

SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu

WP C2 Klíčové půdní vlastnosti a procesy

WA C2.1 Půdní biodiverzita

Návrh systému monitoringu půdní bioty

SS02030018-V49

Frouz J.¹, Frouzová J.¹, Bartuška M.¹

¹Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta

2024

Návrh systému monitoringu půdní bioty

SS02030018-V49

Ostatní výsledky

Manažerské shrnutí

Tento dokument přináší návrh možného monitoringu biologických vlastností půd v České republice. V suchozemských ekosystémech se větší část celkové biodiverzity nachází pod zemí (tedy v půdě), než v nadzemních částech ekosystémů. Půdní organismy jsou zodpovědné za celou řadu procesů umožňujících fungování ekosystému, ale i zemědělskou produkci. Dlouhodobý monitoring biologických vlastností půd nám pomůže odhalit, jak půdní biota reaguje na dlouhodobé změny ekosystému vyvolané globálním a dlouhodobým působením nejvýraznějších hybatelů změn v životním prostředí, jako jsou například globální změny klimatu, změny v užívání krajiny, velké biogeochemické změny, nebo masivní invaze nepůvodních druhů. Tyto změny lze v krajinném měřítku jen obtížně popsat pomocí výsledků běžných vědeckých výzkumů. Současný systém financování vědy totiž podporuje soustředění se na otázky, které umožňují dosažení publikovatelných výsledků v krátkém časovém horizontu (3 až 5 let), a takto získané výsledky jsou jen v omezené míře použitelné pro posuzování malých, ale dlouhodobých, změn, které navíc působí na velkých prostorových škálách. Přesto však pochopení procesů, které ovlivňují tyto globální změny životního prostředí, je klíčové pro celou řadu politických a správních rozhodnutí a ve svém důsledku ovlivňuje kvalitu našeho života. I z toho důvodu řada evropských zemí biologickou složku půd dlouhodobě monitoruje.

Na základě studia literatury a monitorovacích schémat půdní bioty aplikovaných v jiných evropských zemích doporučujeme, aby byl tento dlouhodobý monitoring založen na sledování širšího spektra klíčových skupin půdních organismů. Je to důležité, protože půdní organismy jsou neobyčejně heterogenní skupinou organismů různých velikostí a ekologických strategií, které různým způsobem přispívají ke klíčovým půdním procesům a ty ve svém důsledku umožňují růst rostlin, fungování ekosystému a zemědělskou či lesní produkci. Zároveň tyto organismy různým způsobem reagují na klíčové environmentální faktory a stresory, kterým je dnešní životní prostředí vystaveno. Na základě těchto rozvah jsme

navrhli soubor minimálních a optimálních parametrů půdně-biologického monitoringu. V minimálním provedení navrhujeme zahrnout: abundanci a diverzitu žířal, abundanci chvostoskoků a půdních roztočů, mikrobiální respiraci a mikrobiální biomasu. V optimální variantě pak navrhujeme tyto parametry doplnit o studium celkové makrofauny, společenstva hlístic, potenciální nitrifikace a diverzity společenstev hub a bakterií.

Monitoring by měl zahrnovat všechny hlavní typy ekosystémů – nejen produkční ekosystém zemědělské krajiny (pole, louky, pastviny), ale i lesní a nelesní přírodní ekosystémy. Pakliže by monitoring měl zahrnout tyto hlavní typy ekosystému tak, aby byly reprezentativně plošně a výškově rozprostřeny po území České republiky, předpokládáme, že minimální počet vzorkovacích míst by měl být 120.

Bylo by velmi výhodné, kdyby monitoring mohl navázat na existující data a podobná, byť pouze částečná, monitorovací schémata. Provedli jsme proto rozsáhlou rešerši stávajícího půdního biologického výzkumu v České republice zahrnujícího jak studium půdních mikroorganismů, tak studium půdní fauny. Přestože se nám podařilo najít velké množství dílčích studií, našli jsme pouze dva výzkumné programy, které měly charakter dlouhodobého monitoringu blížícího se výše uvedeným požadavkům. Takovým monitorovacím schématem je monitoring vybraných zemědělských půd prováděný Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (ÚKZÚZ). Ten od 90. let minulého století sleduje 57 ploch z pohledu klíčových mikrobiálních parametrů, které mimo jiné obsahují všechny parametry doporučené ve výše uvedené minimální sadě parametrů předpokládaného monitoringu. Druhým takovým schématem je rozsáhlé vzorkování půdní fauny prováděné Ústavem půdní biologie a biogeochemie Biologického centra AV ČR, v. v. i. (ÚPBB), které zahrnuje více jak 70 ploch vzorkovaných v 90. letech minulého století a následně minimálně jednou převzorkovaných. Soubor těchto ploch byl poté vzorkován víceméně pravidelně a pro řadu z těchto ploch jsou navíc k dispozici historická data o doporučovaných mikrobiálních parametrech navrhovaného monitoringu. Pro budoucí monitoring tedy navrhujeme spojení dlouhodobě sledovaných ploch a expertiz ÚKZÚZ a ÚPBB. Toto řešení by umožňovalo zajištění smysluplného biologického monitoringu půd na stanovištích, pro které jsou k dispozici dlouhodobá data. To by umožňovalo okamžité využití dosažených dat pro posouzení

dlouhodobých trendů, na které bychom jinak museli čekat několik desetiletí. Zároveň se toto řešení zdá být organizačně jednoduché a finančně nejméně nákladné.

Úvod

Proč máme monitorovat životní prostředí

Nejprve několik slov o monitoringu životního prostředí obecně. Monitoring nám říká, zda jsme na správné cestě. Primární výhodou monitorování životního prostředí je ujištění se, zda politiky, plány regulace a postupy užívání zdrojů vedou k očekávanému environmentálnímu výsledku. Poskytuje informace pro pochopení aktuálního stavu životního prostředí a posouzení, zda se situace zlepšuje nebo zhoršuje. To umožňuje lépe formulovat nejrůznější politiky a regulace a dává to podklady pro jejich lepší komunikaci ostatním stakeholderům. Je třeba si uvědomit, že systém dlouhodobého monitoringu nemůže být nahrazen například výsledky vědeckého výzkumu, protože v současnosti je většina vědeckého výzkumu financována z grantových prostředků různých poskytovatelů. Ti se soustředí na to, aby v relativně krátkém čase dosáhli demonstrovatelných výsledků, a to nutně vede vědecké týmy k tomu, aby se zaměřovaly na sběr dat v menších časoprostorových škálách, kde je možno dosáhnout relevantních výsledků v relativně krátkém čase – typicky za 3-5 let. Tento výzkum tak není koncipován pro sledování důsledků plošně rozsáhlých pomalých změn, jako jsou globální změna klimatu, velkoplošné změny v užívání krajiny, dlouhodobé velkoplošné či globální změny biogeochemických cyklů (například v důsledku změn užívání krajiny nebo aplikace průmyslových hnojiv, spalování fosilních paliv či invazí nepůvodních druhů). Přitom tyto dlouhodobé a pomalu působící změny mohou vést k významným změnám v ekosystémech a v životním prostředí. Jsou však pozorovatelné spíše v měřítku dekad než jednotlivých let. Extrapolace výsledků získaných na omezených plochách v krátkém čase na větší časoprostorová měřítka se často opírá o modelování s využitím dlouhodobého monitoringu parametrů, které dlouhodobě plošně sledujeme (například počasí a klima) a shrnutí výsledků mnoha různých studií, které však byly původně určeny ke studiu různých jiných otázek a každá tak použila poněkud jinou metodologii. Přitom ale extrapolace z pokusů a sledování prováděných na malých časoprostorových škálách na větší měřítka není zcela jednoduchá a jednoznačná. Zároveň se ukazuje, že tyto sice pomalé ale dlouhodobě působící globální změny významným způsobem

interferují s lidskými ekonomickými aktivitami a ovlivňují kvalitu života občanů, a proto se nutně stávají i předmětem politického diskursu a následně pak i výkonu státní správy. Z tohoto pohledu může komplexnější monitoring všech klíčových složek životního prostředí významně přispět k fakticky podloženému politickému rozhodování (evidence based policy) a může i zkvalitnit výkon státní správy v oblastech, které se životního prostředí dotýkají, zejména při přípravě strategických dokumentů.

Hlavní v literatuře často zmiňované výhody monitoringu jsou:

- 1) může včas varovat před problémy, než se stanou vážnými, nákladnými nebo nevratnými
- 2) vybízí organizace k přizpůsobení se, když monitorování ukáže, že současné přístupy nefungují, a pomáhá nám připravit se efektivně reagovat na jakékoli změny
- 3) poskytuje lepší pochopení klíčových tlaků na životní prostředí a stav životního prostředí, což vede k lepším reakcím a výsledkům
- 4) poskytuje informace umožňující robustnější a obhajitelnější politiky a rozhodnutí, zvyšuje účinnost politik a plánovaných opatření, což mimo jiné může vést k větší věrohodnosti a menším nákladům
- 5) poskytuje informace o efektivitě a účelnosti procesů používaných orgány místní samosprávy při výkonu působnosti
- 6) chrání investice do plánů a politických prohlášení tím, že vede k lepší formulaci politik a metod pro implementaci politik (včetně pravidel) a jasnějším cílům
- 7) umožňuje efektivnější účast na řízení zdrojů, komunitním rozvoji a vzdělávání

Při monitoringu životního prostředí často sledujeme některé parametry, o kterých víme, že mají vztah k lidskému zdraví, anebo kauzální vztah k jiným environmentálním parametrům. Příkladem může být monitorování ovzduší, kde sledujeme výskyt některých frakcí aerosolu, případně monitoring vybraných polutantů. Výhodou sledování těchto parametrů je to, že zpravidla známe mechanismus jejich působení na cílové organismy, včetně člověka, a můžeme taky jejich výsledky relativně snadno interpretovat. Nevýhodou je, že můžeme podchytit pouze takové hrozby, o nichž dopředu víme. Jinou kategorií monitoringu je sledování stavu některých obecných parametrů životního prostředí, u nichž očekáváme, že nějakým klíčovým způsobem souvisí s fungováním systému. V tomto případě nám monitoring poskytuje informaci o tom, že se v

životním prostředí něco děje, například ekosystémy reagují na klimatickou změnu. Situace je zde tedy opačná než u předchozí kategorie. Pozorované změny nemají dopředu dané a zcela jednoznačné vysvětlení. Naopak nás upozorní na to, že se něco děje a příčiny této změny musíme dál hledat. Nicméně velkou výhodou oproti předchozí kategorii je, že takovýto nespécifický monitoring nás může upozornit i na změny v chování systému, které jsme předem neočekávali. Příkladem takového nespécifického monitoringu je řada monitorovacích schémat sledujících změny v pokryvnosti ekosystémů (habitatů), v rámci mapování Natura 2000.

