80 %, právě na krmivo pro živočišnou produkci (FAO, 2019). To znamená, že i když je dosaženo vysokých hektarových výnosů, přenos energie a živin přes živočišnou výrobu je mimořádně neefektivní. Konverzní poměry jsou nízké zejména u hovězího masa: 10–12 kg obilí na 1 kg.

Většina rostlinných kalorií se tedy ztratí v metabolických procesech endotermních zvířat a jen malá část se dostane k finálnímu spotřebiteli ve formě živočišného produktu. Výsledkem je velká plošná náročnost živočišné výroby, i když je provozována v intenzivním režimu. Ekologickými důsledky této skutečnosti jsou:

- Zbytečně vysoký tlak na půdu – i při intenzivní produkci není „ušetřeno“ místo pro přírodu, protože je zapotřebí více plochy k zajištění krmiva;
- Vysoké emise skleníkových plynů, především metanu a oxidu dusného;
- Degradace půdy a vodních zdrojů vlivem aplikace živočišných hnojiv, amoniaku, přebytku dusíku a fosforu, umocněné erozí z polí a nedostatkem krajinných prvků schopných tuto eutrofizaci pufrovat či filtrovat;
- Nepřímý tlak na biodiverzitu ve formě záboru půdy pro pěstování krmných plodin a destrukce habitatů.

Z hlediska udržitelnosti se tedy ukazuje, že vyšší výnosy samy o sobě nevedou automaticky k vyšší efektivitě nebo šetrnosti vůči přírodě, pokud nejsou spojeny s promyšleným využitím produkce. Zvláště masivní živočišná produkce, podporovaná levným obilím z intenzivního zemědělství, může být považována za ekologicky neudržitelný článek globálního potravinového systému (Eisen & Brown, 2022). Redukce průměrné spotřeby masa na osobu na polovinu by sama o sobě mohla snížit využití půdy potenciálně o třetinu i více, a tedy umožnit „větší land sparing“. Kompletní upuštění od živočišné výroby nemusí být pro biodiverzitu nutné ani žádoucí, avšak užitečné je omezení rozsahu industriálního chovu a rozvoj ekosystémově integrovaných chovů (například regenerační či ochranářské pastvy), které jsou méně náročné na vstupy a lépe zapojené do místních koloběhů (Radkowska & Radkowski, 2023). Méně intenzivní pastviny jsou samy o sobě druhově cenným habitatem.

Některé výzkumy proto navrhují přehodnotit nejen způsob hospodaření, ale také celkovou strukturu produkce a spotřeby (Eisen & Brown 2022, Peng et al., 2025) . Z tohoto důvodu je mnoho výzkumu věnováno konceptu cirkulární ekonomiky v zemědělství (Peng et al., 2025), jakožto ekonomické biomimeze – oběhové hospodářství připomínající uzavřený přírodní systém, namísto samoúčelného a často destruktivního ekonomického růstu. Nutnost přehodnotit naše priority je jistě těm, kteří zkoumají ubývající druhovou rozmanitost uprostřed antropogenního masového vymírání, zřejmá.

1.3. Úbytek biodiverzity

V současné době čelíme šestému masovému vymírání, které je výjimečné tím, že jeho hlavní příčinou není geologická nebo astronomická událost, ale činnost člověka (Pievani 2014). Jedním z nejvýraznějších symptomů této krize je úbytek biodiverzity v zemědělské krajině, která byla v minulosti domovem mnoha dnes vymizelých druhů (IPBES 2019). Jednou z nejcitelnějších ztrát je úbytek hmyzu, zejména opylovačů, jako jsou včely, motýli nebo brouci. Podle metaanalýzy (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019) se biomasa hmyzu na světě každoročně snižuje o zhruba 2,5 %, přičemž více než 40 % druhů může být na pokraji vyhynutí. Tento pokles má dalekosáhlé dopady nejen na biodiverzitu jako takovou, ale i na zemědělství, neboť opylovači hrají klíčovou roli v produkci mnoha plodin. Podobně alarmující je úbytek ptáků zemědělské krajiny. Data z evropského Farmland Bird Index ukazují, že od roku 1980 poklesly populace typických druhů jako je skřivan polní (*Alauda arvensis*), strnad obecný (*Emberiza citrinella*) nebo čejka chocholatá (*Vanellus vanellus*) o více než 50 % (Voříšek et al. 2010). Ptáci přitom neslouží jen jako indikátory – podílejí se i na regulaci škůdců a šíření semen.

Závažné změny se odehrávají také v půdě, kde mizí půdní bezobratlí jako žížaly, půdní roztoči či mikroorganismy, jež jsou zásadní pro koloběh živin, rozklad organické hmoty i celkovou úrodnost. Tento úbytek je dán mimo jiné nadměrnou mechanizací, používáním pesticidů a ztrátou organické hmoty (Turbé et al., 2010; FAO, 2019).

1.4. Alternativní formy zemědělství

V posledních desetiletích se stávají alternativní metody zemědělství stále častěji diskutovaným tématem. Mezi tyto přístupy patří zejména ekologické (organické či BIO) zemědělství, agrolesnictví, integrovaná produkce nebo regenerativní zemědělství. Společným jmenovatelem těchto forem hospodaření je snaha o zvýšení ekologické stability, redukci chemických vstupů a využívání přirozených ekosystémových funkcí (Scialabba & Hattam, 2002).

Ekologické zemědělství

Ekologické (organické nebo též BIO) zemědělství je definováno jako způsob hospodaření, který vylučuje použití syntetických agrochemikálií a průmyslových hnojiv, klade důraz na podporu přirozených procesů, jako je biologická kontrola škůdců, střídání plodin nebo využití kompostu a zeleného hnojení (FAO, 1998). Z hlediska biodiverzity bylo opakovaně prokázáno, že ekologické systémy podporují vyšší druhovou bohatost rostlin, hmyzu i ptáků než konvenční farmy (Tuck et al., 2014). Organické zemědělství v průměru zvyšuje druhovou bohatost přibližně o 30% (Tuck et al., 2014). Efekty jsou však často modifikovány okolní krajinou – v intenzivně využívané zemědělské krajině je rozdíl mezi ekologickým a konvenčním hospodařením výraznější než v mozaikovité, polopřirozené krajině (Bengtsson et al., 2005).

Agrolesnictví

Agrolesnictví představuje kombinaci zemědělských plodin, a dřevin, potažmo v silvopastorálním agrolesnictví též pastvy v rámci jednoho systému hospodaření (Leakey, 2017). Díky větší strukturální heterogenitě a přítomnosti více trofických úrovní poskytuje agrolesnictví

řadu mikrohabitatů pro různé skupiny organismů. Agrolesnické systémy mohou podporovat vyšší diverzitu ptáků, opylovačů a půdních organismů ve srovnání s monokulturními systémy (Torralba et al., 2016). Studie prokázaly, že u půdních organismů, včetně arbuskulárních mykorhizních hub a bakterií, byla aktivita enzymatického působení výrazně vyšší v agrolesních systémech než v konvenčních plodinách a pastevních systémech (Jose, 2009). Zároveň se jedná o perspektivní přístup z hlediska adaptace na klimatické změny. Formou tradičního agrolesnictví je též pařezení, které tvoří ochranářsky cenné mozaikovité habitaty mýtin a lesů v různých sukcesních fázích.

Regenerativní zemědělství, Syntropické zemědělství, Permakultura

Regenerativní zemědělství se soustředí na obnovu půdního zdraví, sekvestraci uhlíku a zvýšení ekologické odolnosti systémů (Rodale, 1983). Ačkoli tyto přístupy nejsou vždy striktně definované, stále více studií potvrzuje jejich pozitivní dopad na diverzitu mikroorganismů, půdních bezobratlých i vegetace (Lori et al., 2017; Schreefel et al., 2020). S touto naukou se překrývá též syntropické zemědělství, které se snaží mimikovat přirozenou vegetační sukcesi a navrhnout produkční agroekosystém jako sukcesní proces (Andrade et al., 2020). To kontrastuje s konvenčním zemědělstvím v Evropě, založeným na orbě a jednoletých plodinách, a rovněž kontrastuje s tropickým „slash and burn" zemědělstvím způsobujícím odlesnění. „Jedlý les", tedy agrolesnický systém produktivně kombinující různá vegetační patra, je v tomto případě cílem (Andrade et al., 2020).

Permakultura je designový a etický přístup snažící se vytvořit biodiverzní agroekosystém pomocí inteligentního návrhu krajiny (Mollison, 1990). Zdůrazňuje krajinářskou architekturu, agrolesnickou produkci a smíšené polykultury, maximální redukci odpadů, a etický rozměr shrnutý do třech bodů: Péče o zemi (Earth care), Péče o lidi (People care), Spravedlivé přerozdělení (Fair share) (Mollison, 1990). Všechny tyto metody mají alespoň příležitostné zastoupení v ČR, avšak stále jsou relativně málo aplikované. Vědecké studie vyhodnocující existující projekty permakultury, syntropického a regenerativního zemědělství v ČR téměř úplně chybí, a jsou potenciálním předmětem budoucího výzkumu.

2. Biodiverzitní indikátory

Indikátorové organismy představují důležitý nástroj pro monitorování ekologických dopadů zemědělských praktik. Jedná se o vybrané skupiny organismů, jejichž přítomnost, početnost nebo druhové složení poskytují informace o kvalitě a stabilitě ekosystémů. V zemědělském kontextu jsou indikátory využívány k posouzení, jak různé formy hospodaření ovlivňují ekologickou rovnováhu v ekosystémech. V této práci se soustředím primárně na nelesní ekosystémy, avšak lesům podobné krajinné prvky (remízky a stromové pásy) mají přímý efekt na biodiverzitu okolní bezlesní plochy.

Mezi žádoucí vlastnosti bioindikátorů patří citlivost na změny prostředí, široký areál výskytu a snadná identifikace, dostupnost dat, a dobře zdokumentované ekologické nároky a role, které poskytnou adekvátní výpovědní hodnotu pro vyhodnocení funkce ekosystémů.

Indikátorové organismy a jejich vlastnosti se dají shrnout do následující tabulky (Tab. 1):

Tabulka 1: Přehled skupin indikátorových organismů

Skupina organismů	Konkrétní příklady	Indikuje	Výhody pro monitoring
Ptáci	skřivan polní, koroptev polní	Kvalitu otevřené krajiny, intenzitu hospodaření	Snadná identifikace, dobře dokumentovaný výskyt
Opylovači	včela medonosná, divoké samotářské včely, různé druhy denních i nočních motýlů	Diverzitu rostlin, pesticidovou zátěž	Klíčová ekologická funkce, citlivost na změny
Hmyzí predátoři	slunéčka, zlatoočky, střevlíci	Funkčnost biologické kontroly škůdců	Indikátor ekosystémové integrity
Půdní bezobratlí	žížaly, střevlíci	Kvalitu půdy, úroveň disturbance	Přímá vazba na půdní kvalitu
Cévnaté rostliny	polní plevele, luční druhy	Intenzitu obhospodařování	Snadná identifikace, široká dostupnost
Epifyty a bryofytní společenstva	mechy, játrovky, lišejníky	Trofickou úživnost atmosféry	Zjištění atmosférické depozice živin
Mikroorganismy	půdní bakterie, houby	Chemické a fyzikální vlastnosti půdy	Komplexní informace o půdním prostředí

Použití těchto indikátorových skupin umožňuje srovnání ekologického a konvenčního zemědělství, sledování trendů v čase, a vyhodnocení dopadů různých agropolitik na biodiverzitu a s ní asociované ekosystémové funkce (Kevan 1999, Mamabolo et al., 2024, Šálek et al., 2018). Zároveň umožňuje informovaný návrh cílených opatření k ochraně biodiverzity v kulturní krajině.

2.1. Ptáci

Ptáci zemědělské krajiny patří mezi nejčastěji používané indikátory biologické rozmanitosti v zemědělské krajině. Jsou dobře známí, metodicky zvládnutelní a jejich populační trendy často přímo reagují na změny v hospodaření a krajinné struktuře. V kontextu České republiky analýza ptactva ukázala, že druhová bohatost je pozitivně ovlivněna přítomností krajinných struktur a nižší intenzitou vstupů (Reif et al., 2008). Tyto krajinné struktury, jako jsou remízky, křoviny a stromové pásy, okraje polních cest a mokřadní prvky poskytují útočiště rozmanitým ptačím společenstvům. Kromě samotného habitatu a hnízdních příležitostí rovněž poskytují ptákům potravní zdroje, neboť na krajinné heterogenitě je závislá též abundance a biodiverzita jejich kořisti. V zemích střední a východní Evropy, které byly dlouhou považovány za poslední refugia biodiverzity evropské zemědělské krajiny (i navzdory zemědělské kolektivizaci), došlo po vstupu do EU k akceleraci poklesu populací ptactva v důsledku rychlé intenzifikace zemědělství (Reif et al., 2024). Reif a kol. se domnívají, že příčinou je preference k udělování dotací z EU common agricultural policy intenzivnímu zemědělství. Globální hierarchická meta-analýza (Tuck et al., 2014) prokázala, že ekologické zemědělství má významné pozitivní efekty na biodiverzitu ve srovnání s tím konvenčním. V okolí s intenzivnějším obhospodařování se ekologicky obhospodařovaná oblast stane refugiem a statisticky vyčnívajícím ostrovem biodiverzity. V relativně méně dotčené krajině je pozitivní efekt na biodiverzitu tedy méně významný, a to i přesto, že celková druhová rozmanitost může být stejná či velmi podobná. Důležité je zde podotknout, že nižší relativní benefit ekologického zemědělství v méně intenzifikované krajině neznamená, že ekologická opatření „nefungují“. Podstatou těchto

ekologických opatření je odstranění jistých překážek biodiverzitě, a tedy budou statisticky více vyčnívat v krajině kde je těchto překážek méně. Tyto překážky mohou být dané strukturou habitatu, ale i třeba chemickým zatížením. Další meta-analýza (Hole et al., 2005) potvrdila, že ekologické systémy pravidelně vykazují vyšší druhové bohatství, což má pozitivní dopad i na vyšší trofické úrovně. Ptáci jsou v zemědělské krajině často predátory hmyzu a drobných hlodavců, hrozí jim tedy trofická bioakumulace pesticidů určených k hubení jejich kořisti. Ochrana habitatu a jeho charakteristik je způsobem, jak chránit procesy predace ptáky, kteří přirozeně populace škůdců regulují.