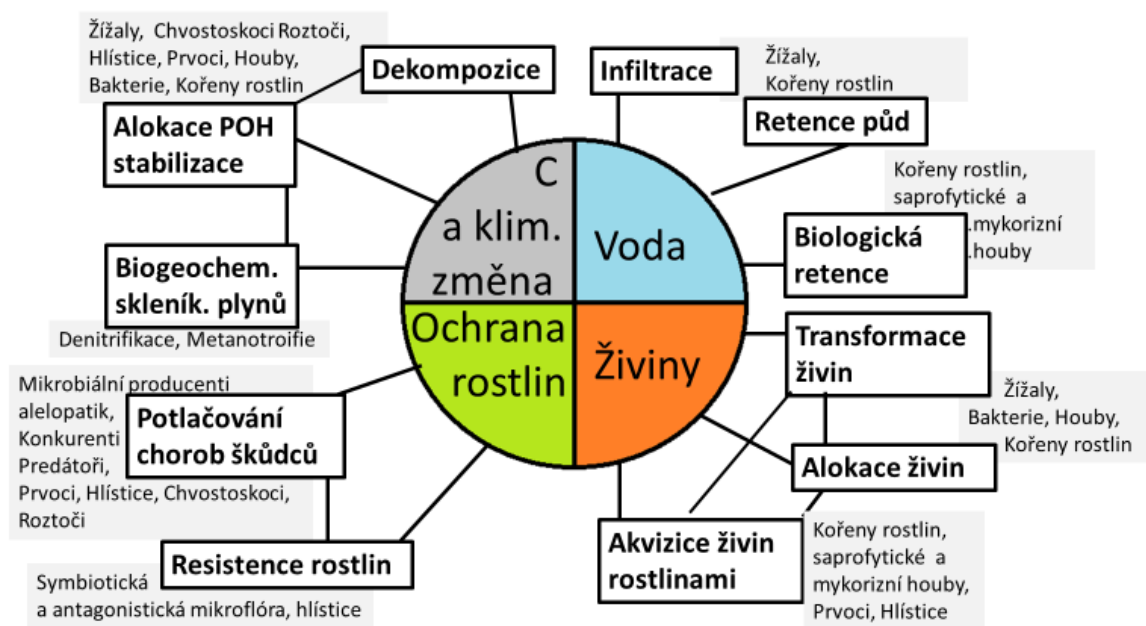
Proč monitorovat půdní organismy a půdně-biologické procesy

Co se týče monitoringu půd, provádí řada státních agentur (VÚMOP, ÚHÚL, ÚKZÚZ) u nás poměrně obsáhlý monitoring abiotické složky půd. V poslední době se dokonce objevují snahy v harmonizaci těchto monitorovacích schémat, které jistě zesílí v souvislosti s připravovanou směrnicí Evropské unie o monitoringu půd. Monitoring biotické složky půd je oproti monitorování abiotického půdního prostředí značně pozadu.

Půdní organismy a biologické půdní procesy jsou klíčové pro fungování terestrických ekosystémů (Hooper a kol., 2000; Bardgett a van der Putten, 2014). V přirozených ekosystémech je tvorba a udržování půdy, koloběh uhlíku, uvolňování živin a tím i růst rostlin do značné míry závislý na činnosti půdních organismů. Půdní organismy ovlivňují také vodní bilanci, vztah rostlin a jejich patogenů či herbivorů a jsou významným zdrojem potravy pro vyšší trofické úrovně. V přirozených ekosystémech se více jak polovina primární produkce nakonec dostane do půdy, kde je zpracována půdními organismy. Půdní organismy jsou tedy zcela nezastupitelné ve fungování ekosystémů a jejich činnost má řadu dopadů na různých úrovních – od růstu jednotlivých rostlin (van Groenigen a kol., 2014) a jejich vzájemných vztahů ve společenstvu (De Deyn a Van der Putten, 2005) přes tvorbu půd až po globální koloběh uhlíku a regulaci globálního klimatu (Bardgett a van der

Putten, 2014; Creamer a kol., 2022) (Obr. 1). Přitom půda hostí značnou část terestrické biodiverzity - více než nadzemní části ekosystémů. Chování půdní biodiverzity se do značné míry řídí jinými klíčovými mechanismy a velká nadzemní diverzita nemusí znamenat velkou diverzitu podzemní a naopak (Cameron a kol., 2021). Půdní organismy nejsou jen významnými hybateli klíčových funkcí půdy, ale jsou i citlivými indikátory stavu půd (Cameron a kol., 2021) reagujícími na širokou plejádu půdních vlastností.

V agroekosystémech jsme celou řadu funkcí půdní bioty potlačili a nahradili ji agrotechnickými opatřeními. Ale i tam je činnost půdních organismů významná pro řadu klíčových procesů (Le Provost a kol., 2021) z nichž níže uvádíme několik kaleidoskopických příkladů. Většina dusíku v půdě, i té zemědělské, je uložena ve formě půdní organické hmoty. Činností mikroorganismů se tento uhlík postupně zpřístupňuje a může být využit rostlinami. Celkově se toto uvolněné množství pohybuje okolo 50-100 kg.ha⁻¹.rok⁻¹, a je tedy řádově srovnatelné s množstvím dodaným průmyslovými hnojivy (Frouz a Frouzová, 2022). Podobně je to i v přirozených ekosystémech, kde je přibližně polovina opadu konzumována půdní faunou a významná část tohoto uhlíku je zapracována do půdy (Heděnc a kol., 2022). V agroekosystémech jsou posklizňové zbytky zpravidla zapracovány do půdy kultivací. Nicméně bioturbace půdní faunou, zejména žížalami, podporuje oproti orbě významnější hromadění minerálně asociované organické hmoty a tím i celkové hromadění půdní organické hmoty (Frouz a kol., 2014). Množství a diverzita půdních mikroorganismů úzce koreluje se schopností půd potlačovat patogenní mikroorganismy a snižovat incidenci chorob rostlin (Leon a kol., 2006, van Agtmaal a kol., 2018). A tak bychom mohli pokračovat. Není proto překvapivé, že snížení diverzity půdního společenstva v důsledku intenzifikace zemědělské produkce (Tsiafouli a kol., 2015) vede k horšímu poskytování celé řady ekosystémových funkcí včetně těch souvisejících s výnosem, náklady na jeho dosažení a jeho stabilitou (De Vries a kol., 2013).



Obrázek 1. Klíčové půdní procesy odpovědné za cyklus uhlíku a klimatickou změnu, zásobu vody v půdě, zásobení rostlin živinami a obranu rostlin proti patogenům, parazitům a herbivorům. Podle Creamer a kol. (2022) zjednodušeno a upraveno.

Jaké půdní organismy a procesy jsou vhodné pro monitoring stavu půdy v ČR

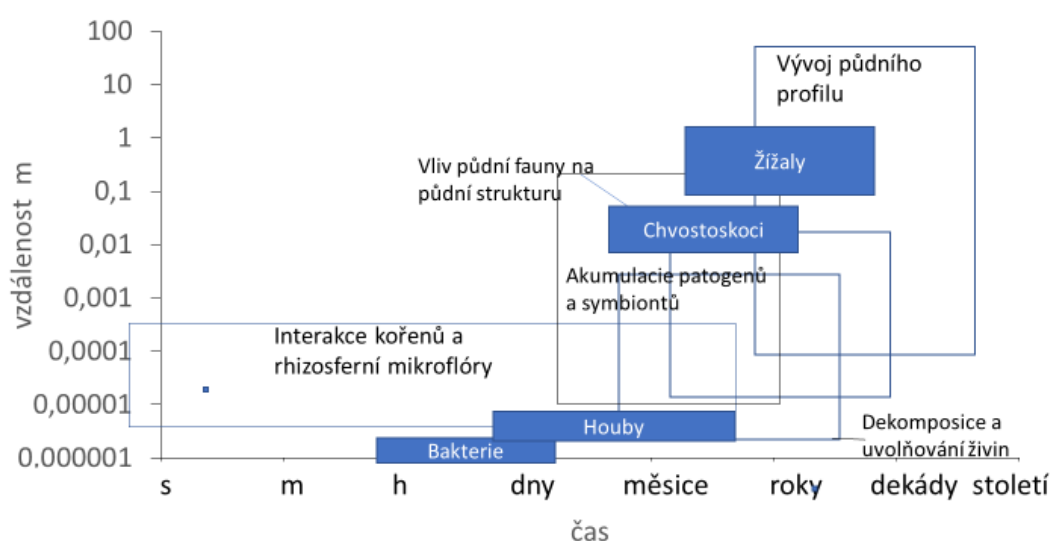
Půda hostí velkou část diverzity terestrických ekosystémů (Cameron a kol., 2021) a půdní společenstva jsou nesmírně bohatá nejen, co se týče počtu druhů, ale též co se týče počtu jedinců (Tabulka 1). Za zmínku stojí i biomasa půdních organismů. Součtem hlavních skupin v Tabulce 1 se dostaneme na průměrnou biomasu necelé 4 t.ha⁻¹, ale v optimálních podmínkách může být tato biomasa několikanásobně vyšší. Nicméně i výše uvedená průměrná biomasa je minimálně o řád vyšší než například biomasa herbivorů, které může půda na stejné ploše uživit. Půdní organismy jsou navíc velmi různých velikostí. Přitom organismy různých velikostí vykonávají různé funkce, ale také různě reagují na podmínky prostředí (Tabulka 2). Půdní mikroflóra má průměr těla od jedné do několika desítek tisícín mm a díky své enzymatické aktivitě je dominantní hnací silou transformace organické hmoty v půdě a většiny klíčových biogeochemických procesů. Řada zástupců půdní mikroflóry jsou symbionty či patogeny rostlin. Půdní mikroflóra může být významně konzumována řadou zástupců půdní mikrofauny, jako jsou prvoci či hlístice. Tato činnost jednak reguluje mikrobiální procesy a může se významně podílet například na mineralizaci živin. I mikrofauna má průměr těla pod 0,2 mm a může tak žít v půdních pórech trvale nasycených vodou.

Mikroflóra i mikrofauna tak ve své podstatě představují vodní organismy, na rozdíl od větších půdních organismů žijících v půdních pórech zpravidla vyplněných půdním vzduchem. Půdní mesofauna (organismy od 0,2 do 2 mm) je významným konzumentem půdních hub. Půdní makrofauna (organismy nad 2 mm) si často buduje chodby, významně se podílí na fragmentaci opadu, tvorbě půdních agregátů a formování struktury půdy (Obr. 1). Navíc dominantní skupiny půdních organismů se významně liší mezi různými ekosystémy. Například v ekosystémech dominovaných rychle rostoucími rostlinami produkujícími snadno rozložitelný opad bývají hodně zastoupeny žížaly, je zde významné promíchávání půdy, mikrobiální procesy jsou dominovány bakteriemi. Naproti tomu v půdách pod porosty konzervativních, pomalu rostoucích rostlin je mikrobiální společenstvo dominované houbami s výrazným výskytem půdní mesofauny jako jsou chvostoskoci či roztoči (Frouz, 2018).