2.2. Hmyz

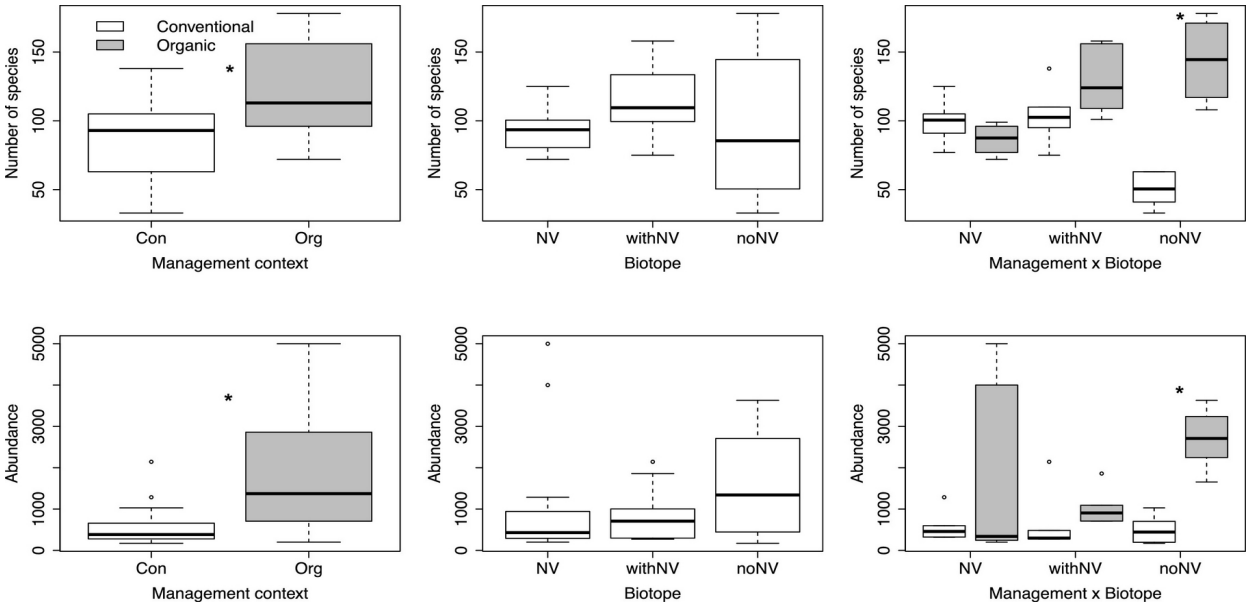
Opylovači

Opylovači představují jednu z nejcitlivějších indikátorových skupin pro hodnocení environmentálních dopadů zemědělských systémů (Chowdhury et al., 2023). Klíčová role opylovačů jako indikátorů spočívá v jejich citlivosti na pesticidy používané v konvenčním zemědělství, a také v jejich závislosti na rozmanitosti květnaté vegetace, kterou ekologické systémy pomáhají udržovat. V zemědělských ekosystémech diverzita opylovačů zvyšuje kvalitu a kvantitu výnosů plodin. Studie ukazují, že mnohé skupiny opylovačů jsou užitečné také pro monitoring environmentálního znečištění, zejména pesticidů a eutrofizace (Kevan, 1999). Druhová rozmanitost a abundance opylujícího hmyzu byla středně až výrazně vyšší na ekologických farmách než na konvenčních (Walker et al., 2025). V evropském kontextu se na opylovače zaměřuje projekt STEP, neboli Status and Trends of European Pollinators. Souhrn provedených studií (Potts et al., 2015) uvádí, že kvalitní přírodní nebo polopřírodní stanoviště poskytují nezbytný základ pro početná a druhově bohatá společenstva včel v zemědělských krajinách Evropy. Návštěvnost opylovačů klesala se vzdáleností od přírodních oblastí, což mělo za následek snížení tvorby plodů u plodin a menší stabilitu ekologické funkce opylování. Divoký hmyz ve srovnání s včelami medonosnými (*Apis mellifera*) opyluje plodiny efektivněji, než se dříve předpokládalo. Včely medonosné spíše doplňují než nahrazují opylování divokým hmyzem, což zdůrazňuje důležitost monitorování a ochrany jak divokých, tak domestikovaných opylovačů. Jak bylo zmíněno u ptáků, i zde platí, že v krajinách s vysokou intenzitou zemědělského využívání má ekologické hospodaření větší pozitivní efekty na biodiverzitu ve srovnání s konvenčním. Velikost efektu se liší podle studované skupiny organismů a plodin a je větší v krajinách s vyšší intenzitou využívání půdy (Tuck et al., 2014). Nicméně je nutné zmínit variabilitu výsledků podle kontextu. Kehinde a Samways (2012) se zaměřovali na opylovače Kapské floristické oblasti v Jižní Africe. Asi třetina rozlohy této botanicky cenné oblasti je obdělávána intenzivními vinicemi. Zjistili, že druhová bohatost krasců (*Buprestidae*), avšak paradoxně ne druhová bohatost včel (*Apidae*), těžila z organického ve srovnání s konvenčním managementem vinic, což naznačuje, že efektivita opylovačů jako indikátorů závisí na konkrétním typu kultury a krajinném kontextu.

Predátoři

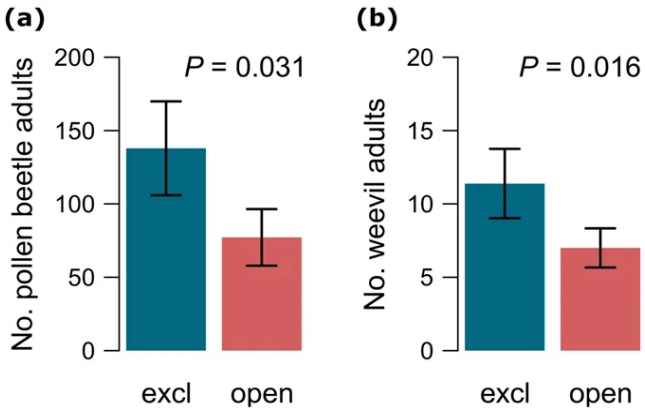
Abundance a funkční diverzita hmyzích predátorů zásadně ovlivňuje schopnost farmářů udržet rovnováhu mezi produktivitou a ekosystémovými službami. V rámci studie Gallowaye a kol. z roku 2021 byl zkoumán vliv přirozené vegetace v kombinaci s typem zemědělského hospodaření (konvenční versus ekologické) na druhovou rozmanitost predátorů mezi členovci v trvalém zemědělském systému, a to konkrétně v citrónových sadech. Autoři hodnotili vliv vybraných environmentálních proměnných, jako jsou druhová bohatost rostlin, početnost kvetoucích rostlin, výška porostu, hloubka opadu, a pokryvnost travin, bylinných a dřevinných rostlin či kamenů, na výskyt predátorů napříč mozaikou sadů a přírodní vegetace.

Výsledky ukázaly, že ekologicky obhospodařované farmy měly výrazně vyšší druhovou bohatost i početnost predátorů, přičemž druhové složení se lišilo podle biotopu. Ekologické farmy vykazovaly vyšší druhovou rozmanitost a početnost predátorů než konvenční farmy pouze v prostředí bez přilehlé přírodní vegetace. V případě, že přírodní vegetace byla přítomna, rozdíly mezi ekologickým a konvenčním hospodařením v tomto ohledu zmizely. Obdobné výsledky popisovaly také studie zmíněné výše. Okolní zbytky přirozené vegetace v krajině tedy mohou významně podpořit biodiverzitu predátorů i v konvenčně obhospodařovaných sadech, avšak přežití těchto predátorů je též závislé na ekotoxikologické zátěži daného agroekosystému. Všechny zkoumané environmentální proměnné přitom významně ovlivňovaly výskyt některých sledovaných skupin členovců, a to napříč biotopy (Obr. 1). Výzkum tak potvrzuje, že zachování strukturální a druhové heterogenity v zemědělské krajině má zásadní význam. Relativní impakt ekologického zemědělství tedy silně závisí na kontextu krajiny, zejména na blízkosti přírodních stanovišť. Pro podporu druhové bohatosti a početnosti predátorů se proto doporučuje diverzifikace jak na úrovni jednotlivých farem, tak na úrovni širší krajiny.



OBRÁZEK 1: Box plot celkové druhové bohatosti a abundance členovců-predátorů pro různé typy managementu. Hvězdička (*) označuje signifikantní rozdíl ($p < 0.05$). Con = Konvenční zemědělství, Org = Organické zemědělství, NV = Přírodní vegetace, withNV = Sady s asociovanou přírodní vegetací, noNV = Sady bez asociované přírodní vegetace. Převzato od Galloway et al., 2021

Studie zabývající se funkční diverzitou odhalily, že organické farmaření nejen zvyšuje biodiverzitu cévnatých rostlin a opylovačů, ale také posiluje abundance mšicožravých predátorů, což umožňuje efektivnější „top-down“ kontrolu mšic, kterých je v organických systémech výrazně méně (Krauss et al., 2011). Významnou roli hraje krajinný kontext, neboť organické farmaření podporuje populace členovců-predátorů zejména tehdy, když jsou v okolí přítomny plochy přirozené vegetace, které slouží jako zdrojová stanoviště pro tyto užitečné organismy. Tento vzorec potvrzuje, že efektivita biologické kontroly závisí na komplexní síti ekologických vztahů, kde chemické pesticidy narušují nejen cílové škůdce, ale i jejich přirozené nepřátele. Současně však autoři upozorňují na komplementaritu různých skupin predátorů. Zatímco přízemní predátoři mohou mít omezený dopad na mšice obilovin, jejich vliv na krytonosce (*Ceutorhynchus sp.*) a blýskáčka řepkového (*Brassicogethes aeneus*) v řepce je dostatečně silný pro efektivní kontrolu (Dainese et al., 2017) (Obr. 2).

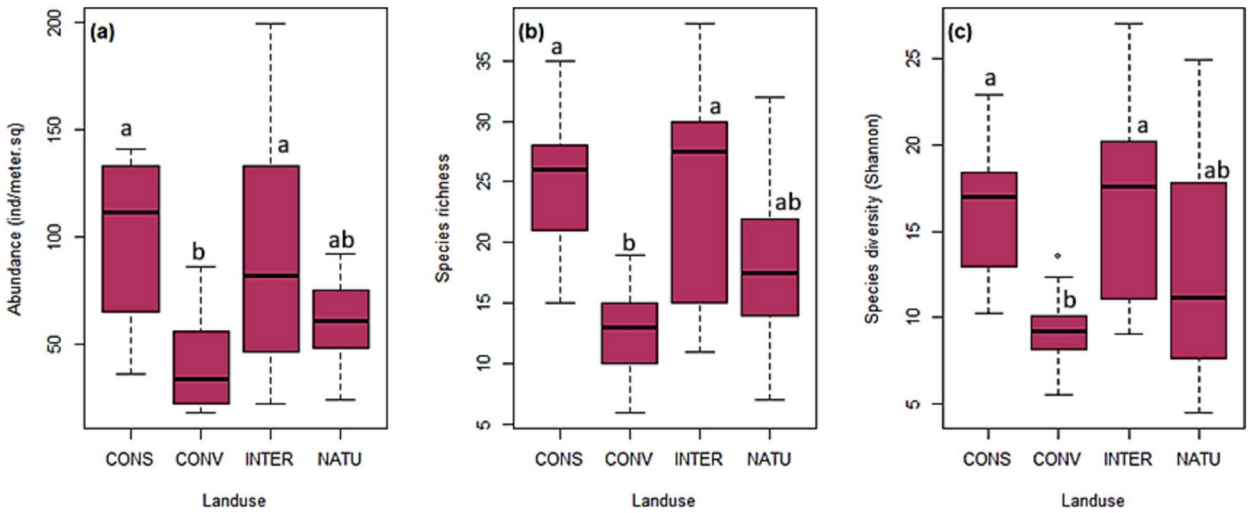


OBRÁZEK 2: Efekt vyloučení pozemních predátorů (excl = vyloučení; open = otevřený přístup) na hustotu škůdců. Průměr (± SE) (a) počtu jedinců blýskáčka řepkového (*Brassicogethes aeneus*) a (b) počtu dospělců krytonosce (*Ceutorhynchus sp.*). Převzato od Dainese et al., 2017

2.3. Půdní bezobratlí

Půdní fauna představuje vysoce účinný bioindikátor kvality zemědělských systémů a jejich dopadu na půdní ekosystémy. Taxonomická diverzita a abundance půdních organismů významně reaguje na intenzitu zemědělského hospodaření, což z nich činí spolehlivé ukazatele zdraví půdy (Tuck et al., 2014). Nejčastěji využívané skupiny půdní fauny pro bioindikaci zahrnují žížaly (*Lumbricina*), chvostoskoky (*Collembola*) a roztoče (*Acari*), zejména pancířníky (*Oribatida*), kteří vykazují citlivou reakci na změny v obhospodařování půdy. Studie zaměřená na vliv zemědělské intenzifikace (Postma-Blaauw et al., 2012) naznačuje, že konvenční zemědělství s vysokým vstupem chemických látek významně redukuje druhovou diverzitu a abundance těchto klíčových skupin půdní fauny. Přeměna intenzivně obhospodařovaného travního porostu na ornou půdu měla v krátkodobém horizontu škodlivé účinky na taxonomickou bohatost i rozmanitost napříč různými taxonomickými skupinami, přičemž největší dopady byly zaznamenány u půdních organismů s větší tělesnou velikostí. Účinky byly škodlivé již velmi krátce po přeměně. Obnova extenzivního travního porostu vedla k vytvoření druhově bohatého společenstva hlístic (*Nematoda*), s částečně odlišným druhovým složením, a rovněž vedla k obnově společenstva žížal. Druhy dravých roztočů byly při opětovném usazení méně úspěšné a

negativní dopady na druhy roupic (*Enchytraeidae*) přetrvávaly. Klíčovou studii provedli Yin et al. (2020) v rámci Global Change Experimental Facility v Německu, kde testovali účinky klimatu (současný versus "budoucí" podle projekcí pro roky 2070-2100) a způsobu využívání půdy (konvenční zemědělství, organické zemědělství, intenzivně využívané louky, extenzivně využívané louky a extenzivně využívané pastviny) na funkční diverzitu chvostoskoků. Studie zkoumala funkční diverzitu (FD), komunity-vážené průměrné znaky (CWM) zahrnující životní historii a morfologii, funkční složení chvostoskoků a také index biologické kvality půdy založený na chvostoskcích (QBS-c). Výsledky prokázaly, že využívání půdy je dominantním faktorem ovlivňujícím změny ve funkční diverzitě, funkčních znacích a funkčním složení chvostoskoků, stejně jako změny v biologické kvalitě půdy. Tyto významné efekty využívání půdy byly způsobeny především rozdíly mezi dvěma hlavními typy využívání půdy – ornou půdou versus travnatými porosty. Konkrétně funkční biodiverzita chvostoskoků a biologická kvalita půdy byly významně nižší na orné půdě ve srovnání s travnatými porosty. Zajímavé je, že studie nezjistila žádný interaktivní efekt klimatu × využívání půdy, což naznačuje, že účinky využívání půdy na chvostoskoky byly nezávislé na scénáři klimatických změn. Celkově studie ukázala, že funkční reakce chvostoskoků jsou vysoce zranitelné vůči intenzifikaci využívání půdy za obou klimatických scénářů, přičemž změny ve využívání půdy snižují funkční biodiverzitu a biologickou kvalitu půdy (Yin et al., 2020). Yin a kol. podotýkají, že chvostoskoci, jako jedna z nejpočetnějších skupin půdních bezobratlých, vykazují výraznou funkční diverzitu a jejich složení komunity silně reflektuje změny v zemědělských praktikách, přičemž jejich abundance a druhová bohatost jsou obecně vyšší v organických systémech, díky lepší struktuře půdy a vyššímu obsahu organické hmoty. Pancířníci (*Oribatida*), kteří hrají klíčovou roli v rozkladu organické hmoty a koloběhu živin, vykazují v agroekosystémech výraznou citlivost na mechanické narušení a chemické vstupy, což z nich činí užitečné bioindikátory pro hodnocení dopadu zemědělských praktik na půdní biodiverzitu (Behan-Pelletier, 1999). Komplexní studie provedená Mamabolo a kol. (2024) v Jihoafrické republice prokázala klíčovou roli edafické makrofauny jako bioindikátoru kvality půdy v různě obhospodařovaných agroekosystémech. Výzkumníci ze vzorků půdy sebrali celkem 4013 jedinců představujících 108 druhů. Kolekce zahrnovala brouky (*Coleoptera*, 17 druhů), mnohonožky (*Diplopoda*, 13 druhů), stonožky (*Chilopoda*, 8 druhů), pavouky (*Araneae*, 13 druhů), motýly (*Lepidoptera*, 10 druhů), škvory (*Dermaptera*, 9 druhů), žížaly (*Lumbricina*, 18 druhů), blanokřídlý hmyz (*Hymenoptera*, 12 druhů), ploštice (*Hemiptera*, 11 druhů) a šváby (Blattodea, 8 druhů). Výzkum porovnával čtyři různé typy využívání půdy: konzervační management, integrovaný systém s chovem hospodářských zvířat v rámci pěstitelských systémů, konvenční management a přírodní travnaté porosty jako referenční stanoviště (Obr. 3). Studie využívala půdní monolity pro sběr fyzikálních, chemických a biologických vzorků, přičemž se zaměřovala na půdní makrofaunu jako biologické indikátory reprezentující důležité aspekty kvality půdy: biodiverzitu, chemickou fertilitu a fyzikální kvalitu.