Vzhledem k výše popsané diverzitě půdních organismů je tedy obtížné sledovat všechny půdní organismy najednou a je třeba rozhodnout, jakou skupinu (skupiny) organismů monitorovat jako vhodné reprezentanty půdní bioty. To je důležité i z praktických důvodů, protože vzhledem k výše popsané diverzitě půdních organismů je často potřeba použít specializované techniky pro studium jednotlivých skupin. Existuje řada prací, které se pokouší využít jedné skupiny organismů

k monitorování určitého procesu nebo stavu vybraných ekosystémů. Mezi těmito postupy dominuje řada prací používajících složení společenstev půdní mikroflóry celkové biomasy nebo vybraných mikrobiálních procesů jako je mikrobiální respirace, nitrifikace či aktivita jednotlivých enzymů (Alkorta a kol., 2003; Finkenbein a kol., 2013; Sobucki a kol., 2021; Djemiel a kol., 2023; Onwosi a kol., 2020; Anzalone a kol., 2020; Kaur a kol., 2005; Han a kol., 2014; Horrigue a kol., 2016; Wolejko a kol., 2020; Lors a kol., 2010; Shen a kol., 2016; Li a kol., 2024; Kiledal a kol., 2021; Wessen a Halin, 2011). Využití mikroorganismů pro monitoring je velmi perspektivní vzhledem k jejich klíčové roli v biogeochemických procesech a veliké diverzitě. Zejména pak mikrobiální diverzita má do budoucna velký potenciál vzhledem k masivnímu rozvoji sekvenovacích metod (Next Generation Sequencing), které umožňují najednou charakterizovat prakticky celé mikrobiální společenstvo. Z půdní fauny jsou bioindikačně nejčastěji používány žížaly (Calisi a kol., 2014; Khalil a kol., 2015; Chao a kol., 2020; Parri a kol., 2024; Fang a kol., 1999; Hattab a kol., 2023; Latif a kol., 2011; Suthar a kol., 2008; Peres a kol., 2011; Calisi a kol., 2013; Calisi a kol., 2011; Panzarino a kol., 2016; Zhou a kol., 2016; Owagboriaye a kol., 2020; Ning a kol., 2018), a to zejména díky jejich klíčové roli v řadě půdních procesů. Jsou i studie využívající ostatní skupiny půdní makrofauny (Groffen a kol., 2019; Aziz a kol., 2020; Ghannem a kol., 2016; Chowdhury a kol., 2023; Plattau Arenhardt a kol., 2021; Farkas a kol., 1996; Sakchoowong a kol., 2008; de Lima a kol., 2021; Freitas a kol., 2024; VanStraalen a Verhoef, 1997; Sharafatmandrad a kol., 2021; Cabrero-Sanudo a kol., 2022; Hoffmann, 2010; Hoffmann a James, 2011; Hansson a kol., 2019; Gavish-Regev a kol., 2022) mezi nimiž jsou často užíváni mravenci (Hoffmann, 2010; Hoffmann a James, 2011) a pavouci (Hansson a kol., 2019; Gavish-Regev a kol., 2022). Řada studií využívá půdní mesofaunu, zejména pak chvostokoky a roztoče (Geissen a kol., 2004; Pedro a kol., 2023; Badejo a kol., 2002; Gulvik, 2007; Caruso a kol., 2007; Meehan a kol., 2019; Gospodarek a kol., 2020; O'Neill a kol., 2010). Další hojně používanou skupinou jsou hlístice (Bongers a Ferris, 1999; Porazinska a kol., 1999; Porazinska a kol., 1998; Song a kol., 2022; Fiscus a Neher, 2002). Je tomu tak proto, že hlístice zauímají řadu různých posic v potravní síti. Některé půdní druhy jsou významnými konzumenty bakterií, hub, půdních řas či prvoků, další jsou herbivory a parazity rostlin. Jejich ještě většímu využití v bioindikačních studiích brání pracnost jejich studia. Méně rozšířené jsou bioindikační studie s použitím půdních prvoků, kteří

jsou sice také velmi variabilní, ale hůře se studují (Zhao a kol., 2012; Zheng a kol., 2024; Fournier a kol., 2022). Většina těchto studií sleduje odpověď dané skupiny půdní bioty na nějakém jasně definovaném gradientu degradace, znečištění či obnovy ekosystému. Na komplexnějších mnohazměrných gradientech bývá často aplikováno studium většího množství různých skupin půdních organismů zahrnující různé skupiny půdní fauny i mikroorganismů (Fusaro a kol., 2018; Althoff a kol., 2009; Ashwood a kol., 2023). Využití většího množství různých skupin organismů má řadu výhod: umožňuje lépe pokrýt hlavní funkční skupiny půdní bioty, co se týče jejich vlivu na klíčové půdní procesy, postavení v potravní síti i velikosti. Využití různých skupin dává větší jistotu, že ve sledovaných vzorcích budou vždy některé skupiny organismů zastoupeny – při studiu jen jedné skupiny se může stát, že se za určitou hranici environmentálních podmínek nebude vyskytovat a používáme-li jen jednu skupinu, lze jen těžko o takových vzorcích říci něco více, než že daná skupina chybí. Využití organismů různé velikosti je klíčové, protože různé velké organismy reagují na jiné aspekty půdního prostředí a díky různé populační dynamice a velikosti životního prostoru, který využívají, integrují půdní vlastnosti na různé časoprostorové škále (Obr. 2). Populace půdní fauny integrují díky své velikosti a pohyblivosti půdní podmínky v širším okolí. Epigeické skupiny přitom zabírají větší plochu, ale sledují spíše podmínky na povrchu půdy; v půdě žijící skupiny pak charakterizují lépe půdní podmínky v užším okolí odběru. Naproti tomu řada funkčních mikrobiálních procesů se v přírodě mění v řádu hodin. To se často obchází tím, že se dané parametry měří v laboratoři při optimálních podmínkách jako potenciál, kterého daná půda může v optimálních podmínkách dosáhnout. Naproti tomu studium složení mikrobiálního společenstva pomocí DNA nám ukazuje na celkové mikrobiální společenstvo, ale jeho značná část může být neaktivní. Nevýhodou využívání většího množství sledovaných skupin je větší technická náročnost takové studie, kdy je třeba často odebrat více různých vzorků a ty zpracovat různými technikami. Je to dáno tím, že různá velikost organismů vede i k různé variabilitě jejich prostorového rozmístění a to vyžaduje odběr různého množství různě velkých vzorků, často odebíraných způsobem specifickým pro každou skupinu. To vyžaduje spolupráci většího množství odborníků, což je náročnější než studie na jedné skupině, kterou může jeden odborník provést sám.



Obrázek 2. Délka životního cyklu a prostorový rozsah životních aktivit vybraných zástupců půdních organismů a přibližný časoprostorový rozsah vybraných půdně-biologických procesů podle Frouz 2024 upraveno

Jaké skupiny půdních organismů a procesů tedy zahrnout. Obecně se většina prací na toto téma shoduje na tom, že je třeba podchytit hlavní aspekty jak struktury, tak funkce půdního společenstva. Přitom je třeba sledovat organismy různé velikosti – ideálně faunu i mikroflóru. Pro studium společenstva mikroflóry máme k dispozici řadu technik, které nám dávají dobrý kvalitativní popis společenstva, ale nikoli kvantifikaci, zatímco jiné postupy naopak dobře charakterizují velikost společenstva, ale ne jeho složení. Tyto kvalitativní a kvantitativní přístupy je dobré kombinovat. Dalšími aspekty při volbě vhodných skupin a parametrů jsou otázky technické. Je praktičtější zvolit skupiny nebo

procesy, jejichž studium je technicky jednodušší a méně nákladné. Je také výhodou, můžeme-li více skupin sledovat stejnými postupy, ze stejných vzorků atp. Konečně je s výhodou zaměřit se na skupiny a procesy, které jsou široce studovány, což umožní porovnání výsledků s podobnými studiemi v jiných místech a časech. Co se týče porovnání v čase, je důležitý i vývoj resp. změna používaných technik. V současné době zažíváme prudký vývoj molekulárních technik v mikrobiální ekologii. To otevírá zcela nové možnosti, na druhou stranu to znamená, že historická data získaná dnes již překonanými technikami jsou v zásadě s dnešními výsledky neporovnatelná.

Tabulka 1. Průměrné hodnoty abundance a biomasy hlavních skupin půdní bioty

Skupina	Jedinců ind.m ⁻²	Biomasa g.m ⁻²
Mikroflóra		
Bakterie	10 ¹⁴	100,00
Aktinomycety	10 ¹³	100,00
Houby	10 ¹¹	100,00
Řasy	10 ⁸	20,00
Mikrofauna (<0,2 mm)		
Prvoci bičíkovci	10 ⁸	
Prvoci měňavky	10 ⁷	5,00
Prvoci nálevníci	10 ⁶	

Vířníci	10	0,01
Hlístice	10 ⁶	5,00
Želvušky	1 000	0,01
Mesofauna (0,2-2 mm)		
Roztoči	70 000	0,60
Chvostokoci	50 000	0,50
Roupice	30 000	5,00
Makrofauna (>2 mm)		
Žížaly	100	30,00
Měkkýši	50	1,00
Pavoukovci	50	0,20
Korýši - Stejnonožci	30	0,40
Mnohonožky	100	4,00
Stonožky	30	0,40
Brouci	100	1,50
Dvoukřídlí	500	1,00
Ostatní hmyz	150	1,00

Tabulka 2. Hlavní funkce různých velikostních skupin půdních organismů

Velikostní skupina	Podíl na dekompozici	Podíl na tvorbě půdní struktury
Mikroflóra	Velmi variabilní enzymatická výbava – katalyzují prakticky všechny významné chemické reakce v půdě	Polysacharidové obaly buněk a odumřelá biomasa zpevňují půdní agregáty, vláknité organismy mohou stmelovat větší agregáty
Mikrofauna	Predace půdní mikroflóry	
Mesofauna	Konzumace opadu, predace mikroflóry	Drobná bioturbace a produkce drobných exkrementů
Makrofauna	Význam vlastní metabolické aktivity je malý, ale významně regulují aktivitu mikroflóry změnou prostředí	Tvorba půdních agregátů, budování chodeb

Tabulka 3 udává přehled doporučených skupin půdních organismů a půdně-biologických procesů tak, jak je různí autoři navrhovali pro národní nebo mezinárodní monitorovací schémata. Je patrné, že nejvíce doporučovaným parametrem je studium žížal. To patrně vychází z významné role žížal v řadě půdních procesů (Obr. 1). Žížaly se také hojně vyskytují v doposud realizovaných schématech národních monitoringů půdní bioty uskutečněných jednotlivými evropskými státy (Tabulka 4). Druhou nejvíce doporučovanou skupinou jsou hlístice, které, jak již bylo řečeno, mají velký potenciál identifikovat strukturu půdní potravní sítě. Nicméně studium hlístic vyžaduje separátní vzorky a je relativně pracné. To je příčinou toho, proč se hlístice méně často objevují v provedených schématech národních monitoringů evropských zemí (Tabulka 4). Dalšími skupinami, které jsou doporučovány shodně ve čtyřech případech z šesti, jsou skupiny půdní mezofauny, zejména pak chvostokoci, roztoči a mikrobiální biomasa. Tyto parametry se také proporcionálně objevují v provedených národních monitorinzích. Posledně jmenovaná mikrobiální biomasa se v provedených schématech národních monitoringů objevuje hodně často. Je však třeba vidět, že jiné techniky, jako je substrátem indukovaná respirace (SIR), případně analýza membránových fosfolipidů (PLFA), také přinášejí porovnatelnou informaci o velikosti mikrobiální biomasy. Dalším relativně často měřeným parametrem je mikrobiální respirace. Mikrobiální respirace se v doposud prováděných systémech monitoringu příliš často nevyskytuje. Je tomu proto, že se jedná o parametr silně korelující s dostupností uhlíku v půdě a bez dalších souvztažností, jako je právě zásoba uhlíku, informace o jeho dostupnosti, či mikrobiální biomasa, je poměrně obtížně interpretovatelný. Na druhou stranu je to parametr relativně snadno stanovitelný zejména v kombinaci se stanovením

mikrobiální biomasy je nárůst pracnosti zanedbatelný a kombinace sledování respirace a biomasy již poskytuje zajímavé interpretace o aktivitě mikrobiální biomasy. Dalším parametrem, který se vyskytuje v navrhovaných doporučených parametrech, je mikrobiální biomasa. Ta se vyskytuje i v provedených schématech národních monitoringů. Jak již bylo však řečeno, metodické postupy použité u těchto monitoringů jsou dnes již zastaralé a těžko srovnatelné se současnými modernějšími postupy. Nicméně vzhledem k zvyšující se dostupnosti a klesající ceně moderních sekvenčních metod by určitě sekvenování společenstva hub a bakterií pomocí nejrozšířenějších primerů (ITS a r16S) mělo být součástí takového monitoringu.

Jak již bylo zmíněno na příkladu prudkého rozvoje molekulárních technik sledujících diverzitu mikrobiálních společenstev, jakýkoliv v současnosti plánovaný systém monitoringu by měl anticipovat budoucí vývoj metodologie. V současné době dochází k prudkému rozmachu molekulárních metod nejen v oblasti mikrobiální ekologie, ale i při studiu půdní fauny a tak zvané environmentální DNA. S klesající cenou a neustále se zdokonalujícími technickými postupy molekulárních metod mohou tyto metody v nedaleké budoucnosti konkurovat klasickým postupům, založeným na studiu morfologie organismů. Je proto třeba se zavedením systému monitoringu zavést i systém archivace sledovaného biologického materiálu tak, aby případné nové metody sledování, které se v současnosti objevují, anebo se nechají očekávat, mohly být zpětně aplikovány na stávající systém monitoringu. To by umožnilo porovnat výsledky dosažené klasickými postupy a inovativními metodami, jejichž rozmach lze do budoucna očekávat, a bylo by tak možné v budoucnosti přejít na novější techniky s již zajištěnou kontinuitou dat.

Tabulka 3. Parametry (skupiny půdních organismů a půdní procesy) doporučované jednotlivými autory pro velkoplošná, celonárodní, nebo celoevropská monitorovací schémata. Černě jsou parametry doporučované jako základní povinné, šedě pak doplňkové. V případě směrnice se jedná o současný stav návrhu, který nemusí odrážet finální podobu směrnice spíše ilustruje probíhající diskusi v tomto směru.

Zdroj / Parametr	Breure, 2004	Huber a kol., 2008	Bispo a kol., 2009	Griffiths a kol., 2016	Creamer a kol., 2019	Soil monitoring law - návrh
Žížaly						
Všechna makrofauna						

Chvostoscoci						
Roztoči						
Roupice						
Nematoda						
Mikrobiální respirace						
Mikrobiální diverzita						
Půdní enzymy						
Potenciální nitrifikace						
Mikrobiální biomasa						
PLFA						
Funkční geny						

Tabulka 4. Parametry (skupiny půdních organismů a půdní procesy) použité v jednotlivých velkoplošných (celonárodních) monitorovacích schématech jednotlivých evropských států. Podle Pulleman a kol. (2012)

Monitorovací program – země/ parametr	UBA & EDAPHO- BASE Německo	RMQS- BioDiv Francie	SQUD UK	NEBO Švýcarsko	Cre-Bio Survey Irsko	DSQN-BISQ Nizozemí
Žížaly						
Makrofauna						
Chvostoscoci						
Roztoči						
Roupice						
Hlístice						
Mic. resp ¹						
SIR ²						
Mic. diverzita ³						
Půdní enzymy						
Potenc. nitrifikace ⁴						
Mic. biomasa ⁵						
PLFA ⁶						
Inkorporace amin. ⁷						

Poznámky: ¹ - mikrobiální respirace, ² - respirace po přidavku substrátu tzv. substrátem indukovaná respirace, ³ - mikrobiální diverzita, historické monitorovací programy používaly různých starších, dnes překonaných, metod jako DGGE aj. Tyto metody jsou shrnuty do jedné kategorie. Dnes by tyto metody bylo možno nahradit metodami next generation sequencing. ⁴ - potenciální nitrifikace, ⁵ - mikrobiální biomasa, ⁶ - analýza membránových fosfolipidů (phospholipid fatty acid), ⁷ - inkorporace tymidinu a leucinu do buněk.

Níže uvedená Tabulka 5 shrnuje výběr parametrů, které bychom navrhli pro národní monitoring v rámci ČR. Tabulka má tři sloupce – v prvním sloupci je minimální soubor navrhovaných parametrů, vycházejících z tabulek 3 a 4 a dále z dostupnosti historických dat, která v ČR máme. V druhém sloupci je optimální soubor parametrů navrhovaných pro monitoring půdně-biologických vlastností. Třetí sloupec obsahuje výhled, jak by se mohl monitoring metodicky posouvat do budoucna a jak případně zajistit kontinuitu dat.

V hlavním setu doporučujeme zahrnout abundanci žížal a hlavních skupin půdní mesofauny, protože hrají roli v řadě klíčových procesů, jimiž půdní organismy ovlivňují půdní procesy. Dále zahrnujeme půdní respiraci, zejména proto, že se jedná o jednoduše měřitelný parametr. Navrhujeme též mikrobiální biomasu, která dává další možné interpretace naměřeným hodnotám mikrobiální respirace a je obrazem celkového množství mikroorganismů v půdě. Vzhledem k rozmachu molekulárních technik navrhujeme

zahrnout studium mikrobiální diverzity, případně alespoň archivování vzorků, které by pro tento účel byly použitelné. V optimální sestavě je tento soubor doplněn o celkovou makrofaunu – zejména protože ji lze získat jako vedlejší produkt studia populace žížal a vzhledem k malým nákladům může přinést cenné informace o složení dekompoziční potravní sítě. K mikrobiální biomase doporučujeme přidat ergosterol, který umožní sledování biomasy hub, což umožní posoudit roli hub a bakterií ve společenstvu. Alternativně by k podobnému účelu mohlo být použito analýzy PLFA, která je však technicky náročnější a nákladnější. Soubor optimálních parametrů navrhujeme rozšířit o potenciální nitrifikaci, která je důležitým indikátorem schopnosti půd zpřístupňovat dusík kořenům rostlin. Do budoucna, s rozvojem molekulárních technik, by jistě stálo za to, uvažovat o molekulárním studiu diverzity půdní meso- a makrofauny. V přípravě na tento krok doporučujeme archivovat materiál fauny získaný v monitoringu způsoby, které umožní následnou analýzu DNA.

Tabulka 5. Soubor půdně-biologických parametrů doporučovaných pro půdně-biologický monitoring v rámci ČR

Minimální set	Optimální soubor	Výhled do budoucna	
Abundance a diverzita žížal, extrakce půdních vzorků, morfologie	Abundance a diverzita žížal, extrakce půdních vzorků, morfologie	Abundance a diverzita žížal, extrakce půdních vzorků, morfologie	
	Půdní makrofauna, extrakce půdních vzorků, morfologie		
Abundance chvostoskoků, extrakce půdních vzorků, morfologie	Abundance chvostoskoků, extrakce půdních vzorků, morfologie	Dtto	Diverzita půdní meso- a mikrofauny pomocí DNA technik
Abundance a roztočů extrakce půdních vzorků	Abundance a roztočů extrakce půdních vzorků	Dtto	
	Abundance a trofické skupiny hlístic, extrakce půdních vzorků, morfologie	Dtto	
Mikrobiální respirace	Mikrobiální respirace		
Mikrobiální biomasa	Mikrobiální biomasa	Mikrobiální biomasa	
	Ergosterol – biomasa hub	Ergosterol – biomasa hub	
Archivace vzorků na mikrobiologickou diverzitu	Diverzita bakterií a hub	Diverzita bakterií a hub	
	Potenciální nitrifikace	Potenciální nitrifikace	

Historie monitoringu půdní bioty v ČR

Studium půdních organismů v ČR má dlouhou tradici a našli jsme celou řadu studií sledujících společenstva půdní bioty a to jak půdní mikrofóry (Hofman a kol., 2004; Šantrůčková a Straškraba, 1991; Šantrůčková, 1993a; Šantrůčková, 1992a; Šantrůčková a Šimek, 1997; Šantrůčková a kol., 2005; Uhlířová a kol., 2005; Šantrůčková a kol., 1996; Frouz a kol., 2006; Růžek a kol., 2004; Baldrian a kol., 2010; Mühlbachová, 2001; Popelářová a kol., 2008; Dušek a Tesařová, 1996; Malý a kol., 2009; Černošáková a kol., 2009; Skoda a kol., 1997; Malý a kol., 2014; Kobližková a kol., 2008; Oulehle a kol., 2018; Černošáková a kol., 2008; Helingerová a kol., 2010; Čížková a kol., 2018; Nováková a Voříšek, 2006; Šantrůčková, 1992b; Šimek a Šantrůčková, 1999; Šourková a kol., 2005; Frouz a Nováková, 2005; Kaštovská a kol., 2010; Heděnek a kol., 2015; Šantrůčková a kol., 1993; Kotas a kol., 2018; Tesařová a Řepová, 1984; Šimek a kol., 1993; Úlehlová, 1990; Šantrůčková, 1993b; Kralova a kol., 1992; Lettl, 1986; Mikanová a kol., 1996; Šimek a kol., 2000; Šimonovič a Šimonovičová, 1999; Vraný, 1983; Novák, 1980; Růžek a kol., 2003; Nováková a Ettler, 1974; Tomášek a Knotková, 1970; Tesařová a Šimek, 1989; Lettl, 1984), tak půdní fauny (Pižl, 1999a,b; Tajovský, 2000; Frouz a kol., 2001, Frouz a kol., 2010; Sterzynska a kol., 2015a,b; Tajovský, 1998a,b; Tajovský, 1999; Tajovský a kol., 2018; Tajovský a Wytwer, 2009; Kocourek a Tajovský, 2011; Pižl, 1998; Pižl, 2000; Pižl, 2007; Pižl, 2011; Pižl a kol., 2004; Starý 2001; Pižl a kol., 2014; Pižl 1998; Rusek a kol., 2005; Starý 1988; Starý 1993; Starý 2006; Starý, 2008; Tajovský 1996; Tajovský 1998c; b,

2001a, 2008, 2011; Wytwer a Tajovský, 2005). Nicméně většina těchto prací má charakter dílčích studií omezených v čase a prostoru. Jejich cílem bylo sledovat odpověď vybraných půdních organismů či procesů na experimentální zásahy nebo známé experimentální gradienty. Hlavními přispěvateli do tohoto souboru historických dat jsou instituce jako ÚPBB, Recetox MUNI, JČU, VÚRV, ČZU, MENDEL a UK. Nicméně skutečnost, že data byla získána v řadě případových studií, vede k tomu, že jednotlivé studie sledovaly různou logiku odběru ve smyslu různé hloubky, počtu a velikosti vzorků i načasování odběrů. Část starších dat, zejména mikrobiálních, byla již předmětem celosvětových syntéz. U mikrofóry se jedná zejména o studii Wardle a kol. (1998), u půdní fauny pak o práce Potapov a kol. (2023, 2024).