OBRÁZEK 3: Porovnání diverzity půdní fauny (a), druhové bohatosti (b), a hustoty (c) mezi různými systémy land-use. CONS = Ochranářské zemědělství, INTER = Integrovaný systém, CONV = Konvenční zemědělství a NATU = Přírodní habitat. Převzato od Mamabolo et al., 2024

Integrovaný systém s chovem hospodářských zvířat vykazoval nejvyšší hodnoty kvality půdy podle všech biologických, chemických i fyzikálních indikátorů. Naopak většina indikátorových proměnných signalizujících špatnou kvalitu půdy byla výrazně korelována s konvenčním hospodařením. Konvenční způsob využívání půdy vykazoval nižší sníženou biodiverzitu a nižší obsah vápníku a hořčíku spolu se zvýšeným zhutněním půdy. Biodiverzitní indikátor byl úzce propojen s celkovým indikátorem kvality půdy, což naznačuje, že půdní makrofauna může být hlavním činitelem kvality půdy a současně může sloužit k hodnocení celkové kvality půdy. Celkové výsledky tedy prokázaly, že regenerativní praktiky mohou obnovit degradované půdy a ekosystémové služby (Mamabolo et al., 2024). Komplexnost půdních potravních sítí a jejich trofických vazeb je v intenzivně obhospodařovaných systémech významně snížena, což se odráží nejen v poklesu diverzity, ale i v redukci tělesné velikosti klíčových taxonů půdní fauny a následném oslabení ekosystémových funkcí, jako je mineralizace, retence vody, půdní metabolismus a cykly živin a tím i dlouhodobá udržitelnost půdy.

2.4. Cévnaté rostliny

Rostliny jsou často indikátory dlouhodobého managementu a intenzity využití půdy, neboť jejich diverzita se zvyšuje zejména na extenzivních plochách bez herbicidů. Meta-analýza (Hole et al., 2005) ukázala, že ekologické systémy pravidelně vykazují vyšší druhové bohatství polních plevelů a lučních rostlin, což má pozitivní dopad i na vyšší trofické úrovně jako jsou opylovači a hmyz. Tato diverzita je však snadno potlačena při vyšší intenzitě obhospodařování, například při příliš častém sečení nebo přihnojování. Rostlinná diverzita na ekologických farmách je důležitá nejen sama o sobě, ale poskytuje také základ pro celé potravní sítě, podporuje opylovače a vytváří vhodné prostředí pro další skupiny organismů.

U rostlin se pro jejich využití k bioindikaci v agroekologickém kontextu naskýtá možnost využití Ellenbergových indikačních hodnot (Dále označené EIV, Ellenberg et al., 1992). EIV se

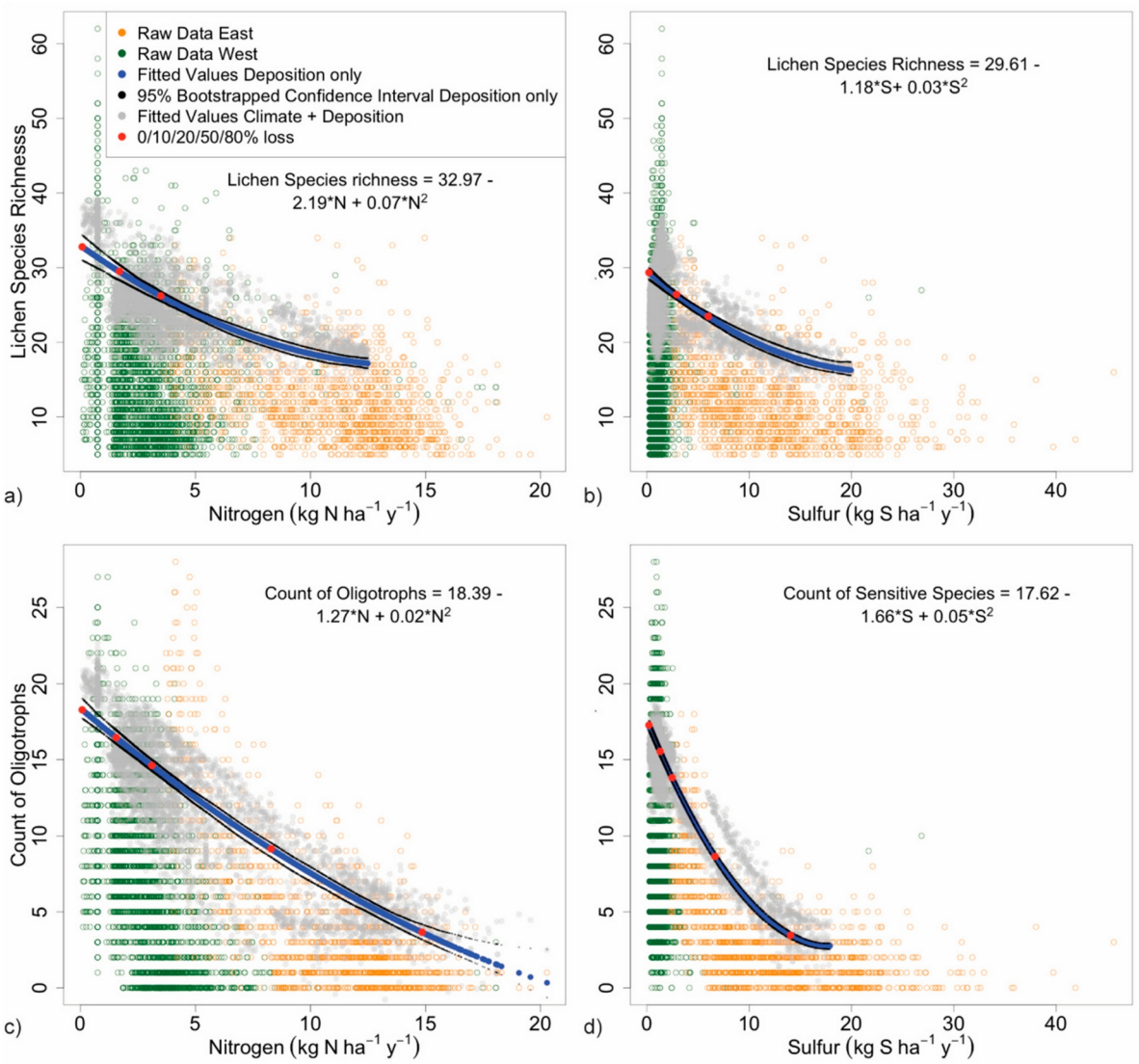
ukazují jako zvláště cenné pro analýzu intenzity zemědělského hospodaření a jejích dopadů na rostlinnou diverzitu. Blüthgen a kol. (2012) vyvinuli kompozitní index intenzity využívání půdy (LUI – Land Use Intensity) kombinující hnojení, sekání a pastvu, který ve spojení s EIV umožňuje kvantifikovat odpověď rostlinných společenstev na management. Jejich studie na travních porostech odhalila, že 34% druhů rostlin reaguje negativně na vysokou intenzitu využívání, zatímco pouze 10% druhů vykazuje pozitivní vztah k intenzifikaci. Hnojení a frekvence sekání jsou hlavními faktory transformujícími strukturu pastvin, přičemž efekt pastvy je méně výrazný. EIV pro živiny (N hodnoty) silně korelují s intenzitou hnojení a umožňují rozlišit mezi extenzivními a intenzivními systémy hospodaření.

Tuck a kol. (2014) ve své meta-analýze dokumentovali, že ekologické zemědělství zvyšuje biodiverzitu v průměru o 30 % oproti konvenčním systémům, přičemž největší efekt byl zaznamenán u plevelů (50% zvýšení) a opylovačů (38% zvýšení). Silná provázanost diverzity cévnatých rostlin, zejména kvetoucích plevelů s opylovači jistě nikoho nepřekvapí. Carrié et al. (2022) následně ukázali, že tyto pozitivní efekty na rostlinnou diverzitu se projevují nejen na úrovni polí, ale propagují se také do krajinného měřítka prostřednictvím mechanismů turnover a nestedness. Jejich výzkum odhalil, že organické farmy podporují odlišná rostlinná společenstva charakterizovaná vyššími EIV hodnotami pro světlo a nižšími hodnotami pro živiny, což odráží extenzivnější management bez intenzivního hnojení a použití herbicidů. Mechanismus turnover a nestedness představuje klíčový konceptuální rámec pro pochopení prostorových vzorců biodiverzity v zemědělských systémech. Baselga (2010) definoval teoretické základy této dekompozice. Beta diverzita vzniká ze dvou odlišných procesů: turnover (prostorová obnova druhů) odráží náhradu jednoho druhu jiným mezi lokalitami, zatímco nestedness (vnořenost) reprezentuje situaci, kdy chudší lokality obsahují podmnožinu druhů z bohatších lokalit. V agroekologickém kontextu turnover představuje environmentální filtraci způsobenou odlišným managementem, zatímco nestedness odráží ztrátu druhů v intenzivnějších systémech. Studie Carrié a kol. (2022) prokázala, že obě komponenty současně ovlivňují rozdíly mezi ekologickými a konvenčními systémy, přičemž turnover byl vyšší mezi organickými farmami (62% z celkové beta diverzity) než mezi konvenčními (54%), zatímco nestedness vykazovala opačný trend. Organické farmy tedy vytvářejí heterogennější mozaiku habitatů s vyšší prostorovou obnovou druhů, zatímco konvenční systémy vykazují vyšší míru vnořenosti způsobenou postupnou degradací společenstev.

2.5. Mechorosty a lišejníky

Epifytické mechy a játrovky, čerpající živiny primárně z atmosférických depozic, jsou citlivé bioindikátory emisní zátěže. Především se jedná o dusík, který může být do těchto ekosystémů přenášen i na vzdálenosti desítek kilometrů od zemědělsky intenzivně využívaných oblastí. Touto problematikou se zabývali Weldon a kol. (2022), kteří využili data ze 187 ploch zahrnutých v evropských monitorovacích programech, aby analyzovali vztah mezi úrovní dusíkové depozice v lesích a taxonomickou i funkční diverzitou bryofytních společenstev. Výsledky ukázaly, že zvýšená dusíková depozice je výrazně spojena s posunem druhového složení ve prospěch nitrofilních druhů na úkor druhů citlivých na dusík a zároveň vede ke snížení

druhové vyrovnanosti (evenness). Tato změna znamená, že bryofytní společenstva pod vlivem atmosférického dusíku ztrácejí druhovou rozmanitost i ekologickou stabilitu, což poukazuje na jejich vysokou citlivost vůči dlouhodobé eutrofizaci. Lišejníky také mohou sloužit nejen jako ukazatelé dusíkového zatížení souvisejícího se zemědělstvím, ale rovněž indikovat obecnější trendy spojené s atmosférickým znečištěním industriálního původu. Geiser a kol. (2019) použili 90% kvantilovou regresi k modelování vztahů mezi depozicí dusíku a síry a epifytickými makrolišejníky, přičemž se zaměřili na druhovou bohatost, abundanci a diverzitu funkčních skupin (Obr. 4). Kritické zátěže (mezní hodnota nízkého rizika) pro celkovou druhovou bohatost, bohatost citlivých druhů, abundanci pastevních lišejníků a abundanci cyanolišejníků byly postupně 3,5; 3,1; 1,9 a 1,3 kg N a 6,0; 2,5; 2,6 a 2,3 kg S ha^{-1} rok^{-1}. Vysoké environmentální riziko (80% pokles), s výjimkou celkové druhové bohatosti, se vyskytovalo při 14,8; 10,4 a 6,6 kg N a 14,1; 13 a 11 kg S ha^{-1} rok^{-1}.



Obázek 4: 90% kvantilová regrese depozice vs. (a) celková druhová bohatost pro N, (b) celková druhová bohatost pro S; a (c) bohatost oligotrofních druhů pro N, a (d) bohatost druhů citlivých na S pro S. Západní a východní lokality jsou označeny zelenými a oranžovými kruhy. Modré čáry představují fitovanou linii pro 90% kvantil předpovídaný modelem pouze s depozicí; bootstrapované 95% intervaly spolehlivosti jsou černé. Červené tečky označují poklesy v metrice o 0, 10, 20, 50 a 80 %. Rozmazané šedé tečky označují 90% kvantily pro model depozice + klima. Převzato od Geiser et al., 2019

2.6. Mikrobiální indikátory

Struktura bakteriálních a fungálních společenstev se výrazně liší mezi konvenčním, ekologickým a středně intenzivním způsobem pěstování, což umožňuje efektivní monitoring změn kvality půdy podle různých hospodářských praktik. Studie shrnuté v review mikrobiálních bioindikátorů (Ma et al., 2022) prokázaly, že některé druhy arbuskulárních mykorhizních hub se vyskytují výlučně při určitých orebních postupech, což z nich činí vhodné bioindikátory. Dlouhodobé hnojení chemickými hnojivy nebo organickými hnojivy po dobu 34 let ovlivnilo složení a diverzitu půdních mikroorganismů i endofytů pšenice. Bylo zjištěno, že výskyt rodů *Fusarium* a *Penicillium* v půdě se lišil podle typu hnojiva, zatímco u endofytů pšenice byla hojnost rodu *Brevundimonas* vyšší při organickém hnojení než při chemickém ošetření. Disturbance požáry také mění charakteristiky půdy a mikrobiální společenstva. Laboratorní experimenty simulující spalování posklizňových zbytků ukázaly výrazné zvýšení abundance kmene *Firmicutes*, který tak může teoreticky sloužit k monitoringu environmentálních změn způsobených požáry. Pro obnovu degradovaných zemědělských půd jsou důležitými bioindikátory bakterie *Bacillus* a sinice, jejichž abundance se dramaticky snižuje při přirozené regeneraci travních porostů. V travních ekosystémech jsou houby citlivější na degradaci než bakterie, což z nich činí potenciálně vhodnější bioindikátory pro management těchto ekosystémů.

3. Symptomy degradace

Níže shrnu hlavní oblasti degradace související se zemědělstvím a k nim reakce jednotlivých indikátorových skupin.

3.1. Ztráta strukturální diverzity krajiny

Ztráta strukturální diverzity krajiny – tedy odstraňování mezí, remízků, mokřadů a rozptýlené zeleně – vede k fragmentaci biotopů a narušení ekologické konektivity. Tento proces má zásadní dopady na řadu skupin organismů v zemědělské krajině.

Jednou z nejvíce postižených skupin jsou hnízdní ptáci otevřené zemědělské krajiny, jako je koroptev polní (*Perdix perdix*), strnad obecný (*Emberiza citrinella*) nebo skřivan polní (*Alauda arvensis*). Tyto druhy jsou závislé na pestré a mozaikovité krajině, která jim poskytuje hnízdní příležitosti a potravu. Ptáci jsou vysoce citliví na změny prostředí a využívají široké spektrum ekologických nik, což je činí výjimečně citlivými na ztrátu heterogenity biotopů. Krajinná heterogenita spíše než diverzita plodin zprostředkovává ptačí diverzitu v zemědělských krajinách. Ptáci jsou ovšem díky schopnosti letu méně citliví na fragmentaci jako takovou, ale spíše na množství a rozmanitost jednotlivých typů habitatu (de Camargo et al., 2018).

Studie Hološkové a Reifa (2024) představuje jeden z nejpodrobnějších výzkumů využití ptáků jako biodiverzitních indikátorů v zemědělských systémech. Autoři se zaměřili na konipasa lučního (*Motacilla flava*), hmyzožravý druh procházející dramatickým populačním poklesem. V

zemích EU došlo za posledních 30 let k úbytku o 97 milionů jedinců. Volba tohoto druhu byla strategická, neboť se jedná o původně stepní druh, který se adaptoval na zemědělskou krajinu v důsledku ztráty přirozených habitatů. Výzkum probíhal v jihozápadním Slovensku s mimořádně velkými poli (průměrně 50 hektarů), což reprezentuje typickou situaci zemí bývalého východního bloku po kolektivizaci. Výsledky odhalily dramatické rozdíly v abundanci konipasa mezi různými plodinami. Ozimá pšenice hostila nejvyšší počet jedinců, zatímco řepka a kukuřice byly téměř opuštěny. Překvapivě tyto rozdíly nebyly způsobeny dostupností potravy, ale strukturálními charakteristikami porostů. Konipas preferoval středně vysoké porosty s vysokou pokryvností odpovídající jeho původnímu habitatu ve vlhkých loukách. Krajinná struktura významně ovlivňovala efektivitu indikátoru. Přítomnost dřevinné vegetace na okrajích polí měla silně negativní efekt. Pouze 9 jedinců bylo zaznamenáno na polích s dřevinami oproti 79 jedincům na polích bez dřevin. Tento výsledek ukazuje specifitu různých biodiverzitních indikátorů a nutnost jejich výběru v souladu s cíli hodnocení. Prostorové rozmístění ptáků odhalilo, že konipas se vyskytoval přednostně na okrajích polí, což výrazně omezovalo efektivně využívanou plochu velkých polí. Sezónní dynamika abundance navíc ukázala měnící se vztahy s habitatovými charakteristikami. Zatímco v květnu byla abundance negativně ovlivněna výškou plodin, v červnu se vztah s pokryvností stal nelineární s optimem kolem 90% pokryvnosti. Studie demonstruje, že jednotlivé druhy mohou sloužit jako účinné biodiverzitní indikátory pouze při dobré znalosti jejich ekologických požadavků v konkrétní krajině.

Ztrátou strukturální diverzity jsou negativně ovlivňováni také střevlíci (*Carabidae*) a další epigeičtí brouci. Tito živočichové využívají strukturálně členité části krajiny, jako jsou okraje polí, meze či remízky jako stanoviště i migrační koridory. Hranice mezi krajinnými prvky filtrují některé organismy pokoušející se je překonat, což má za následek odlišná společenstva v rámci krajinných prvků (French et al., 2001, Varchola et al., 2001). Role střevlíků jako predátorů je obzvláště významná v kontextu udržitelného zemědělství, protože konzumují široké spektrum škodlivých druhů, včetně mšic, třásněnek, larev motýlů a semen plevelů. Studie Varcholy a kol. (2001) zdůraznila, že různé druhy střevlíků mají odlišné potravní preference a lovecké strategie, což přispívá k efektivitě biologické ochrany napříč různými typy škůdců. Klíčovým faktorem ovlivňujícím populace střevlíků je heterogenita krajiny a přítomnost krajinných prvků poskytujících vhodné mikrohabitaty. Okraje polí a meze slouží nejen jako místa rozmnožování a přezimování, ale také jako refugia během intenzivních zemědělských operací jako je orba, sklizeň nebo aplikace pesticidů. Výzkum ukázal, že střevlíci jsou schopni rychle kolonizovat nově obdělávané plochy z těchto refugií, což zvyšuje jejich účinnost jako biologické kontroly škůdců na počátku vegetačního období. Disperzní schopnosti střevlíků jsou výrazně omezené jejich způsobem pohybu. Většina druhů se pohybuje pouze chůzí a jejich schopnost překonávat větší vzdálenosti nebo bariéry je limitovaná. Tyto vlastnosti z nich dělají vynikající organismy pro studium hraniční dynamiky (French et al., 2001). To činí z krajinných prvků jako jsou živé ploty, remízky a travnaté pásy klíčové koridory pro jejich pohyb mezi různými habitaty. Při absenci těchto struktur se populace střevlíků stávají fragmentovanými a izolovanými, což vede k poklesu jejich genetické diverzity a celkové životaschopnosti populací.

Zemědělské krajiny mohou být upravovány způsoby, které prospívají dravému hmyzu poskytováním alternativních zdrojů potravy, míst pro přezimování a úkrytu před zemědělskými

aktivitami. Fournier a Loreau (1999) dokumentovali, že nově založené živé ploty v zemědělské krajině měly pozitivní vliv na diverzitu společenstev střevlíků. Autoři zjistili, že živé ploty poskytují vhodné habitaty pro různé druhy střevlíků a přispívají k celkové diverzitě těchto organismů v zemědělském ekosystému. Detailní analýza struktury společenstev odhalila, že různé typy krajinných prvků podporují různé ekologické skupiny střevlíků. Travnaté meze a okraje polí jsou kolonizovány především druhy otevřených stanovišť, zatímco hustší křovité porosty a živé ploty poskytují habitaty pro druhy preferující stinnější a vlhčí podmínky. Tato komplementarita habitatů je klíčová pro udržení vysoké celkové diverzity střevlíků na krajinné úrovni. Střevlíci reagují velmi citlivě na typ a intenzitu zemědělského managementu. Ekologické zemědělství obecně podporuje vyšší abundanci a diverzitu střevlíků ve srovnání s konvenčním intenzivním zemědělstvím. Absence syntetických pesticidů a hnojiv, spolu s častější přítomností krajinných prvků na ekologických farmách, vytváří příznivější podmínky pro tyto organismy (Fournier & Loreau, 1999, Varchola, 2001). Současně se ukázalo, že některé druhy střevlíků mohou sloužit jako indikátory kvality půdy a celkového zdraví agroekosystému, protože jejich populace úzce souvisí s obsahem organické hmoty v půdě, její strukturou a mikrobiálními procesy.

Také čmeláci a motýli jsou citliví na změny ve struktuře krajiny. Květnaté pásy, okraje cest a další liniové biotopy poskytují těmto opylovačům nejen potravu, ale i úkryt a hnízdní možnosti. Okraje polí, stejně jako další nepěstované biotopy, jsou důležité pro mnoho druhů motýlů a čmeláků (Ekroos et al., 2008). Okraje polí a zelené pásy mohou být ve skutečnosti jediným vhodným biotopem pro většinu motýlů v zemědělských oblastech, neboť louky jsou marginálními prvky v dnešních zemědělských krajinách. Květinové zdroje byly nejhojnější a nejrozmanitější na okrajích silnic, v pobřežních ochranných pásech a v otevřených křovinách. Tyto biotopy byly klíčové pro motýly, přičemž okraje silnic a ochranná pásma byly také důležité pro pestřenky a čmeláky (Cole et al., 2017). Květnaté pásy vytvořené na orné půdě výsevem druhově bohatých směsí semen mají vysoký potenciál pro boj proti úbytku druhů motýlů v zemědělské krajině. Studie provedená v Dolním Sasku dokumentovala celkem 19 druhů motýlů a 1 394 jedinců v květnatých pásech, zatímco na travnatých okrajích polí bylo zaznamenáno pouze 13 druhů a 401 jedinců (Wix et al., 2019). Klíčovým faktorem pro výskyt motýlů se ukázal být počet kvetoucích druhů rostlin, a to jak v květnatých pásech, tak na travnatých okrajích polí. Diverzita okolní krajiny (Shannon-Index H) měla dodatečný významný vliv na motýly v květnatých pásech, přičemž více druhů a jedinců bylo pozorováno v oblastech s nižším Shannon-indexem. Pro optimální podporu motýlů je nezbytné, aby květnaté pásy poskytovaly dobrý přísun květů po několik let. To vyžaduje pečlivý návrh a management, protože nabídka květů často klesá se zvyšujícím se stářím květnatých pásů. Studie naznačuje, že květnaté pásy mají obzvláště vysoký efekt ve strukturně jednoduchých krajinách. Počet kvetoucích druhů rostlin je tak hlavním hybatelem diverzity a abundance motýlů, což zlepšuje kvalitu habitatu květnatých pásů v zemědělských krajinách.

Celkově tedy platí, že ztráta strukturální rozmanitosti krajiny významně omezuje biodiverzitu zemědělských ekosystémů. Probíhající pokles biologické rozmanitosti v současných krajinách je z velké části způsoben ztrátou a fragmentací biotopů (Haddad et al., 2015). Nejde přitom jen o „ztrátu druhů", ale o oslabení celého spektra ekosystémových služeb, jako je

opylování, biologická kontrola škůdců nebo obnova půdní úrodnosti. Obnova těchto krajinných prvků představuje klíčový krok k udržitelnějšímu zemědělství.

3.2. Degradace půdního prostředí

Intenzivní zemědělské systémy představují významnou zátěž pro půdní ekosystémy, přičemž žížaly patří mezi nejcitlivější a široce zkoumané indikátory jejich zdraví. Konvenční zpracování půdy poškozuje populace žížal prostřednictvím přímého mechanického narušení jejich těl i destrukce jejich přirozených stanovišť. Opakovaná orba způsobuje fragmentaci jejich chodbiček a nor, které žížaly využívají nejen jako úkryt, ale také jako součást svého reprodukčního cyklu. Chemizace půdy pak další negativní efekt zesiluje díky toxickým látkám, které ovlivňují jejich fyziologii a potravní zdroje (Postma-Blaauw et al., 2012).

Globální meta-analýza, kterou provedli Briones & Schmidt v roce 2017 prokázala významný pozitivní dopad konzervačních přístupů na obnovu půdních ekosystémů. Bezorebný systém hospodaření vedl ke zvýšení početnosti žížal v průměru o 137 % a jejich biomasy o 196 % ve srovnání s konvenční orbou, zatímco konzervační zemědělství přineslo nárůst abundance o 127 % a biomasy o 101 %. Časový aspekt se ukázal jako rozhodující pro dosažení optimálních výsledků. Půdy obdělávané bezorebně déle než 10 let vykazovaly výrazně pozitivnější odezvu žížal než půdy s kratší historií konzervačního managementu, což odráží potřebu delšího časového období pro obnovu půdní struktury a mikrobiálních komunit. Půdní vlastnosti významně ovlivňují míru této obnovy. Půdy s jemnější strukturou a vyšším obsahem jílu nad 35 % reagovaly na bezorebné systémy pozitivněji než půdy s hrubší strukturou. Podobně půdy s nízkým pH pod 5,5 vykazovaly lepší odezvu na konzervační postupy než půdy s neutrálním nebo alkalickým pH. Mulčování se ukázalo jako významný podpůrný faktor, který zesiluje pozitivní efekty konzervačního zpracování. Organická hmota na povrchu půdy poskytuje žížalám nejen dodatečný zdroj potravy, ale také ochranu před vysycháním a podporuje rozvoj mikrobiálních komunit. Různé ekologické skupiny žížal vykazovaly odlišnou citlivost. Epigeické žížaly byly citlivé na mechanické narušení jejich povrchového stanoviště, ale ještě výraznější reakci projevily velké anecické žížaly, které vytváří vertikální chodbičky. Lumbricus terrestris vykázal nejpozitivnější reakci s nárůstem abundance o 124 % více než průměr všech druhů. Tento druh je považován za "ekosystémového inženýra" a "přírodní pluh", který mechanicky zpracovává půdu bez poškození, zlepšuje její strukturu a urychluje rozklad organické hmoty.

Studie Seibutis et al. (2025) realizovaná na kambisolech ve střední Litvě však přináší rozdílný výsledek. Populace žížal jako klíčového indikátoru zdraví půdy jsou překvapivě odolné vůči způsobu zpracování půdy. Nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi konvenční orbou a bezorebným systémem. Mnohem větší význam než intenzita zpracování půdy má diverzifikace osevních postupů. Zatímco rotační systémy udržují stabilní populace žížal kolem 127-131 jedinců na metr čtvereční, monokultura vykazuje výrazně nižší hodnoty pouze 105 jedinců na metr čtvereční.

Tyto výsledky naznačují, že pro udržení zdravých půdních ekosystémů je klíčová především pestrost pěstovaných plodin v čase, zatímco volba mezi konvenčním a bezorebným zpracováním má na půdní faunu menší dopad než se obecně předpokládá.

3.3. Hydrologické zásahy a meliorace

Hydrologické zásahy, jako je zejména odvodnění mokřadních luk, regulace toků a plošné meliorace výrazně snižují schopnost krajiny zadržovat vodu, urychlují odtok živin a vedou k vysychání biotopů. Tyto změny mají negativní dopady na celou řadu organismů a potravních sítí, přičemž jejich důsledky se projevují jak v krátkodobém, tak dlouhodobém měřítku (Černý et al., 2025).