Našli jsme pouze dvě dlouhodobá vzorkovací schémata, která by se svým charakterem mohla blížit celonárodnímu monitoringu, který pomocí stejných, či velmi podobných metodik zkoumá vzorky pokrývající území ČR opakovaně v čase.

Prvním takovým schématem je monitoring půdních mikrobiálních procesů prováděných Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (ÚKZÚZ). Tento monitorovací systém je nadstavbou monitoringu zemědělských půd, který ÚKZÚZ provádí od 90. let minulého století na souboru 57 ploch a postupně rozšířeném až na 119 ploch (Tabulka 6). V rámci tohoto monitoringu je sledována řada mikrobiálních parametrů půd, včetně všech mikrobiálních parametrů výše doporučených pro základní půdně-biologický monitoring (Tabulka 7).

Tabulka 6. Počty ploch sledovaných v mikrobiálním monitoringu ÚKZÚZ

Čas	Počet ploch	Perioda odběru
1999-2004	57	1 x ročně
2005-2009	119	1 x za dva roky
od 2010	119	1 x za tři roky

Tabulka 7. Parametry sledované v mikrobiálním monitoringu ÚKZÚZ

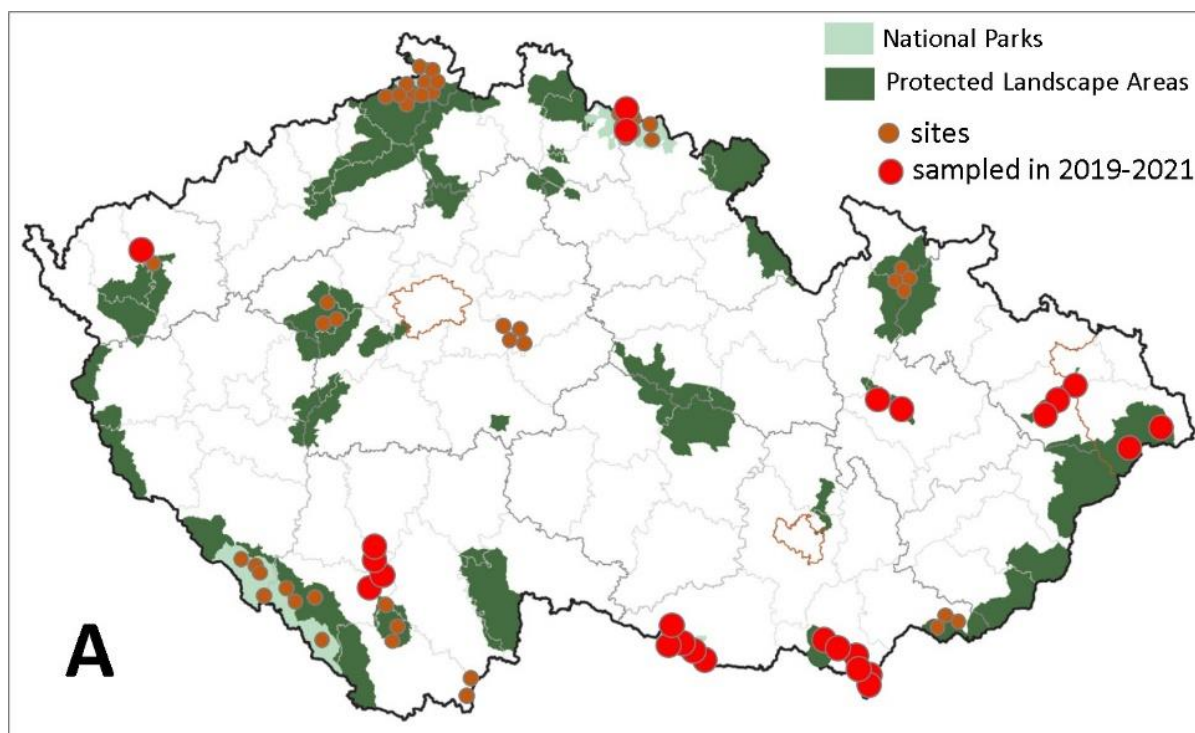
Parametr	Od roku
C a N mikrobiální biomasy fumigačně-extrakční metodou	1999
Bazální respirace CO ₂ titračně	1999
Anaerobní amonifikace	1999
Krátkodobá nitrifikační aktivita	1999
Bazální respirace jako spotřeba O ₂ systémem OxiTop	2006
Substrátem indukovaná respirace jako spotřeba O ₂ systémem OxiTop	2006
Respirační růstové křivky systémem OxiTop	2002
Aktivita ureázy	2004
Aktivita 6 enzymů s fluorogenními substráty	2009
t-rflp nitrifikačních bakterií a archeí	2009

Druhým obsáhlým monitorovacím schématem je studium půdní fauny Ústavem půdní biologie a biogeochemie Biologického centra AV ČR, v. v. i. (ÚPBB). Jedná se o soubor ploch sledovaných v 90. letech minulého století a nejméně jednou

převzorkovaný. Soubor ploch přitom zahrnuje různé přírodní ekosystémy i agroekosystémy, na nichž byla sledována společenstva půdní mesofauny a makrofauny (Tabulka 8, Obr. 3).

Tabulka 8. Přehled ploch monitoringu ÚPBB

	Počet lokalit		
	Nížiny a pahorkatiny	Hory	Celkem
	Lesy / louky		
Makrofauna – abundance půdních vzorků	43 / 15	10 / 4	72
Epigeická aktivita (makrofauna)	37 / 7	9 / 4	57
Mesofauna	21 / 9	10 / 4	44
Překryv vzorkovacích ploch pro makro- a mesofaunu	20 / 6	10 / 4	40



Obrázek 3. Mapa ploch monitoringu ÚPBB

Koncepce monitoringu a jeho vliv na možnosti interpretace historických dat

Půda, jak již bylo zmíněno, je přes svůj zásadní význam pro fungování ekosystémů, zemědělskou a lesní produkci často přehlížena. Navíc zájem o půdu je často oborově specifický a odborníci v jednotlivých navazujících oborech se často zabývají jen úzkým výsekem parametrů půdy, nebo půdami na územích s určitým specifickým způsobem užívání krajiny. Tato fragmentace informací o půdě neobyčejně komplikuje interpretaci dat. Je tomu jednak proto, že odborníci z různých oborů často používají různé metodické postupy, případně studují různé hloubky půdy atp. Harmonizace výsledků z různých studií tak není zcela triviální. Navíc často nemáme porovnatelné časové řady dat z různých typů ekosystémů (či typů užívání krajiny) v geograficky podobných podmínkách. Jinými slovy odpovědět na otázku, jak půdy užívané různým způsobem nebo půdy různých ekosystémů reagují na místně specifické projevy globálních stresorů (globální změna klimatu, plošné znečištění atp.) je na základě literárních dat obtížné. Přitom právě odpověď na tuto otázku je klíčová pro budoucí hospodaření v krajině.

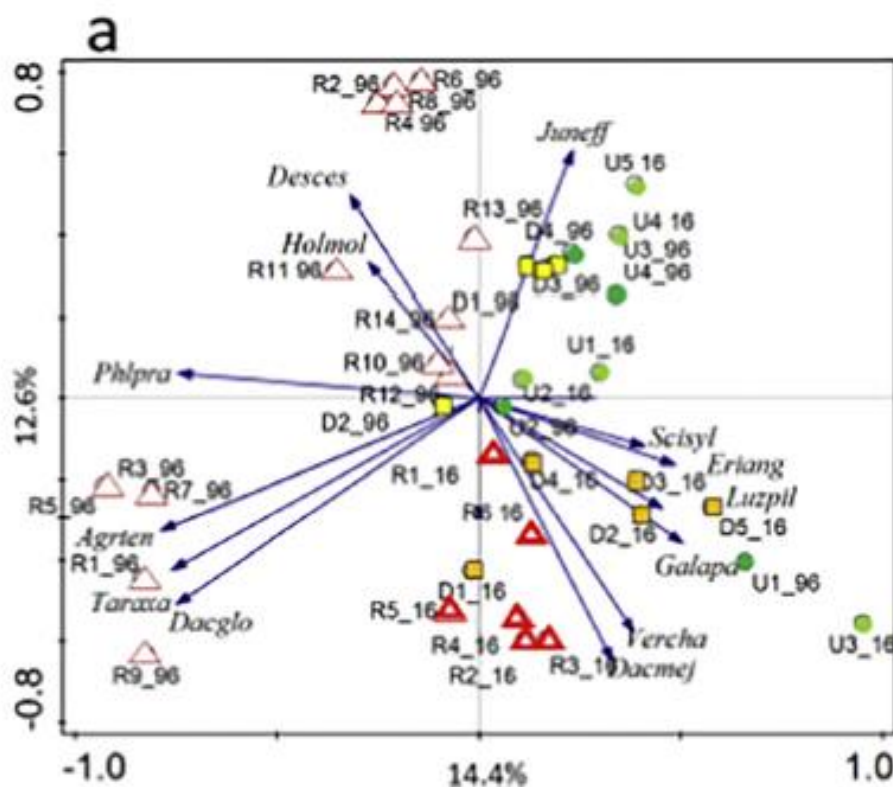
Jinými slovy, přestože nás zajímá chování jen části krajiny, například jen lesních ploch, resp. jen zemědělských ploch, nebo jen chráněných území,

měli bychom zároveň monitorovat chování i ostatních typů užívání krajiny, abychom byli schopni výsledky smysluplným způsobem interpretovat. Naopak izolované sledování jednotlivých „oborově specifických“ segmentů krajiny nám při podobné investici energie a zdrojů přinese mnohem menší užitek.

V následujícím textu bychom rádi demonstrovali důležitost sledování různých segmentů krajiny na příkladu dlouhodobého sledování odvodněných a revitalizovaných rašelinných luk (Krejčová a kol., 2021). V této studii jsme sledovali vliv podpovrchové trubkové drenáže, která byla často využívaným způsobem intenzifikace zemědělství zejména v minulosti, v omezené míře i dnes. Zde uvádíme případovou studii rašelinných luk v okolí obce Senotín, které byly odvodněny od poloviny 80. do 90. let 20. století a byly obnoveny přerušením drenážních trubek přes jílově utěsněné příkopy. Tento pokus byl předmětem rozsáhlého průzkumu rostlin, půdní fauny a chemismu půdy, který byl proveden těsně před obnovou a poté opakovan o 20 let později. Hladina spodní vody byla nejbližší k povrchu na neodvodněných loukách a mnohem hlouběji na odvodněných a obnovených loukách během obou období. Na obnovené louce bylo pozorováno určité zvýšení hladiny podzemní vody, ale hladina spodní vody byla většinou do 60 cm od povrchu. Neodvodněná louka byla mnohem bohatší

na půdní organický uhlík. Rostlinná společenstva na odvodněných i obnovených pozemcích se 20 let po obnově přibližují společenstvu v neodvodněných zbytcích. Komunitní vážený průměr pro Ellenbergovy hodnoty ukázal, že neodvodněné zbytky rašelinných luk byly více oligotrofní než odvodněné a obnovené lokality. Jak ukazuje analýza hlavních komponent (PCA), společenstva půdní fauny neodvodněných zbytků a obou odvodněných úprav byla v 90. letech 20. století jasně oddělena a o 20 let později sloučena dohromady (Obr. 4). To bylo způsobeno posunem společenstev v obou

odvodněných úpravách, ale také a ve větší míře degradací neodvodněných zbytků, které se posunuly směrem k odvodněným lokalitám. Výsledky ukazují, že obnova mírně posunula společenstva směrem k neodvodněným referenčním lokalitám, ale posun nebyl o mnoho větší než u odvodněných lokalit a v obou případech nevedl k tvorbě rašeliny. Kontrolní místa také vykazují určitou degradaci s největší pravděpodobností v důsledku eutrofizace a vysušování krajiny.