Zemědělské louky se sezónním podmáčením představují klíčové biotopy pro četné druhy vodního ptactva, zejména chřástala polního (*Crex crex*). Studie Berga a Gustafssona (2007) provedená na dvou lokalitách ve středním Švédsku dokumentovala preference tohoto druhu v různě obhospodařovaných biotopech. Autoři analyzovali 73 teritorií chřástala polního během čtyřleté studie (1999-2002) na lokalitách Svartån (59 km²) a Fyrisån (4 km²) a zjistili významné preference pro určité typy obhospodařování luk. 58% chřástalů na loukách bylo nalezeno v neobhospodařovaných oblastech bez zemědělských dotací, tedy v oblastech s vysokou vegetací. Dále bylo zjištěno, že 62% chřástalů se vyskytovalo v obnovených oblastech, které byly obhospodařovány méně než 10 let z posledních 40 let, zatímco pouze 38% bylo nalezeno v oblastech s kontinuálním obhospodařováním.

Studie odhalila, že výška vegetace byla významně vyšší na lokalitách s chřástaly (průměrně 60 cm) než na náhodně vybraných lučních stanovištích (průměrně 33 cm). Výška vegetace se významně lišila mezi různými typy obhospodařování: pastviny měly průměrnou výšku 28,5 cm, sečené louky 59,4 cm a neobhospodařované louky 59,3 cm. Detailnější analýza na největší louce (Nötmyran, cca 400 ha) ukázala, že vysoká vegetace (>40 cm) se vyskytovala pouze v oblastech, které byly neobhospodařované alespoň polovinu z posledních 40 let (>20 let), zatímco oblasti obhospodařované většinu let měly nízkou vegetaci (25-35 cm). Luční parcely s výskytem chřástalů byly neobhospodařované průměrně 28,3 let, zatímco parcely bez chřástalů pouze 12,0 let. Studie dále identifikovala konflikt v ochraně přírody mezi druhy preferujícími vysokou vegetaci (jako chřástal polní, *Crex crex*) a druhy preferujícími krátkou vegetaci, jako je čejka chocholatá (*Vanellus vanellus*), břehouš černoocasý (*Limosa limosa*) či jespák bojovný (*Philomachus pugnax*), které vyžadují podstatně kratší vegetaci. Jako řešení autoři navrhují méně intenzivní obhospodařování, například sečení každý druhý rok nebo každých několik let, místo současných ročních režimů podporovaných dotacemi.

Detailní analýza Greena a Stoweho (1996) z východní Anglie přinesla další důležité poznatky o vlivu odvodňování na populace chřástala polního. Jejich dlouhodobé sledování zahrnující 89 lokalit po dobu 12 let ukázalo, že chřástal polní zcela vymizel z 78 % odvodněných luk, zatímco na kontrolních plochách s přirozeným vodním režimem zůstaly populace stabilní nebo dokonce mírně rostly. Studie také odhalila, že samice chřástala polního v odvodněných oblastech produkovaly průměrně o 1,4 vejce méně na snůšku a úspěšnost líhnutí klesla z 85 % na nemeliorovaných loukách na pouhých 34 % v odvodněných oblastech. Toto dramatické snížení reprodukčního úspěchu bylo způsobeno nejen ztrátou vhodných hnízdních biotopů, ale také poklesem dostupnosti potravy, protože odvodnění vedlo k úbytku bezobratlých živočichů, které tvoří základ potravy chřástala polního.

Pro hydrofilní rostliny znamenají zásahy do vodního režimu ztrátu vhodných stanovišť s dalekosáhlými důsledky pro celá rostlinná i živočišná společenstva. Ostřice (*Carex spp.*) patří mezi nejcitlivější indikátory změn vodního režimu v travních ekosystémech. Různé druhy ostřic vyžadují specifické hloubky podzemní vody – například ostřice štíhlá (*Carex gracilis*) potřebuje hladinu podzemní vody do 30 cm pod povrchem půdy, zatímco ostřice vyvýšená (*Carex elata*) toleruje pouze krátkodobé výkyvy hladiny. Meliorace způsobují trvalé snížení hladiny podzemní vody často o 50-80 cm, což vede k rychlému vymizení těchto druhů a jejich nahrazení méně hodnotnými travními druhy. Historická analýza mokřadních krajin České republiky odhaluje dramatické změny za posledních sedm století. Paleoekologická, ekologická, krajinně-archeologická a archivní data ukazují, že kombinace dlouhodobých procesů a jednotlivých událostí, včetně odvodnění, významně ovlivnila mokřadní ekosystémy (Szabó et al., 2017). Tato studie, využívající makrofosilní a pylová data dokládá, že environmentální změny můžeme chápat jako kombinovaný výsledek dlouhodobých trendů a jednotlivých významných událostí v minulosti. V současnosti jsou mokřady ohroženy nejen drenážními aktivitami, ale také zemědělskou konverzí a klimatickými změnami, což vytváří komplexní tlak na unikátní biodiverzitu těchto ekosystémů.

Sítiny (*Juncus spp.*) představují další skupinu rostlin výrazně postiženou hydrologickými zásahy. Tyto rostliny jsou přizpůsobeny k životu v periodicky zaplavovaných nebo trvale vlhkých půdách a fungují jako důležité strukturní prvky mokřadních ekosystémů. Jejich kořenové systémy pomáhají stabilizovat půdu a vytvářejí mikrohabitaty pro množství drobných bezobratlých. Dlouhodobé studie mokřadních krajin v České republice ukazují, že lidské zásahy, zejména meliorace od druhé poloviny 19. století, urychlily přirozené sukcesní procesy směřující k eutrofizaci, vysušování a uzavírání vegetačního krytu, což vede k postupné transformaci otevřených mokřadních ekosystémů na terestrické (Szabó et al., 2017).

Prstnatec májový (*Dactylorhiza majalis*) jako reprezentant mokřadních orchidejí je obzvláště zranitelný vůči změnám vodního režimu. Tato orchidej vyžaduje nejen specifickou vlhkost půdy, ale také symbiotický vztah s mykorhizními houbami, které jsou rovněž citlivé na změny půdní vlhkosti. Studie dokumentující vlivy meliorací na orchideje jsou sice omezené, ale dostupné údaje naznačují rychlé vymizení populací prstnatce májového z odvodněných lokalit, přičemž rekolonizace je velmi pomalá a často neúspěšná i po eventuálním obnovení příznivějších hydrologických podmínek (Wotavová et al., 2004).

Obecné vegetační analýzy z různých evropských regionů upozorňují na výrazné úbytky druhů citlivých na hladinu podzemní vody v meliorovaných oblastech. Tyto změny se neomezují pouze na mokřadní druhy, ale ovlivňují celá rostlinná společenstva. V meliorovaných oblastech dochází k homogenizaci vegetace a dominanci několika málo konkurenčně silných druhů, což vede ke snížení celkové biodiverzity ekosystému. Dlouhodobé důsledky hydrologických zásahů zahrnují také změny v půdních vlastnostech. Odvodnění urychluje rozklad organické hmoty v půdě, což vede k uvolňování oxidu uhličitého a snižování schopnosti půdy vázat uhlík. Současně dochází k rychlejšímu transportu živin z půdy do vodních toků, což může způsobovat eutrofizaci navazujících vodních ekosystémů a další narušování přírodních procesů v krajinném měřítku.

Meliorační úpravy realizované na území ČR od poloviny 20. století krom úbytku mokřadních biotopů také významně přispívají k prohlubování celkového sucha v krajině.

Rozsáhlé odvodnění zemědělských půd pomocí melioračních soustav představuje jednu z klíčových překážek bránících úspěšnému řešení problému sucha, neboť snižuje přirozenou retenční schopnost krajiny a urychluje odtok. Podle bioklimatologů z Ústavu výzkumu globální změny AV ČR se Česká republika potýká s nejhorším suchem za posledních 2110 let (což je časový rozsah dostupného dendrochronologického záznamu), přičemž zvláště období 2018-2019 představovalo bezprecedentní klimatickou situaci, která byla ještě zhoršena nevhodnou strukturou krajiny (Büntgen et al., 2021). Kombinace klimatických změn s historickým odvodněním krajiny prostřednictvím meliorací tak vytváří synergický efekt, který dramaticky zvyšuje zranitelnost českého území vůči suchu a ohrožuje dlouhodobou udržitelnost zemědělské produkce i stability ekosystémů.

3.4. Eutrofizace a trofické rozvrácení

Nadměrné hnojení a ztráty živin způsobují eutrofizaci půdy a vod, což má zásadní vliv na vegetační a faunistické složení zemědělských ekosystémů. Eutrofizace představuje jednu z nejvýznamnějších hrozeb pro biologickou rozmanitost travních porostů a přírodních biotopů v zemědělské krajině, přičemž její dopady jsou dokumentovány ve studiích z celé Evropy a dalších regionů světa. Excesivní přihnojování dusíkem vede k postupnému ústupu oligotrofních rostlinných druhů, které jsou přizpůsobeny chudým půdním podmínkám a citlivé na změny v živinové dostupnosti. Systematické analýzy potvrzují, že hnojení dusíkem způsobuje výrazné snížení druhového bohatství travních porostů, přičemž toto snížení je tím výraznější, čím nižší je intenzita seče. Francksen a kol. (2022) provedli rozsáhlou systematickou revizi a meta-analýzu studií zaměřených na vliv dusíkatého hnojení na druhové bohatství evropských trvalých travních porostů. Jejich analýza zahrnovala údaje z 58 experimentálních studií prováděných napříč různými evropskými regiony a klimatickými podmínkami. Výsledky prokázaly, že aplikace dusíkatých hnojiv vedla ve všech sledovaných případech k značnému poklesu druhového bohatství, přičemž účinek byl obzvláště výrazný v případě nízko intenzivně obhospodařovaných travních porostů, kde se pokles pohyboval v rozmezí 15-40 % původního druhového bohatství. Meta-analýza také odhalila, že negativní efekty dusíkatého hnojení se projevovaly nezávisle na typu půdy, nadmořské výšce nebo geografické poloze, což naznačuje univerzální charakter tohoto problému napříč evropskými travními ekosystémy.

Rozsáhlé evropské studie ukázaly, že po dvaceti letech intenzivního zemědělského managementu došlo k dramatickému poklesu druhového bohatství travních porostů až o 50 %, přičemž nejvíce postiženy byly druhy vázané na živinově chudé podmínky. Wesche a kol. (2012) realizovali jednu z nejkomplexnějších longitudinálních analýz změn severoněmecké travní vegetace za posledních 50 let, kdy porovnávali historická data z pěti nivních oblastí (a jedné chráněné referenční oblasti) z období 50. a 60. let 20. století s recentními snímky z roku 2008. Jejich výzkum odhalil dramatické změny v druhové kompozici rostlinných společenstev spojené se zvyšujícími se Ellenbergovými indikátorovými hodnotami pro dostupnost živin. Studie dokumentovala pokles druhového bohatství na úrovni ploch o 30-50 % během sledovaného období, přičemž ztráty funkční diverzity byly stejně rozsáhlé. Studie detailně analyzovala ztráty jednotlivých ekologických skupin rostlin a zjistila, že nejvíce postiženy byly druhy charakteristické pro oligotrofní podmínky, včetně mnoha druhů z čeledí vstavačovitých

(*Orchidaceae*), zvonkovitých (*Campanulaceae*) a hvozdíkovitých (*Caryophyllaceae*). Analýza také prokázala, že tempo úbytku druhů se dramaticky zrychlilo po roce 1990, což koreluje s intenzifikací zemědělských praktik a zvýšeným používáním dusíkatých hnojiv v období po politických změnách ve střední Evropě. Tyto změny se projevují zejména ztrátou typických druhů oligotrofních stanovišť, jako jsou různé druhy hořečků, šalvějí nebo zvonků, které jsou nahrazovány nitrofilními druhy. Studie kterou provedli Band a kol. (2022) využila statistické modelování k oddělení vlivů různých environmentálních faktorů, včetně dostupnosti dusíku, biomasy, rozměrnosti niky a dalších abiotických podmínek. Výsledky prokázaly, že zvýšená dostupnost dusíku byla dominantním prediktorem ztráty druhů, odpovídající za 23-35 % vysvětlené variance v modelech napříč různými travními typy. Studie založená na datech z 630 experimentů s přidáváním živin z 99 lokalit po celém světě testovala tři hlavní hypotézy vysvětlující úbytek druhů v rostlinných společenstvech při zvýšené dostupnosti půdních zdrojů.

Výzkum současně testoval:

- hypotézu konkurence řízené biomasou, která předpokládá, že vysoké úrovně půdních zdrojů zvyšují celkovou biomasu a tím intenzifikují konkurenční interakce.
- hypotézu rozměrnosti niky, podle které vysoké úrovně půdních zdrojů snižují potenciál pro rozložení nik založených na dustupnosti zdrojů.
- hypotézu škodlivosti dusíku, která navrhuje, že zvyšující se půdní dusík způsobuje stres změnou abiotických nebo biotických podmínek.

Výsledky poskytly silnou podporu pro hypotézu škodlivosti dusíku, slabší podporu pro hypotézu konkurence řízené biomasou a zanedbatelnou podporu pro hypotézu rozměrnosti niky. Studie dále ukázala, že nepřímý efekt dusíku prostřednictvím jeho vlivu na biomasu je menší ve srovnání s jeho přímým efektem a je mnohem větší než efekt všech ostatních zdrojů (fosfor, draslík a voda). Analýza prokázala, že mechanismy specifické pro dusík jsou důležitější než biomasa nebo rozměrnost niky (niche dimensionality) jako hnací síly ztráty druhů při vysokých úrovních půdních zdrojů. Dusík má tedy na úbytek druhové rozmanitosti v rostlinných společenstvech dominantní vliv, který nelze vysvětlit pouze zvýšenou konkurencí v důsledku vyšší biomasy nebo snížením počtu limitujících faktorů. Vliv dusíku na ztrátu druhů nebyl lineární, ale vykazoval prahovou hodnotu, nad kterou se ztráty dramaticky zrychlily. Tato prahová hodnota se pohybovala okolo 15-20 kg N/ha/rok, což odpovídá úrovni hnojení běžné v intenzivním zemědělství. Vysoké koncentrace dusíku v půdě a vodě podporují dominanci rychle rostoucích druhů, jako je kopřiva dvoudomá (*Urtica dioica*), bršlice kozí noha (*Aegopodium podagraria*) či různé druhy sveřepů (*Bromus spp.*) které svou konkurenční převahou vytlačují původní druhy přizpůsobené oligotrofním podmínkám. Band a kol. také detailně analyzovali mechanismy této konkurenční převahy a prokázali, že nitrofilní druhy vykazují vyšší relativní rychlost růstu, větší listy s vyšší specifickou listovou plochou a agresivnější kořenové systémy, které jim umožňují efektivněji využívat dostupný dusík a stínit konkurenční druhy. Tato změna rostlinných společenstev není pouze estetickým problémem, ale má zásadní dopady na celou strukturu a funkci ekosystémů.

Eutrofizace výrazně ovlivňuje také diverzitu a abundanci opylovačů, kteří jsou závislí na pestré květeně jako zdroji potravy. Nadprodukce biomasy způsobená vysokými vstupy dusíku vede k tvorbě hustého a uzavřeného vegetačního krytu, který potlačuje rozmanitost kvetoucích

rostlin. Tato homogenizace vegetace má za následek dramatické snížení potravních zdrojů pro včely, čmeláky, motýly a další opylovače. Dlouhodobé studie z střední Evropy dokumentují, že travní porosty postižené eutrofizací ztratily až 60 % druhů rostlin závislých na opylování zvířaty, což má kaskádovité efekty na celá společenstva opylovačů. Wesche a kol. (2012) provedli detailní analýzu změn v zastoupení různých funkčních skupin rostlin a zjistili zvláště alarmující trendy týkající se rostlin závislých na opylování hmyzem. Jejich data ukázala, že zatímco celkové druhové bohatství kleslo o 36 %, druhy závislé na opylování zvířaty zaznamenaly pokles o 58 %, což představuje téměř dvojnásobný úbytek ve srovnání s celkovým trendem. Analýza také odhalila, že nejrychleji ubývaly druhy s komplexními květy vyžadujícími specializované opylovače, zatímco druhy s jednoduchými květy nebo druhy opylované větrem vykazovaly menší poklesy. Studie dokumentovala, že změny ve spektru kvetoucích rostlin měly přímý dopad na sezónní dostupnost potravy pro opylovače, kdy došlo ke zkrácení období květu a snížení druhové diverzity květů dostupných v kritických obdobích roku, zejména na začátku a na konci vegetační sezóny.

Experimentální práce navíc ukázaly, že negativní efekty nadměrného přihnojování dusíkem na luštěniny se projevují globálně, zatímco pozitivní efekty fosforu a dalších živin tyto negativní dopady nedokáží zmírnit. Tognetti a kol. (2021) realizovali rozsáhlý globální experiment zahrnující data z 45 travnatých ekosystémů na šesti kontinentech, který se zaměřil specificky na odpovědi dusík-fixujících luštěninových rostlin na hnojení. Jejich studie představovala první globální experimentální ověření teoretických předpokladů o konkurenční výhodě rostlin fixujících atmosférický dusík v chudých půdách a ztrátě této výhody při zvyšující se dostupnosti dusíku. Výsledky prokázaly konzistentní negativní efekty dusíkatého hnojení na pokryvnost, druhové bohatství a biomasu luštěnin napříč všemi sledovanými travnatými ekosystémy, přičemž tyto efekty byly nejvýraznější v půdách chudých na dusík. Současně se pokryvnost rostlin nefixujících dusík zvyšovala. Studie potvrdila, že luštěniny ztrácejí svou konkurenční výhodu při zvýšené dostupnosti minerálního dusíku, kdy se energeticky nákladný proces fixace atmosférického dusíku nevyplácí. Přidávání fosforu, draslíku a dalších živin zvyšovalo abundanci luštěnin podporou jejich N-fixační kapacity, tyto pozitivní efekty nedokázaly kompenzovat negativní dopady dusíkatého hnojení. Zvyšující se dostupnost dusíku tak má potenciál snížit diverzitu a abundanci luštěnin celosvětově bez ohledu na dostupnost ostatních živin, což má závažné důsledky pro biodiverzitu, potravní sítě, odolnost ekosystémů.

Problém eutrofizace je dále komplikován skutečností, že její efekty se projevují nejen v aktuálně obhospodařovaných plochách, ale prostřednictvím depozice dusíku z atmosféry ovlivňují i vzdálené ekosystémy. Studium bryofytních společenstev v evropských lesích prokázalo, že atmosférická depozice dusíku způsobuje eutrofizaci i v těchto relativně nedotčených ekosystémech, což vede k nárůstu nitrofilních druhů na úkor druhů citlivých na dusík a ke snížení celkové vyrovnanosti společenstev. Weldon a kol. (2022) provedli studii zaměřenou na hodnocení vlivu atmosférické depozice dusíku na bryofytní společenstva v lesních ekosystémech střední a severní Evropy. Jejich studie využila bryofyty jako citlivé bioindikátory eutrofizace, neboť získávají živiny přímo z atmosféry a jsou proto obzvláště citlivé na změny v atmosférické depozici živin. Výsledky prokázaly silné korelace mezi úrovní atmosférické depozice dusíku a změnami ve složení bryofytních společenstev, přičemž lokality s vyšší depozicí vykazovaly významně nižší zastoupení oligotrofních druhů mechorostů a vyšší

abundanci nitrofilních druhů. Analýza také odhalila prahové hodnoty depozice, nad kterými se změny ve společenstvech dramaticky zrychlily. Kritická hodnota byla identifikována kolem 10-15 kg N/ha/rok, což odpovídá úrovním depozice běžným v hustě obydlených a intenzivně zemědělských oblastech Evropy. Studie dokumentovala, že efekty atmosférické depozice se projevovaly až do vzdálenosti více než 50 kilometrů od zdrojů emisí, což potvrzuje regionální až nadregionální charakter problému eutrofizace.

Z těchto příkladů vyplývá, že zemědělské metody a krajinné plánování nejsou izolované faktory, ale vytvářejí propojený celek, který ovlivňuje ekologickou integritu prostředí. Klíčové vztahy lze shrnout v tabulce následovně (TABULKA 2):

Tabulka 2: Přehled odpovědí indikátorových organismů na charakteristiky prostředí

Indikátorová skupina	Struktura krajiny	Chemické vstupy	Půdní zdraví	Eutrofizace	Historie hospodaření	Citlivost na management
Ptáci	✓	✓	△	△	✓	✓
Opylovači	✓	✓	△	✓	△	✓
Půdní fauna	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cévnaté rostliny	✓	✓	△	✓	✓	✓

Legenda: ✓ - Silná indikační citlivost, Přímý efekt; △ - Kontextuálně závislá citlivost, Nepřímý efekt.

4. Shrnutí a Porovnání

Srovnání dopadů konvenčního a ekologického zemědělství na biodiverzitu ukazuje konzistentní vzorce napříč různými indikátorovými skupinami, přičemž ekologické systémy pravidelně vykazují vyšší druhové bohatství a početnost organismů. Tuck a kol. (2014) prokázali, že ekologické zemědělství má významné pozitivní efekty na biodiverzitu ve srovnání s konvenčním zemědělstvím, přičemž tento efekt je obzvláště výrazný v krajinách s vysokou intenzitou využití půdy. Relativní přínos ekologického hospodaření je největší právě tam, kde je konvenční zemědělství nejintenzivnější a kde tedy biodiverzita čelí největšímu tlaku. Haddad a kol. (2015) zdůrazňují význam strukturální diverzity krajiny pro udržení biodiverzity. Ztráta krajinných prvků, jako jsou meze, remízky a mokřady, vede k fragmentaci biotopů s negativními dopady na všechny sledované indikátorové skupiny. Naopak, zachování a obnova těchto prvků přispívá k ekologické konektivitě a podporuje integritu populací na krajinné úrovni.

Co se týče ptactva, české studie dokumentují následující trendy – druhová bohatost ptáků je pozitivně ovlivněna přítomností krajinných struktur a nižší intenzitou vstupů, což jsou charakteristické rysy ekologického hospodaření. Šálek a kol. (2018) prokázali, že menší pole a přítomnost nezemědělských prvků v krajině výrazně zvyšují biodiverzitu v intenzivně obhospodařovaných zemědělských oblastech, což podporuje argumenty pro ekologické

přístupy, které tyto prvky častěji zachovávají. Krajinný kontext hraje klíčovou roli v míře rozdílů mezi systémy hospodaření. Hološková a Reif (2024) zdůrazňují negativní odpověd druhů preferujících otevřenou krajinu na stromové pásy, například na konipasa lučního (*Motacilla flava*), avšak také pozitivní efekt menší výměry polí. Zároveň poukazují na rozdíly v abundanci vysvětlené vegetační strukturou polí. De Camargo a kol. (2018) prokázali, že ptáci reagují na krajinné úrovni silně na celkovou plochu a tedy dostupnost habitatu, ale slabě na fragmentaci, což naznačuje důležitost celkové kvality krajinné matrice. Ekroos a kol. (2008) dokumentovali významnou roli ekologických i konvenčních polních mezí pro čmeláky a motýly, přičemž ekologické meze poskytovaly lepší podmínky. Varchola a kol. (2001) i Fournier a Loreau (1999) prokázali pozitivní vliv remízků a travnatých okrajů na aktivitu střevlíků v sousedních polních kulturách, což zdůrazňuje význam krajinných prvků pro celkovou biodiverzitu.

Opylovači těží zejména z absence nebo omezení pesticidů a z větší diverzity květnaté vegetace, což je kritické vzhledem k současné krizi opylovačů v Evropě. Evropské studie konzistentně ukazují, že ekologické farmy podporují až o 50 % více druhů opylovačů než farmy s intenzivním využíváním pesticidů. Wix a kol. (2019) dokumentovali, že druhové bohatství a abundace motýlů jsou významně vyšší na květnatých pásech a okrajích polí, které jsou častějším prvkem ekologických systémů. Cole a kol. (2017) prokázali pozitivní interakce mezi dostupností zdrojů a využíváním polopřírodních habitatů opylovači, což zdůrazňuje význam diverzifikované krajiny typické pro ekologické hospodaření.

Bezobratlí predátoři jsou další významnou ekologickou skupinou organismů schopných indikovat ekologické zdraví krajiny. Zejména střevlíci, jak již bylo řečeno, jsou pro účely bioindikace často využíváni. Jejich predační a semenožravá role je obzvláště v kontextu udržitelného zemědělství důležitá, neboť v takovémto systému se snažíme vyhýbat použití pesticidů a herbicidů. Jak zdůraznila Varchola a kol. (2001), že různé druhy střevlíků mají odlišné potravní preference a lovecké strategie, což přispívá k širšímu spektru biologické ochrany napříč různými typy škůdců. Heterogenní krajina a vhodné mikrohabitaty jsou pro jejich diverzitu a početnost klíčové. Okraje polí a meze jim slouží jako místa rozmnožování a přezimování, a zároveň jako refugia během orby, sklizně a aplikace pesticidů. Výzkum ukázal, že střevlíci jsou schopni rychle kolonizovat nově obdělávané plochy z těchto refugií, což zvyšuje jejich účinnost jako biologické kontroly škůdců na počátku vegetačního období. Jejich disperzní schopnosti střevlíků jsou ale omezené, což z nich dělá vhodné organismy pro studium hraniční dynamiky (French et al., 2001).

Půdní bezobratlí rovněž reagují na rozdíly v hospodaření rovněž velmi citlivě. Briones a Schmidt (2017) ve své globální meta-analýze prokázali, že konvenční orba významně snižuje abundanci a biomasu žížal a mění strukturu jejich společenstev. Intenzivní zemědělství obecně výrazně redukuje bohatství a komplexnost půdních potravních sítí, přičemž skupiny jako žížaly, chvostoskoci a roztoči vykazují nižší druhovou diverzitu i tělesnou velikost v intenzivně obhospodařovaných systémech. Ekologické hospodaření naproti tomu podporuje vyšší diverzitu půdních organismů díky omezenému používání syntetických pesticidů a hnojiv, lepší struktuře půdy a často také vyššímu obsahu organické hmoty. Jak naznačuje rozpor mezi meta-analýzou Brionese a Schmidta z roku 2017 a studie kterou provedli Seibutis a kol. 2025, bezorebné zemědělství obecně pomáhá biodiverzitě půdní fauny, avšak lokální faktory mohou znamenat,

že ne ve všech kontextech je tento efekt prokazatelný. Celkový trend, vyjádřený v meta-analýze naznačuje spojitost, avšak konkrétní případové studie mohou mít problém zreplikovat obecně prokázané výsledky. Diverzifikace zemědělské produkce bývá provázána s diverzitou půdní fauny, přičemž snížení orby dále redukuje půdní disturbanci (Briones & Schmidt, 2017). Dle mé úvahy bývají bezorebné systémy adoptovány farmáři, kteří se o podporu biodiverzity zasazují i jinými podpůrnými způsoby, jako je například redukce velikosti polí, mulčování a diverzifikace rostlinné produkce. Pro vyhodnocování takto komplexních systémů je separace jednotlivých faktorů a jejich přispění obtížná, či dokonce nežádoucí, neboť v komplexním systému jsou na sobě tyto faktory závislé. Půdní a epigeická fauna, reprezentovaná zejména žížalami, střevlíky (zmíněnými i v sekci o predátorech) a dalšími bezobratlými, vykazuje vyšší diverzitu v systémech s omezeným používáním agrochemikálií a lepší strukturou půdy (Varchola et al., 2001; Fournier a Loreau, 1999).

Rostlinná diverzita představuje další oblast, kde se diverzita podle systému hospodaření výrazně liší. Meta-analýza Hole a kol. (2005) ukázala, že ekologické systémy pravidelně vykazují vyšší druhové bohatství polních plevelů a lučních rostlin. Cévnaté rostliny, včetně polních plevelů a luční květeny, dosahují výrazně vyššího druhového bohatství na ekologických farmách díky absenci herbicidů a extenzivnějšímu managementu. Tato vyšší rostlinná diverzita má kaskádovité efekty na celé potravní sítě, poskytuje základ pro opylovače a vytváří vhodné prostředí pro další skupiny organismů. Rostlinná diverzita je snadno potlačena při vyšší intenzitě obhospodařování, například při častém sečení nebo přihnojování dusíkem, jak dokumentují Band a kol. (2022) nebo Francksen a kol. (2022), kteří prokázali negativní vliv dusíkatého hnojení na druhové bohatství trvalých travních porostů. Německá studie z roku 2007 (Gabriel & Tscharntke, 2007) analyzovala diverzitu bylinných druhů na 20 párech konvenčních a organických pšeničných polí ve třech zemědělských regionech. Výsledky ukázaly, že organická pole hostila celkem 85 druhů oproti 56 druhům na konvenčních polích, přičemž organické zemědělství významně podporovalo jak hmyzem opylované druhy (34 vs. 21 druhů), tak i druhy neopylované hmyzem (51 vs. 35 druhů). Studie prokázala, že organické zemědělské praktiky, které nepoužívají syntetická hnojiva a pesticidy, vytvářejí příznivější podmínky pro biodiverzitu rostlin i opylovačů.