Obrázek 4. Analýza hlavních komponent (PCA) na základě sledování společenstev půdní fauny na původních (zeleně) a odvodněných (červeně) rašelinných loukách u Senotína sledovaných v roce 1996 (označeno 96) a v roce 2016 (označeno 16).

Uvedený příklad názorně ukazuje důležitost dlouhodobého sledování a porovnání různých typů habitatů. Kdybychom měli jen porovnání z roku 2016, řekli bychom si, že vliv podzemní drenáže na půdní organismy není nijak významný. Nicméně porovnání obou habitatů na dlouhém časovém gradientu nám umožňuje dojít k závěru, že odvodnění krajiny trubkovou drenáží má velký vliv na společenstvo půdních organismů na odvodněných plochách a během času vede k vlivu na ostrůvky zbylých přírodních biotopů. Zároveň nám toto porovnání umožňuje i indikaci za tyto změny odpovědných klíčových faktorů, kterými se zdají být vysychání a eutrofizace krajiny. K těmto

závěrům bychom nemohli dojít, kdybychom sledovali jen jeden habitat v průběhu času, anebo porovnali dva habitaty jen v jednom čase. Výše uvedený příklad názorně demonstruje, proč je třeba do monitoringu zahrnout reprezentanty hlavních ekosystémů, resp. hlavních typů užívání krajiny.

Monitorování většího množství habitatů má tedy řadu zásadních výhod:

- 1) vede k lepšímu pokrytí hlavních skupin organismů a procesů napříč krajinou

- 2) umožní odhalit interakce mezi jednotlivými habitaty, jak bylo ukázáno v příkladu/příkladech výše
- 3) zahrnutí většího množství druhů a širšího environmentálního gradientu zlepší naši schopnost odhadnout hlavní mechanismy vysvětlující jednotlivé změny jak napříč habitaty, tak uvnitř habitatů
- 4) zahrnutí více habitatů umožní lepší a včasnější varování před jednotlivými environmentálními stresory, protože různé habitaty i organismy v nich obsažené jsou různě citlivé na podmínky prostředí
- 5) navíc monitoring hlavních typů habitatů dává možnost další extrapolace dosažených výsledků například pomocí mapování habitatů nebo konsolidované vrstvy ekosystémů, které spravuje AOPK, případně dalších celoevropských nástrojů jako je CORINE Land Cover aj.

Návrh monitoringu

Při návrhu monitoringu jsme se soustředili na návrh parametrů, které se mají sledovat, na návrh vzorkovací sítě, frekvence monitoringu a použité metody. Hlavními parametry, které jsme při výběru jednotlivých aspektů zahrnuli, byly pokrytí hlavních skupin půdních organismů a procesů a soulad tohoto výběru s doporučeními ve světové literatuře a s obdobnými dříve provedenými monitoringy, realizovanými jinými Evropskými zeměmi.

Dalším kritériem byla návaznost na předchozí výzkum v rámci ČR. Možnost navázat na historická data je pro dlouhodobý monitoring zcela zásadní. Cílem dlouhodobého monitoringu je sledovat dlouhodobé trendy v životním prostředí, které jsou řízeny významnými globálně působícími procesy jako je globální změna klimatu, rozsáhlé změny ve způsobu užívání krajiny, dlouhodobé změny v dynamice biogeochemických cyklů atp. Význam historických dat v tomto kontextu je neocenitelný. Při založení monitoringu „na zelené louce“ budeme muset provádět monitoring minimálně 15 – 30 let než uvidíme nějaké dlouhodobé trendy. Máme-li k dispozici historický monitoring, nebo alespoň historická data pro analogické parametry z doby před 30 lety, můžeme se k dlouhodobým trendům vyjádřit již po prvním roce sledování, což přináší obrovskou výhodu, která se s prodlužující dobou monitoringu bude ještě zvětšovat.

Minimálně navržené parametry v Tabulce 4, tedy mikrobiální biomasa, respirace, žížaly, chvostokoci a roztoči, jsou v současnosti pokrývány dlouhodobým monitoringem ÚKZÚZ a ÚPBB a umožňují tedy v interpretaci dat navázat na tato historická data.

Na co navazovat? Je možnost navázat na existující monitoring ÚKZÚZ (57 ploch, od roku 1999) a ÚPBB (72 ploch s daty z 90. let) a obě schémata spojit, případně doplnit tak, aby obsahovala výběr doporučených indikátorů. Zvolené indikátory byly vybrány tak, aby všechny doporučené indikátory v minimální verzi byly pokrývány stávajícími monitoringy obou výše uvedených institucí; i většina parametrů v optimální verzi je v dané chvíli pokryta stávajícím monitoringem těchto institucí. Toto spojení existujících schémat monitoringu by navazovalo na existující data (což, jak bylo výše uvedeno, přináší zcela zásadní výhodu v interpretaci dat a praktických doporučeních, které je možno na základě monitoringu činit), zároveň je takové řešení logisticky i organizačně nejméně náročné, a tím patrně i méně nákladné.

Vytvářet nezávislý soubor ploch, na nichž by se v dané chvíli začínalo měřit, se nezdá být jako vhodné řešení. Jedinou možnou výhodou by mohlo být to, že by takto vybrané plochy mohly lépe reprezentovat území republiky jak z pohledu geografického pokrytí, tak z pohledu zastoupení jednotlivých biotopů. Nicméně jak je patrné z příloženého přehledu, zejména z Tabulek 6 a 8, je stávající pokrytí jak agroekosystémů, tak přírodních biotopů velmi dobré a jeho drobné zlepšení nevyváží nevýhody takového postupu spojené se ztrátou historických dat. Existují i další monitorovací schémata (AOPK aj.), do kterých by šla půda doplnit. Výhodou by jistě byla provázanost na další faktory prostředí, bude u nich však chybět výhoda historických dat. Navíc jak ÚKZÚZ, tak ÚPBB shromažďují další požadovaná data k vybraným lokalitám – například data o přírodních podmínkách, managementu (osevní postupy, kultivace, hnojení atp.) – která by jistě bylo možno systematicky uspořádat a využít k interpretaci dat.

Tabulka 9 tedy shrnuje základní rysy plánovaného monitoringu. Je patrné, že počítá s monitoringem 120 ploch, které by byly monitorovány 1x za tři roky tak, že každý rok by byla monitorována třetina ploch. Tento systém navazuje na stávající systém ÚKZÚZ, kdy je každý rok sledována třetina sledovaných ploch a celý cyklus se tak dokončí za tři roky. Tři roky je doba, která umožňuje zachytit střednědobé změny v ekosystémech a zároveň toto uspořádání významně snižuje náklady celého

monitoringu oproti situaci, kdy by byly plochy sledovány každoročně. Třetina by byla stratifikována tak, aby pokrývala variabilitu přírodních podmínek a habitatů.

Byl by použit soubor základních, případně optimálních, parametrů popsaných výše. Organizačně by bylo možné přinést monitoring na ÚPBB a ÚKZÚZ (to jistě vyžaduje jednání s MZe, která je zřizovatelem ÚKZÚZ), o finálním uspořádání takového postupu. Dělení úkolů může mít několik variant, z pohledu MZe minimalistická varianta je, že bude provádět stejný monitoring jako doposud a umožní ÚPBB odběr vzorků půdní fauny na plochách, které dosud monitoruje. Tato varianta by ze strany MZe vyžadovala pouze vyřešení organizačních opatření spojených se vstupem na pozemky a sdílením dat, nevyžadovala by od MZe, resp. ÚKZÚZ žádné dodatečné náklady ve smyslu terénní či laboratorní práce. ÚPBB by pak provedlo na vzorcích z historických ploch ÚKZÚZ analýzy, které ÚKZÚZ nezajišťuje a zároveň všechny analýzy na plochách, které historicky sleduje. Vzhledem k tomu, že tato varianta nevyžaduje dodatečné náklady ze strany MZe, pokládáme ji za preferovanou. Jistě jsou k jednání i další možné varianty. Například, ÚKZÚZ zajistí odběr vzorků půdní fauny na předmětných plochách a jejich předání ÚPBB. Tato varianta přináší větší pracnost pro tak již vytížený odběrový tým ÚKZÚZ, může ale zjednodušit přístup na pozemky. Případně by mohlo ÚPBB předávat ÚKZÚZ ke zpracování vzorky na mikrobiální respiraci a biomasu, toto řešení by přeneslo více nákladů spojených s analýzami na MZe, ale celkové náklady by se zásadně nezměnily. Mírnou výhodou poslední varianty by byla lepší porovnatelnost s ostatními daty ÚKZÚZ, tento aspekt lze ale řešit i jinak a s ohledem na to, že obě laboratoře pracují velmi podobně, není toto zásadní výhoda. Krom toho i ÚPBB má historická data respirace biomasy, i když ne tak úplná. Všechna

výše popsaná uspořádání by vyžadovala relativně malé dodatečné náklady (cestovné, materiální a personální náklady spojené s odběrem, zpracováním a archivací vzorků). Celkové náklady jednotlivých variant se podle našeho expertního odhadu nebudou zásadně lišit. Doporučujeme proto variantu, která by pro ÚKZÚZ neznamenal další vícepráce. Ve všech případech představuje největší výhodu sdílení dat mezi existujícími monitorovacími schématy. Takové sdílení dat je přitom výhodné jak pro MŽP, tak pro MZe.

Navrhovaná varianta, při níž ÚKZÚZ bude provádět všechny aktivity jako doposud a nic navíc, by pokrývala všechny parametry základní varianty popsané v tabulce 9 a většinu parametrů optimální varianty s výjimkou ergosterolu a bakteriální diversity. V případě, že by padlo rozhodnutí doplnit daná sledování o ergosterol a mikrobiální diverzitu bylo by možné se dohodnout na získání zmražených sub vzorků ze strany ÚKZÚZ, což by přineslo jen malé zvýšení pracnosti. Uchování zmražených vzorků vhodných pro ergosterol a mikrobiální diverzitu, bychom doporučovali provést v každém případě, i kdyby se nenašly okamžitě peníze na jejich analýzu. Při správném ošetření je možno takové vzorky skladovat relativně dlouho a je velká šance, že se najdou externí prostředky na zpracování takového vědecky cenného materiálu. V tomto ohledu bychom doporučovali uschovávat archiv zmražených případně lyofilizovaných vzorků půd (případně i DNA a dalšího materiálu), který by bylo možno nabízet výzkumným subjektům. Gestorem takového archivu by opět mohlo být ÚPBB. Podmínkou takové nabídky by bylo, že se zpracovatel, výměnou za poskytnutý materiál, zaváže zpracovat jej na své náklady a poskytnout získaná data. Lze totiž očekávat, že v budoucnosti se vyskytnou zájemci, kteří by zpracovávali další parametry, které se dnes nelze ani anticipovat.