Baležentiené (2011) provedla studii zaměřující se na studium indikátorových hodnot rostlinných druhů v reakci na prostorové gradienty environmentálních indexů v různých agrobiotopech Litvy. Všechny rostlinné druhy byly klasifikovány podle Ellenbergovy škály indikátorových hodnot pro střední Evropu (Ellenberg et al., 1992, Chytrý et al., 2018). Studie porovnávala šest různých agrobiotopů – pole a jejich okraje v intenzivním/konvenčním zemědělství a v ekologickém zemědělství. Analýza pomocí MCA odhalila vzorce vztahů mezi indikátorovými hodnotami druhů a environmentálními podmínkami. Nejvyšší variabilita byla pozorována u hodnot dusíku (N-hodnoty v rozmezí 2-9), což naznačuje širokou prostorovou disperzi depozice půdního dusíku v habitatech. Přítomnost rostlinných druhů se středními indikátorovými hodnotami (L5-L6 pro světlo, F4-F5 pro vlhkost, N5-N6 pro dusík, T4-T5 pro teplotu) ukazuje, že prostředí intenzivních zemědělských plodin je příznivé pro etablování mezofytů. Studie dále prokázala, že pole a okraje v ekologickém zemědělství vykazují širší environmentální gradient ve srovnání s intenzivním zemědělstvím, což zajišťuje vyšší

biodiverzitu v těchto agrobiototech. Výsledky tak potvrzují pozitivní vliv ekologického zemědělství na diverzitu rostlinných společenstev.

Obnova přirozeného vodního režimu mokřadů, podmáčených luk a říčních niv může přispět zmírnění eutrofizace vodních toků. Obnovení přirozených mokřadních funkcí přináší benefity v podobě biofiltrace a pufrování nečistot, a při té příležitosti zároveň vytváří habitat pro mizící mokřadní flóru i faunu, která je tudíž zároveň bioindikátorem této mokřadní funkce (Ferreira et al., 2023). Obnovení mokřadních biotopů a vodního režimu krajiny má samozřejmě pozitivní efekt na celkovou retenci vody a tím pomáhá zmírňovat vliv sucha (Ferreira et al., 2023), které je jedním z nejzávažnějších problémů české krajiny v posledních letech (Černý et al., 2025). Obnova mokřadů je důležitým bodem ilustrujícím fakt, že samotné ekologické zemědělství nemůže vyřešit všechny problémy krajinné biodiverzity a funkčnosti, a je potřeba koordinovat zemědělský, biologický a hydrologický aspekt managementu.

Časování zemědělských zásahů má rovněž významný dopad na efektivitu různých systémů. Green a Stowe (1996) i Berg a Gustafson (2008) dokumentovali, že časování zemědělských zásahů, zejména sekání, má zásadní vliv na přežívání citlivých druhů jako je chřástal polní (*Crex crex*). Ekologické systémy často umožňují flexibilnější časování managementu, což může být výhodné pro mnohé druhy. Charalambous a kol. (2024) prokázali, že temporální variabilita v kvalitě habitatu významně ovlivňuje distribuci a abundanci vodních ptáků na krajinné úrovni, což má své implikace i pro hospodaření v zemědělské krajině. Van Buskirk & Willi (2005) varují, že ekologické zemědělství na trvalých travních porostech nemusí automaticky znamenat vyšší biodiverzitu, pokud chybí prostorová heterogenita a časová variabilita managementu.

5. Závěr

5.1. Shrnutí hlavních zjištění

Zjištění této práce podporují argumenty pro rozšíření ekologického zemědělství jako nástroje ochrany biodiverzity, současně však upozorňují na nutnost komplexního přístupu zahrnujícího krajinné plánování a cílená opatření pro jednotlivé skupiny organismů. Ekologické zemědělství má pozitivní vliv na biodiverzitu napříč různými taxonomickými skupinami, přičemž největší relativní přínos je zaznamenán v intenzivně obhospodařovaných krajinách, kde ekologické farmy fungují jako refugia. Indikátorové organismy se ukazují jako účinný nástroj pro monitoring a hodnocení efektivity zemědělských systémů – umožňují kvantifikovat dopady hospodaření, identifikovat priority ochrany a přispívají k evidence-based rozhodování v oblasti zemědělské a environmentální politiky.

5.2. Srovnání indikátorových skupin

Jednotlivé skupiny bioindikátorů vykazují specifické charakteristiky pro hodnocení různých aspektů zemědělských systémů. Ptáci jsou dobře známí a metodicky zvládnutí, vhodní pro sledování změn v krajině, ale ovlivněni i faktory mimo zemědělství. Opylovači se ukazují jako velmi citliví na chemické vstupy a květnatost, jsou klíčoví pro ekosystémové služby, avšak

sezónně proměnliví. Predátoři škůdců odráží stav ekosystémových služeb souvisejících s predací a integritu potravního řetězce. Půdní fauna představuje výborný indikátor půdního zdraví a dlouhodobého managementu, je však náročnější na odběr a analýzu. Cévnaté rostliny odrážejí historický management a úroveň eutrofizace a jsou vhodné pro hodnocení dlouhodobých trendů. Společenstva bezcévných rostlin a lišejníků slouží jako indikátor atmosférické eutrofizace, neboť jsou závislá na přísunu živin ze vzduchu. Mikrobiální indikátory mohou prozradit detailní informace o půdních charakteristikách, avšak vyžadují laboratorní analýzu a jsou hůře aplikovatelné přímo v terénu.

Mnohé jednotlivé praktiky ekologického zemědělství prospívají více než jednomu indikátorovému organismu, a tím i ekologickým charakteristikám které tyto organismy indikují. Kombinace více skupin indikátorů současně zvyšuje reprezentativnost a robustnost hodnocení, neboť každá skupina reaguje na jiné aspekty prostředí. Opatření jako jsou například stromové pásy mohou benefitovat některým skupinám více než jiným, je tedy nutné znát specifické ekologické potřeby každého organismu (Hološková & Reif, 2024).

Klíčovým zjištěním této práce je skutečnost, že samotný přechod na ekologické zemědělství, ačkoli velmi prospěšný, je pouze jednou z částí maximalizace ekologických benefitů. Nejvyšších hodnot biodiverzity je dosahováno kombinací ekologického hospodaření na samotných zemědělských plochách s opatřeními ekologické správy krajiny jako celku (Tscharntke et al., 2021). Tím se rozumí například zachování a obnova krajinných prvků, hydrologických funkcí, extenzifikace managementu citlivých biotopů a koordinace opatření na krajinné úrovni.

5.3. Doporučení a výhled

Pro výzkum je důležité rozšířit spektrum sledovaných skupin o další taxonomické skupiny, standardizovat metodiky a podporovat dlouhodobý monitoring. Pro praxi je třeba využívat více skupin bioindikátorů současně a přizpůsobit výběr indikátorů typu krajiny a cíli hodnocení.

Pochopení interakce člověka se zbytkem biosféry je klíčové, neboť na lidské činnosti, zejména na konkrétním charakteru této lidské činnosti, je diverzita kulturní krajiny odnepaměti závislá. Plánování land-use musí být informováno biologickými, hydrologickými i abiotickými faktory, s důrazem na pochopení přírodních procesů a upuštění od snahy člověka vnutit přirozeným procesům svou vůli, jak tomu bylo zvykem v mentalitě 20. století. Nejedná se zde o zavržení lidského vlivu na krajinu, jako tomu je u bezzásahových zón v národních parcích, ale o lidskou činnost citlivě promyšlenou, dbající na své důsledky a naslouchající okolnímu živoucímu světu a jeho odpovědím na naše zásahy. Bioindikace by neměla být pouhým nástrojem hodnocení, ale zároveň informovat rozhodovací procesy v ochraně přírody a udržitelném zemědělství. Do budoucna je důležité důsledně monitorovat výskyt indikátorových organismů a analyzovat interakce mezi různými faktory ovlivňujícími biodiverzitu v zemědělské krajině. Rovněž je však důležité dbát i na to, aby tento výzkum spatřil skutečné uplatnění v zemědělské praxi. Monitorovat biodiverzitu ve 21. století znamená také odsouzení k tomu být svědkem jejího šestého masového vymírání. Mějme tedy odvahu využít naší akademickou i občanskou svobodu a naše vědomosti ke snaze odvrátit nejhorší scénáře této skutečnosti.

6. Reference

Citace v ČSN ISO 690 - alfabeticky seřazené

ANDRADE, D., F. PASINI, and F. R. SCARANO. Syntropy and innovation in agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2020, 45, 20-24. ISSN 1877-3435.

BAND, N., R. KADMON, M. MANDEL, and N. DEMALACH. Assessing the roles of nitrogen, biomass, and niche dimensionality as drivers of species loss in grassland communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(10), e2112010119. ISSN 0027-8424.

BALEŽENTIENĖ, L. Species indicator values response to spatial environmental variation in differently managed agro-habitats. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2011, 39(2), 39-48. DOI: 10.15835/nbha3926305.

BALMFORD, A., R. E. GREEN, and J. P. W. SCHARLEMANN. Sparing land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. *Global Change Biology*, 2005, 11(10), 1594-1605. ISSN 1354-1013. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001035.x.

BAR-ON, Y. M., R. PHILLIPS, and R. MILO. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(25), 6506-6511. ISSN 0027-8424.

BASELGA, A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(1), 134-143.

BEHAN-PELLETIER, V. M. Oribatid mite biodiversity in agroecosystems: role for bioindication. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, 74(1-3), 411-423.

BENGTSSON, J., J. AHNSTRÖM, and A. C. WEIBULL. The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2), 261-269. ISSN 0021-8901.

BENTON, T. G., J. A. VICKERY, and J. D. WILSON. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(4), 182-188.

BERG, Å. and T. GUSTAFSON. Meadow management and occurrence of Corncrake (*Crex crex*). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 120, 139-144.

BIGNAL, E. M.; McCRACKEN, D. I. Low-Intensity Farming Systems in the Conservation of the Countryside. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33, 3, 413-424. ISSN 0021-8901

BLÜTHGEN, N., C. F. DORMANN, D. PRATI, V. H. KLAUS, T. KLEINEBECKER, N. HÖLZEL, F. ALT, S. BOCH, S. GOCKEL, A. HEMP, J. MÜLLER, J. NIESCHULZE, S. C. RENNER, I. SCHÖNING, U. SCHUMACHER, S. A. SOCHER, K. WELLS, K. BIRKHOFER, F. BUSCOT, Y. OELMANN, C. ROTHENWÖHRER, C. SCHERBER, T. TSCHARNTKE, C. N. WEINER, M. FISCHER, E. K. V. KALKO, K. E. LINSENMAIR, E.-D. SCHULZE a W. W. WEISSER. A quantitative index of land-use intensity in grasslands: Integrating mowing, grazing and fertilization. Basic and Applied Ecology. 2012, 13(3), 207-220. ISSN 1439-1791.

BRIONES, M. J. I. and O. SCHMIDT. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*, 2017, 23(10), 4396-4419. ISSN 1365-2486. DOI: 10.1111/gcb.13744.

BÜNTGEN, U., O. URBAN, M. RYBNÍČEK, T. KOLÁŘ, A. AČ, J. ČÁSLAVSKÝ, J. ESPER, P. DOBROVOLNÝ, and M. TRNKA. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, 2021, 14(3), 190-196. ISSN 1752-0908.

CARRIÉ, R., J. EKROOS a H. G. SMITH. Turnover and nestedness drive plant diversity benefits of organic farming from local to landscape scales. Ecological Applications. 2022, 32(4), e2576. ISSN 1051-0761. https://doi.org/10.1002/eap.2576

CHARALAMBOUS, C., P. MUSIL, M. LEGOGUELIN, Z. MUSILOVÁ, and D. HOŘÁK. Temporal variation in habitat quality shapes the distribution–abundance relationship in waterbirds at landscape scale. *Ecosphere*, 2024, 15(12), e70088.

CHOWDHURY, S., V. K. DUBEY, S. CHOUDHURY, A. DAS, D. JEENGAR, B. SUJATHA, A. KUMAR, N. KUMAR, A. SEMWAL, and V. KUMAR. Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11, 1146052. ISSN 2296-665X.

CHYTRÝ, M. Vegetation of the Czech Republic: diversity, ecology, history, and dynamics. *Preslia*, 2009, 81, 1-187.

CHYTRÝ, M., L. TICHÝ, P. DŘEVOJAN, J. SÁDLO, and D. ZELENÝ. Ellenberg-type indicator values for the Czech flora. *Preslia*, 2018, 90, 83-103. ISSN 0032-7786. DOI: 10.23855/preslia.2018.083.

COLE, L. J., S. BROCKLEHURST, D. ROBERTSON, W. HARRISON, and D. I. McCRACKEN. Exploring the interactions between resource availability and the utilisation of semi-natural habitats by insect pollinators in an intensive agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246, 157-167. ISSN 0167-8809.

ČERNÝ, J., P. FUČÍK, and A. ZAJÍČEK. Land Drainage Interventions for Climate Change Adaptation: An Overlooked Phenomenon—A Conceptual Case Study from Northern Bohemia, Czech Republic. *Land*, 2025, 14(4), 782.

DAINESE, M., G. SCHNEIDER, J. KRAUSS, and I. STEFFAN-DEWENTER. Complementarity among natural enemies enhances pest suppression. *Scientific Reports*, 2017, 7(1), 8172. ISSN 2045-2322.

DE CAMARGO, R. X., V. BOUCHER-LALONDE a D. J. CURRIE. At the landscape level, birds respond strongly to habitat amount but weakly to fragmentation. Diversity and Distributions. 2018, 24(5), 629-639. ISSN 1366-9516. https://doi.org/10.1111/ddi.12706

EISEN, M. B. and P. O. BROWN. Rapid global phaseout of animal agriculture has the potential to stabilize greenhouse gas levels for 30 years and offset 68 percent of CO2 emissions this century. *PLOS Climate*, 2022, 1(2), e0000010. ISSN 2767-3200.

EKROOS, J., M. PIHA, and J. TIAINEN. Role of organic and conventional field boundaries on boreal bumblebees and butterflies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 124(3-4), 155-159. ISSN 0167-8809.

ELLENBERG, H., H. E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH, W. WERNER, and D. PAULISSEN. *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*. 2nd ed. Göttingen: Goltze, 1992. Scripta Geobotanica, vol. 18. ISBN 978-3-88452-518-0.

FANTA, V., J. BENEŠ, J. ZOUHAR, et al. Ecological and historical factors behind the spatial structure of the historical field patterns in the Czech Republic. *Scientific Reports*, 2022, 12(1), 8645. ISSN 2045-2322.

FERREIRA, C. S. S., M. KAŠANIN-GRUBIN, M. KAPOVIĆ SOLOMUN, S. SUSHKOVA, T. MINKINA, W. ZHAO, and Z. KALANTARI. Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2023, 33, 100476. ISSN 2468-5844.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Evaluating the potential contribution of organic agriculture to sustainability goals: FAO's technical contribution to IFOAM's Scientific Conference Mar del Plata, Argentina, 16-19 November 1998*. Rome: FAO, 1998.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*. Rome: FAO, 2019. 572 p. ISBN 978-92-5-131270-4.

FOURNIER, E. and M. LOREAU. Effects of newly planted hedges on ground-beetle diversity (Coleoptera, Carabidae) in an agricultural landscape. *Ecography*, 2006, 22(1), 87-97. ISSN 0906-7590.

FRANCKSEN, R. M., S. TURNBULL, C. M. RHYMER, M. HIRON, C. BUFE, V. H. KLAUS, P. NEWELL-PRICE, G. STEWART, and M. J. WHITTINGHAM. The Effects of Nitrogen Fertilisation on Plant Species Richness in European Permanent Grasslands: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Agronomy*, 2022, 12(12), 2928. DOI: 10.3390/agronomy12122928.

FRENCH, B. W., N. C. ELLIOTT, R. C. BERBERET, and J. D. BURD. Effects of Riparian and Grassland Habitats on Ground Beetle (Coleoptera: Carabidae) Assemblages in Adjacent Wheat Fields. *Environmental Entomology*, 2001, 30(2), 225-234. DOI: 10.1603/0046-225X-30.2.225.

GABRIEL, D. and T. TSCHARNTKE. Insect pollinated plants benefit from organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1-4), 43-48. ISSN 0167-8809. DOI: 10.1016/j.agee.2006.04.005.

GALLOWAY, A. D., C. L. SEYMOUR, R. GAIGHER, and J. S. PRYKE. Organic farming promotes arthropod predators, but this depends on neighbouring patches of natural vegetation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 310, 107295. ISSN 0167-8809.

GEISER, L. H., P. R. NELSON, S. E. JOVAN, H. T. ROOT a C. M. CLARK. Assessing Ecological Risks from Atmospheric Deposition of Nitrogen and Sulfur to US Forests Using Epiphytic Macrolichens. Diversity. 2019, 11(6), 87. ISSN 1424-2818.

GREEN, R. E. and T. J. STOWE. The Decline of the Corncrake *Crex crex* in Britain and Ireland in Relation to Habitat Change. *Journal of Applied Ecology*, 1993, 30, 689-695.

HADDAD, N. M., L. A. BRUDVIG, J. CLOBERT, K. F. DAVIES, A. GONZALEZ, R. D. HOLT, T. E. LOVEJOY, J. O. SEXTON, M. P. AUSTIN, C. D. COLLINS, W. M. COOK, E. I. DAMSCHEN, R. M. EWERS, B. L. FOSTER, C. N. JENKINS, A. J. KING, W. F. LAURANCE, D. J. LEVEY, C. R. MARGULES, B. A. MELBOURNE, A. O. NICHOLLS, J. L. ORROCK, D.-X. SONG, and J. R. TOWNSHEND. Habitat

fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. Science Advances, 2015, 1(2), e1500052. DOI: 10.1126/sciadv.1500052.

HOLE, D. G., A. J. PERKINS, J. D. WILSON, I. H. ALEXANDER, P. V. GRICE a A. D. EVANS. Does organic farming benefit biodiversity? Biological Conservation. 2005, 122(1), 113-130. ISSN 0006-3207. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.07.018

HOLOŠKOVÁ, A. and J. REIF. Factors shaping insectivorous farmland bird abundance in intensively cultivated arable fields: Insights through the former Iron Curtain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 359, 108750. ISSN 0167-8809. DOI: 10.1016/j.agee.2023.108750.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES. *Summary for Policymakers of the IPBES Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES, 2019. 56 p. ISBN 978-3-947851-13-3.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 2009, 76(1), 1-10. ISSN 0167-4366.

KEHINDE, T. O. and M. J. SAMWAYS. Endemic pollinator response to organic vs. conventional farming and landscape context in the Cape Floristic Region biodiversity hotspot. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1), 162-167. ISSN 0167-8809.

KEVAN, P. G. Pollinators as bioindicators of the state of the environment: species, activity and diversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, 74(1-3), 373-393. ISSN 0167-8809.

KRAUSS, J., I. GALLENBERGER, and I. STEFFAN-DEWENTER. Decreased Functional Diversity and Biological Pest Control in Conventional Compared to Organic Crop Fields. *PLOS ONE*, 2011, 6(5), 1-9.

KRAUSS, J., R. BOMMARCO, M. GUARDIOLA, R. K. HEIKKINEN, A. HELM, M. KUUSSAARI, R. LINDBORG, E. ÖCKINGER, M. PÄRTEL, J. PINO, J. PÖYRY, K. M. RAATIKAINEN, A. SANG, C. STEFANESCU, T. TEDER, M. ZOBEL, and I. STEFFAN-DEWENTER. Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecology Letters*, 2010, 13(5), 597-605. ISSN 1461-023X. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2010.01457.x.

KREMEN, C. Reframing the Land-Sparing/Land-Sharing Debate for Biodiversity Conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2015, 1355, 52-76. DOI: 10.1111/nyas.12845.

LEAKEY, R. R. B. Definition of Agroforestry Revisited. 2017, 5-6. ISBN 978-0-12-805356-0.

LORI, M., S. SYMNACZIK, P. MÄDER, G. DE DEYN, and A. GATTINGER. Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLoS ONE*, 2017, 12(7), e0180442. ISSN 1932-6203.

MA, F., C. WANG, Y. ZHANG, J. CHEN, R. XIE, and Z. SUN. Development of Microbial Indicators in Ecological Systems. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(21), 13888. ISSN 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph192113888.

MAMABOLO, E., J. S. PRYKE, and R. GAIGHER. Soil macrofauna are important bioindicators of soil quality in agroecosystems under different management. *Ecological Indicators*, 2024, 167, 112723. ISSN 1470-160X.

MERUNKOVÁ, K., Z. PREISLEROVÁ, and M. CHYTRÝ. White Carpathian grasslands: can local ecological factors explain their extraordinary species richness? *Preslia*, 2012, 84(2), 311-325. ISSN 0032-7786.

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČR. *Ročenka 2023: Ekologické zemědělství v České republice*. Prague: MZČR, 2023.

MOLLISON, B. *Permaculture: A Practical Guide for a Sustainable Future*. Washington: Island Press, 1990. ISBN 1-55963-099-6.

PENG, J., T. BALEŽENTIS, D. STREIMIKIENE, V. DABKIENE, and G. P. AGNUSDEI. Circular economy in agriculture: A systematic literature review. *Sustainable Development*, 2025. ISSN 0968-0802. DOI: 10.1002/sd.70017.

PHALAN, B., M. ONIAL, A. BALMFORD, and R. E. GREEN. Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science*, 2011, 333(6047), 1289-1291. DOI: 10.1126/science.1208742.

PIEVANI, T. The sixth mass extinction: Anthropocene and the human impact on biodiversity. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2014, 25, 85-93. ISSN 2037-4631. DOI: 10.1007/s12210-013-0258-9.

POSTMA-BLAAUW, M. B., R. G. M. DE GOEDE, J. BLOEM, J. H. FABER a L. BRUSSAARD. Agricultural intensification and de-intensification differentially affect taxonomic diversity of predatory mites, earthworms, enchytraeids, nematodes and bacteria. Applied Soil Ecology. 2012, 57, 39-49. ISSN 0929-1393. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.02.011

POTTS, S., J. BIESMEIJER, R. BOMMARCO, T. BREEZE, L. CARVALHEIRO, M. FRANZÉN, J. P. GONZÁLEZ-VARO, A. HOLZSCHUH, D. KLEIJN, A. KLEIN, W. KUNIN, T. LECOCQ, O. LUNDIN, D. MICHEZ, P. NEUMANN, A. NIETO, L. PENEV, P. RASMONT, O. RATAMÄKI, and O. SCHWEIGER. *Status and trends of European pollinators: Key findings of the STEP project*. 2015.

PRACH, K., K. ŘEHOUNKOVÁ, K. LENCOVÁ, A. JÍROVÁ, P. KONVALINKOVÁ, O. MUDRÁK, V. ŠTUDENT, Z. VANĚČEK, L. TICHÝ, P. PETŘÍK, P. ŠMILAUER a P. PYŠEK. Vegetation succession in restoration of disturbed sites in Central Europe: the direction of succession and species richness across 19 seres. Applied Vegetation Science. 2014, 17(2), 193-200. ISSN 1402-2001. https://doi.org/10.1111/avsc.12064

RADKOWSKA, I. and A. RADKOWSKI. Regenerative grazing as an element that shapes grassland ecosystem services. *Roczniki Naukowe Zootechniki*, 2023, 50(2), 167-178. DOI: 10.58146/008h-qp61.

REIF, J., D. STORCH, P. VOŘÍŠEK, K. ŠŤASTNÝ a V. BEJČEK. Bird-habitat associations predict population trends in central European forest and farmland birds. Biodiversity and Conservation. 2008, 17(13), 3307-3319.

REIF, J., A. GAMERO, A. HOLOŠKOVÁ, A. AUNINS, T. CHODKIEWICZ, I. HRISTOV, P. KURLAVIČIUS, M. LEIVITS, T. SZÉP a P. VOŘÍŠEK. Accelerated farmland bird population declines in European countries after their recent EU accession. Science of The Total Environment. 2024, 946, 174281.

RODALE, R. Breaking new ground: the search for a sustainable agriculture. *The Futurist*, 1983, 17(1), 15-20. ISSN 0016-3317.

ROLEČEK, J., P. HÁJKOVÁ, M. HÁJEK, M. HORSÁK, K. FAJMON, M. POLÁK, and E. JAMRICHOVÁ. Prehistoric origin of the extremely species-rich semi-dry grasslands in the Bílé Karpaty Mts (Czech Republic and Slovakia). *Preslia*, 2011, 83, 185-204. ISSN 0032-7786.

SÁNCHEZ-BAYO, F. and K. A. G. WYCKHUYS. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 2019, 232, 8-27.

SCIALABBA, N. E. H. and C. HATTAM, eds. *Organic agriculture, environment and food security*. Rome: FAO, 2002. Environment and Natural Resources Series, No. 4. ISBN 92-5-104761-8.

SCHREEFEL, L., R. P. O. SCHULTE, I. J. M. DE BOER, A. P. SCHRIJVER, and L. VAN ZANTEN. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 2020, 26, 100404. ISSN 2211-9124.

SEIBUTIS, V., K. TAMOŠIŪNAS, I. DEVEIKYTĖ, G. KADŽIENĖ a R. SEMAŠKIENĖ. Earthworm Population Response to Simplified Tillage and Shortened Crop Rotations in a Central Lithuanian Cambisol: A Five-Year Study. Agriculture. 2025, 15(4), 366.

SIDEMO-HOLM, W., R. CARRIÉ, J. EKROOS, S. A. M. LINDSTRÖM, and H. G. SMITH. Reduced crop density increases floral resources to pollinators without affecting crop yield in organic and conventional fields. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58, 1421-1430. DOI: 10.1111/1365-2664.13887.

SIDEMO-HOLM, W., J. EKROOS, and H. G. SMITH. Land sharing versus land sparing—What outcomes are compared between which land uses? *Conservation Science and Practice*, 2021. DOI: 10.1111/csp2.530. ISSN 2578-4854.

SZABÓ, P., A. GÁLOVÁ, E. JAMRICHOVÁ, K. ŠUMBEROVÁ, J. ŠIPOŠ a R. HÉDL. Trends and events through seven centuries: the history of a wetland landscape in the Czech Republic. Regional Environmental Change. 2017, 17(2), 501-514.

ŠÁLEK, M., V. HULA, M. KIPSON, R. DAŇKOVÁ, J. NIEDOBOVÁ a A. GAMERO. Bringing diversity back to agriculture: Smaller fields and non-crop elements enhance biodiversity in intensively managed arable farmlands. Ecological Indicators. 2018, 90, 65-73. ISSN 1470-160X.

TOGNETTI, P. M., S. M. PROBER, S. BÁEZ, E. J. CHANETON, J. FIRN, A. C. RISCH, M. SCHUETZ, A. K. SIMONSEN, L. YAHDJIAN, E. T. BORER, E. W. SEABLOOM, C. A. ARNILLAS, J. D. BAKKER, C. S. BROWN, M. W. CADOTTE, M. C. CALDEIRA, P. DALEO, J. M. DWYER, P. A. FAY, and M. SANKARAN. Negative effects of nitrogen override positive effects of phosphorus on grassland legumes worldwide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(28), e2023718118. ISSN 1091-6490.

TORRALBA, M., N. FAGERHOLM, P. J. BURGESS, G. MORENO, and T. PLIENINGER. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 230, 150-161. ISSN 0167-8809.

TSCHARNTKE, T., I. GRASS, T. C. WANGER, C. WESTPHAL, and P. BATÁRY. Beyond organic farming – harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021, 36(10), 919-930. ISSN 0169-5347.

TUCK, S. L., C. WINQVIST, F. MOTA, J. AHNSTRÖM, L. A. TURNBULL a J. BENGTSSON. Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. Journal of Applied Ecology. 2014, 51(3), 746-755.

TURBÉ, A., A. DE TONI, P. BENITO, P. LAVELLE, P. LAVELLE, N. RUIZ, W. H. VAN DER PUTTEN, E. LABOUZE, and S. MUDGAL. *Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers*. Heteren: NIOO, 2010. 250 p.

VAN BUSKIRK, J. and Y. WILLI. Enhancement of farmland biodiversity within set-aside land. *Conservation Biology*, 2004, 18(4), 987-994. ISSN 0888-8892.

VARCHOLA, J. M. and J. P. DUNN. Influence of hedgerow and grassy field borders on ground beetle (Coleoptera: Carabidae) activity in fields of corn. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 83(1-2), 153-163. ISSN 0167-8809.

VOŘÍŠEK, P., F. JIGUET, A. VAN STRIEN, J. ŠKORPILOVÁ, A. KLVANOVA, and R. GREGORY. Trends in abundance and biomass of widespread European farmland birds: how much have we lost. *BOU Proceedings – Lowland Farmland Birds III*, 2010.

WALKER, E., R. WOOLIVER, L. RUSSO, and S. JAGADAMMA. The context-dependent benefits of organic farming on pollinator biodiversity: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2024. DOI: 10.1111/1365-2664.14826.

WELDON, J., J. MERDER, M. FERRETTI a U. GRANDIN. Nitrogen deposition causes eutrophication in bryophyte communities in central and northern European forests. Annals of Forest Science. 2022, 79, 24.

WESCHE, K., B. KRAUSE, H. CULMSEE a C. LEUSCHNER. Fifty years of change in Central European grassland vegetation: Large losses in species richness and animal-pollinated plants. Biological Conservation. 2012, 150(1), 76-85.

WIX, N., M. REICH, and F. SCHAARSCHMIDT. Butterfly richness and abundance in flower strips and field margins: the role of local habitat quality and landscape context. *Heliyon*, 2019, 5(5), e01647. ISSN 2405-8440.

WOTAVOVÁ, K., J. BALOUN, and P. KINDLMANN. Factors affecting persistence of terrestrial orchids in wet meadows and implications for their conservation in a changing agricultural landscape. *Biological Conservation*, 2004, 118(3), 271-279.

YIN, R., P. KARDOL, M. P. THAKUR, I. GRUSS, G.-L. WU, N. EISENHAUER, and M. SCHÄDLER. Soil functional biodiversity and biological quality under threat: Intensive land use outweighs climate change. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147, 107847. ISSN 0038-0717.