Tabulka 9. Hlavní parametry navrhovaného monitorovacího programu pro sledování půdní bioty

Parametry ploch	Četnost a způsob vzorkování, použité metody stanovení
120 ploch (65 ploch z monitoringu ÚPBB, 55 ploch z monitoringu ÚKZÚZ, pro které jsou k dispozici data z 90. let minulého století)	1x za 3 roky

Abundance žížal	5 vzorků na plochu (32 cm v průměru, do hloubky 10 cm), extrakce Tulgrenovými přístroji, morfologická determinace
Abundance chvostoskotů	3 směsné vzorky na plochu, každý ze tří dílčích vzorků (3 cm v průměru, do hloubky 10 cm), extrakce tulgrenovými přístroji, morfologická determinace
Abundance roztočů	Stejně jako u chvostoskoků
Mikrobiální respirace	Směsný vzorek na plochu, mikrobiální respirace titrační metodou
Mikrobiální biomasa	Směsný vzorek na plochu, mikrobiální biomasa fumigačně extrakční metodou
Navíc v optimální variantě	
Ostatní makrofauna	Stejnou metodou jako žížaly
Ostatní mesofauna	Stejnou metodou jako chvostoskoci a roztoči
Hlístice	3 směsné vzorky na plochu, každý ze tří dílčích vzorků (3 cm v průměru, do hloubky 10 cm), extrakce Bergmanovými nálevkami, morfologická determinace
Potenciální nitrifikace	Stejně vzorky jako respirace a biomasa, krátkodobá nitrifikační aktivita
Ergosterol	Stejně vzorky jako respirace a biomasa, spektrofotometricky
Diverzita hub a bakterií	Stejně vzorky jako respirace a biomasa, Next Generation Sequencing pomocí 16S rRNA a ITS

Použitá literatura

- Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amézaga, I., Garbisu, C. Soil Enzyme Activities as Biological Indicators of Soil Health. *Reviews on Environmental Health*, 2003, 18(1): 65-73. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2003.18.1.65>
- Althoff, P.S., Todd, T.C., Thien, S.J., Callahan, M.A., Jr. Response of soil microbial and invertebrate communities to tracked vehicle disturbance in tallgrass prairie. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(1): 122–130, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.06.011>
- Anzalone, R.A., Vezzani, F.M., Kaschuk, G., Hungria, M., Vargas, L.K., Nogueira, M.A. Establishing reference values for soil microbial biomass-C in agroecosystems in the Atlantic Forest Biome in Southern Brazil. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106586>
- Ashwood, F., Barreto, C., Butt, K.R.R., Lampert, M., Doick, K., Vanguelova, E.I.I. Earthworms and soil mesofauna as early bioindicators for landfill restoration. *Soil Research*, 2023, 61(4): 311–328. <http://dx.doi.org/10.1071/SR21286>
- Aziz, N., Butt, A., Elsheikha, H.M. Antioxidant enzymes as biomarkers of Cu and Pb exposure in the ground spiders *Lycosa terrestris* and *Pardosa birmanica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 190: 110054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110054>
- Badejo, M.A., Espindola, J.A.A., Guerra, J.G.M., de Aquino, A.M., Correa, M.E.F. Soil oribatid mite communities under three species of legumes in an ultisol in Brazil. *Experimental and Applied Acarology*, 2002, 27(4): 283–296, 2002. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023399607317>
- Baldrian, P., Merhautová, V., Petránková, M., Cajthaml, T., Šnajdr, J. Distribution of microbial biomass and activity of extracellular enzymes in a hardwood forest soil reflect soil moisture content. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(2): 177-182, ISSN 09291393. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.013>
- Bardgett, R., van der Putten, W. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 2014, 515: 505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, I.U., Krogh, P.H., Sousa, J.P., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., Römcke, J. INDICATORS FOR MONITORING SOIL BIODIVERSITY. *Learned Discourses—Integr Environ Assess Manag* 2009, 5: 717-719.
- Bongers, T., Ferris, H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, 14(6): 224–228. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01583-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01583-3)
- Breure, A.M. Soil biodiversity: Measurements, indicators, threats and soil functions. In: I International Conference Soil and Compost Eco-biology. Leon, Spain. 15-17 September 2004, p. 83-96.
- Cabrero-Sanudo, F.J., Canizares Garcia, R., Caro-Miralles, E., Gil-Tapetado, D., Grzechnik, S., Lopez-Collar, D. Monitoring of arthropod bioindicators in urban areas: objectives, experiences, and perspectives. *ECOSISTEMAS*, 2022, 31(1): 2340. <http://dx.doi.org/10.7818/ECOS.2340>
- Calisi, A., Lionetto, M.G., De Lorenzis, E., Leomanni, A., Schettino, T. Metallothionein Induction in the Coelomic Fluid of the Earthworm *Lumbricus terrestris* following Heavy Metal Exposure: A Short Report. *Biomed Research International*, 2014, 2014(1): 109386, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/109386>
- Calisi, A., Zaccarelli, N., Lionetto, M.G., Schettino, T. Integrated biomarker analysis in the earthworm *Lumbricus terrestris*: Application to the monitoring of soil heavy metal pollution. *Chemosphere*, 2013, 90(11): 2637–2644. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.11.040>
- Calisi, A., Lionetto, M.G., Schettino, T. Biomarker response in the earthworm *Lumbricus terrestris* exposed to chemical pollutants.

- Science of the Total Environment*, 2011, 409(20): 4456–4464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.058>
- Cameron, E.K., Martins, I.S., Lavelle, P., Mathieu, J., Tedersoo, L., Bahram, M., Gottschall, F., Guerra, C.A., Hines, J., Patoine, G., Siebert, J., Winter, M., Cesarz, S., Ferlian, O., Kreft, H., Lovejoy, T.E., Montanarella, L., Orgiazzi, A., Pereira, H.M., Phillips, H.R.P., Settele, J., Wall, D.H., Eisenhauer, N. Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity. *Conservation Biology*, 2019, 33(5): 1187–1192. <https://doi.org/10.1111/cobi.13311>
- Caruso, T., Pigino, G., Bernini, F., Bargagli, R., Migliorini, M. The Berger-Parker index as an effective tool for monitoring the biodiversity of disturbed soils: a case study on Mediterranean oribatid (Acari: Oribatida) assemblages. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16(12): 3277–3285. <http://dx.doi.org/10.1007/s10531-006-9137-3>
- Chao, H., Sun, M., Ye, M., Zheng, X., Hu, F. World within world: Intestinal bacteria combining physiological parameters to investigate the response of *Metaphire guillelmi* to tetracycline stress. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.11.4174>
- Chowdhury, S., Dubey, V.K., Choudhury, S., Das, A., Jeengar, D., Sujatha, B., Kumar, A., Kumar, N., Semwal, A., Kumar, V. Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1146052, 2023. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2023.1146052>
- Creamer, R.E., Barel, J.M., Bongiorno, G., Zwetsloot, M.J., 2022. The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561
- Creamer, R. et al. Monitoring schema for regional and European application. Testing and assessment of indicators for five soil functions. Deliverable 5.2. Landmark project: Monitoring scheme for regional and European application, testing and assessment of indicators for five soil functions. 2019.
- Černohlávková, J., Jarkovský, J., Nešporová, M., Hofman, J. Variability of soil microbial properties: Effects of sampling, handling and storage. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(8): 2102–2108. ISSN 01476513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.04.023>
- Černohlávková, J., Hofman, J., Bartoš, T., Sáhka, M., Anděl, P. Effects of road deicing salts on soil microorganisms. *Plant, Soil and Environment*, 2008, 54(11): 479–485. ISSN 12141178. <https://doi.org/10.17221/431-PSE>
- Čížková, B., Woś, B., Pietrzykowski, M., Frouz, J. Development of soil chemical and microbial properties in reclaimed and unreclaimed grasslands in heaps after opencast lignite mining. *Ecological Engineering*, 2018, 123: 103–111, ISSN 09258574. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.004>
- De Deyn, G.B., Van der Putten, W.H. Linking aboveground and belowground diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(11): 625–633, ISSN 0169-5347. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.08.009>
- de Lima, S.S., de Aquino, A.M., da Silva, R.M., Matos, P.S., Pereira, M.G. Edaphic fauna and soil properties under different managements in areas impacted by natural disaster in a mountainous region. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2021, 45: e0200156. <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbc20200156>
- De Vries, F.T., Thébault, E., Liiri, M., Birkhofer, K., Tsiafouli, M.A., et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110: 14296–14301. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305198110>
- Djemiel, C., Dequiedt, S., Bailly, A., Tripied, J., Lelievre, M., Horrigue, W., Jolivet, C., Bispo, A., Saby, N., Vale, M., Maron, P.-A., Ranjard, A.

- L., Terrat, S. Biogeographical patterns of the soil fungal:bacterial ratio across France. *MSPHERE*, 2023, 8: e0036523. <http://dx.doi.org/10.1128/msphere.00365-23>
- Dušek, L., Tesařová, M. Influence of polychlorinated biphenyls on microbial biomass and its activity in grassland soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(3): 243-247. ISSN 0178-2762. <https://doi.org/10.1007/BF00382519>
- Fang, P., Wu, W.L., Xu, Q., He, J.H., Han, C.R., Paoletti, M.G. Assessing bioindication with earthworms in an intensively farmed rural landscape (Yuanqiao and Daqiao villages in Qianjiang Municipality, located in Hubei Province, subtropical China). *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, 18(3): 429-455. [http://dx.doi.org/10.1016/S0735-2689\(99\)00376-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0735-2689(99)00376-7)
- Farkas, S., Hornung, E., Fischer, E. Toxicity of copper to *Porcellio scaber* Latr (Isopoda) under different nutritional status. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 57(4): 582-588. <http://dx.doi.org/10.1007/s001289900230>
- Finkenbein, P., Kretschmer, K., Kuka, K., Klotz, S., Heilmeier, H. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 56: 87-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.012>
- Fiscus, D.A., Neher, D.A. Distinguishing sensitivity of free-living soil nematode genera to physical and chemical disturbances. *Ecological applications*, 2002, 12(2): 565-575. [http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761\(2002\)012\[0565:DSOFLS\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761(2002)012[0565:DSOFLS]2.0.CO;2)
- Fournier, B., Steiner, M., Brochet, X., Degruene, F., Mammeri, J., Carvalho, D.L., Siliceo, S.L., Bacher, S., Pena-Reyes, A., Heger, T.J. Toward the use of protists as bioindicators of multiple stresses in agricultural soils: A case study in vineyard ecosystems. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108955>
- Freitas, I.B.F., Duarte-Neto, P.J., Sorigotto, L.R., Yoshii, M.P.C., de Palma Lopes, L.F., de Almeida Pereira, M.M., Girotto, L., Athayde, D.B., Goulart, B.V., Montagner, C.C., Schiesari, L.C., Martinelli, L.A., Espindola, E.L.G. Effects of pasture intensification and sugarcane cultivation on non-target species: A realistic evaluation in pesticide-contaminated mesocosms. *Science of the Total Environment*, 2024, 922: 171425. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171425>
- Frouz, J. Plant-soil feedback across spatiotemporal scales from immediate effects to legacy. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 189: 109289. ISSN 0038-0717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109289>
- Frouz, J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 2018, 332: 161-172, ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.039>
- Frouz, J., Frouzová, J. Aplikovaná ekologie. Karolinum, Praha, 2022.
- Frouz, J., Nováková, A. Development of soil microbial properties in topsoil layer during spontaneous succession in heaps after brown coal mining in relation to humus microstructure development. *Geoderma*, 2005, 129(1-2): 54-64, ISSN 00167061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.033>
- Frouz, J., Špaldoňová, A., Fričová, K., Bartuška, M. The effect of earthworms (*Lumbricus rubellus*) and simulated tillage on soil organic carbon in a long-term microcosm experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.011>
- Frouz, J., Pižl, V., Tajovský, K., Syrovátka, O. The effect of pipe drainage on peat meadow soil: soil macrofauna. *Acta Universitatis Carolinae, Environmentalica*, 2010, 24: 91-107.
- Frouz, J., Elhottová, D., Kuráž, V., Šourková, M. Effects of soil macrofauna on other soil biota and soil formation in reclaimed and

- unreclaimed post mining sites: Results of a field microcosm experiment. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3): 308-320. ISSN 09291393.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.11.001>
- Frouz, J., Keplin, B., Pižl, V., Tajovský, K., Starý, J., et al. Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences. *Ecological Engineering*, 2001, 17: 275–284.
- Fusaro, S., Squartini, A., Paoletti, M.G. Functional biodiversity, environmental sustainability and crop nutritional properties: A case study of horticultural crops in north-eastern Italy. *Applied Soil Ecology*, 2018, 123: 699–708.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.023>
- Gavish-Regev, E., Armiach Steinpress, I., Salman, I.N.A., Segev, N., Uzan, A., Byun, Y., Levy, T., Aharon, S., Zvik, Y., Shtuhin, R., Shapira, Y., Majer, M., Ganem, Z., Zonstein, S., Magalhaes, I.L.F., Lubin, Y. Five-Year Monitoring of a Desert Burrow-Dwelling Spider Following an Environmental Disaster Indicates Long-Term Impacts. *Insects*, 2022, 13(1): 101, 2022.
<http://dx.doi.org/10.3390/insects13010101>
- Geissen, V., Kampichler, C. Limits to the bioindication potential of Collembola in environmental impact analysis: a case study of forest soil-liming and fertilization. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(6): 383–390.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00374-003-0714-2>
- Ghannem, S., Khazri, A., Sellami, B., Boumaiza, M. Assessment of heavy metal contamination in soil and Chlaenius (Chlaeniellus) olivieri (Coleoptera, Carabidae) in the vicinity of a textile factory near Ras Jbel (Bizerte, Tunisia). *Environmental Earth Science*, 2016, 75(5): 442.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-016-5373-3>
- Gospodarek, J., Rusin, M. Effect of Soil Polluted with Petroleum-Derived Substances during Bioremediation on the Occurrence of Collembola and Acarina. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(5): 3115–3125.
<http://dx.doi.org/10.15244/pjoes/114259>
- Griffiths, B.S., Römbke, J., Schmelz, R.M., Scheffczyk, A., Faber, J.H., et al. Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 213-223, ISSN 1470-160X.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.023>
- Groffen, T., Eens, M., Bervoets, L. Do concentrations of perfluoroalkylated acids (PFAAs) in isopods reflect concentrations in soil and songbirds? A study using a distance gradient from a fluorochemical plant. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 111–123.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.072>
- Gulvik, M.E. Mites (Acari) as indicators of soil biodiversity and land use monitoring: A review. *Polish Journal of Ecology*, 2007, 55(3): 415–440.
- Han, X.-M., Liu, Y.-R., Zheng, Y.-M.; Zhang, X.-X.; He, J.-Z. Response of bacterial pdo1, nah, and C12O genes to aged soil PAH pollution in a coke factory area. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(16): 9754–9763. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-2928-2>
- Hansson, S.V., Høye, T.T., Bach, L., Mielec, C., Mosbech, A., Sondergaard, J. Spiders as biomonitors of metal pollution at Arctic mine sites: The case of the Black Angel Pb-Zn-mine, Maarmorilik, West Greenland. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105489.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105489>
- Hattab, S., Boughattas, I., Cappello, T., Zitouni, N., Touil, G., Romdhani, I., Livet, A., Bousserhine, N., Banni, M. Heavy metal accumulation, biochemical and transcriptomic biomarkers in earthworms Eisenia andrei exposed to industrially contaminated soils from south-eastern Tunisia (Gabes Governorate). *Science of the Total Environment*, 2023, 887: 163950.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163950>
- Heděněc, P., Jiménez, J.J., Moradi, J., et al. Global distribution of soil fauna functional groups and their estimated litter consumption

- across biomes. *Scientific Reports*, 2022, 12: 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21563-z>
- Heděneč, P., Novotný, D., Usták, S., Honzík, R., Váňa, V., Petříková, V., Frouz, J. Effect of long term cropping hybrid sorrel (*Rumex patientia* x *Rumex tianshanicus*) on soil biota. Online. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 78: 92-98. ISSN 09619534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.016>
- Helingerová, M., Frouz, J., Šantrůčková, H. Microbial activity in reclaimed and unreclaimed post-mining sites near Sokolov (Czech Republic). *Ecological Engineering*, 2010, 36(6): 768-776. ISSN 09258574. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.01.007>
- Hofman, J., Dušek, L., Klánová, J., Bezchlebová, J., Holoubek, I. Monitoring microbial biomass and respiration in different soils from the Czech Republic—a summary of results. Online. *Environment International*, 2004, 30(1): 19-30. ISSN 01604120. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00142-9](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00142-9)
- Hoffmann, B.D., James, C.D. Using ants to manage sustainable grazing: Dynamics of ant faunas along sheep grazing gradients conform to four global patterns. *Austral Ecology*, 2011, 36(6): 698-708. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1442-9993.2010.02205.x>
- Hoffmann, B.D. Using ants for rangeland monitoring: Global patterns in the responses of ant communities to grazing. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 105-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.04.016>
- Hooper, D.U., Bignell, D.E., Brown, V.K., Brussard, L., Dangerfield, J.M., et al. Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks: We assess the evidence for correlation between aboveground and belowground diversity and conclude that a variety of mechanisms could lead to positive, negative, or no relationship—depending on the strength and type of interactions among species. *BioScience*, 2000, 50(12): 1049-1061. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[1049:IBAABB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[1049:IBAABB]2.0.CO;2)
- Horrigue, W., Dequiedt, S., Prevost-Boure, N.C., Jolivet, C., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Bispo, A., Maron, P.-A., Ranjard, L. Predictive model of soil molecular microbial biomass. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 203-211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.004>
- Huber, S., G. Prokop, D. Arrouays, G. Banko, A. Bispo, R.J.A. Jones, M.G. Kibblewhite, W. Lexer, A. Möller, R.J. Rickson, T. Shishkov, M. Stephens, G. Toth, J.J.H. Van den Akker, G. Varallyay, F.G.A. Verheijen and A.R. Jones (eds). Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume I Indicators & Criteria. EUR 23490 EN/1. Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg, 2008, 339pp.
- Kaur, A., Chaudhary, A., Kaur, A., Choudhary, R., Kaushik, R. Phospholipid fatty acid. A bioindicator of environment monitoring and assessment in soil ecosystem. *Current Science*, 2005, 89(7): 1103-1112.
- Kaštovská, E., Šantrůčková, H., Pícek, T., Vašková, M., Edwards, K.R. Direct effect of fertilization on microbial carbon transformation in grassland soils in dependence on the substrate quality. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(5): 706-714. ISSN 1436-8730. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900013>
- Khalil, A.M. Neurotoxicity and biochemical responses in the earthworm *Pheretima hawayana* exposed to TiO₂NPs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 455-461, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.010>
- Kileal, E.A., Keffer, J.L., Maresca, J.A. Bacterial Communities in Concrete Reflect Its Composite Nature and Change with Weathering. *MSYSTEMS*, 2021, 6(3): e01153-20. <http://dx.doi.org/10.1128/mSystems.01153-20>
- Kobližková, M., Dušek, L., Jarkovský, J., Hofman, J., Bucheli, T.D., Klánová, J. Can Physicochemical and Microbial Soil Properties Explain Enantiomeric Shifts of

- Chiral Organochlorines? Online. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 5978-5984. ISSN 0013-936X.
<https://doi.org/10.1021/es800625d>
- Kocourek, P., Tajovský, K. Mnohonožky (Myriapoda: Diplopoda) CHKO a BR Křivoklátsko. *Bohemia centralis*, 2011, 31: 285–300.
- Kotas, P., Šantrůčková, H., Elster, J., Kaštovská, E. Soil microbial biomass, activity and community composition along altitudinal gradients in the High Arctic (Billefjorden, Svalbard). *Biogeosciences*, 2018, 15(6): 1879-1894. ISSN 1726-4189.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-1879-2018>
- Kralova, M., Masscheleyn, P.H., Patrick, W.H. Redox potential as an indicator of electron availability for microbial activity and nitrogen transformations in aerobic soil. *Zentralblatt für Mikrobiologie*, 1992, 147(6): 388-399. ISSN 02324393.
[https://doi.org/10.1016/S0232-4393\(11\)80348-3](https://doi.org/10.1016/S0232-4393(11)80348-3)
- Krejčová J., Vicentini F, Flynn T., Mudrák O., Frouz J., Biodiversity loss caused by subsurface pipe drainage is difficult to restore, *Ecological Engineering*, 2021, 170,106336,
- Lara, E., Acosta-Mercado, D. A molecular perspective on ciliates as soil bioindicators. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 49: 107–111.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.eisobi.2011.11.001>
- Latif, R., Malek, M., MacKenzie, K. Eiseniella tetraedra (Savigny, 1826) (Oligochaeta: Lumbricidae) as a bioindicator of heavy metals. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2011, 93(8): 1643–1649.
<http://dx.doi.org/10.1080/02772248.2011.599112>
- Le Provost, G., Thiele, J., Westphal, C. et al. Contrasting responses of above- and belowground diversity to multiple components of land-use intensity. *Nature Communications*, 2021, 12: 3918.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23931-1>
- Leon, M.C.C., Stone, A., Dick, R.P. Organic soil amendments: impacts on snap bean common root rot (*Aphanomyces euteiches*) and soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31: 199–210.
- Lettl, A. Biochemical activities of soil microflora in SO₂ polluted forest stands. *Folia Microbiologica*, 1986, 31(3): 220-227. ISSN 0015-5632.
<https://doi.org/10.1007/BF02928004>
- Lettl, A. The effect of atmospheric SO₂ pollution on the microflora of forest soils. *Folia Microbiologica*, 1984, 29(6): 455-475. ISSN 0015-5632.
<https://doi.org/10.1007/BF02873159>
- Li, R., Yao, J., Liu, J., Sunahara, G., Duran, R., Xi, B., El-Saadani, Z. Bioindicator responses to extreme conditions: Insights into pH and bioavailable metals under acidic metal environments. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356: 120550.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120550>
- Lors, C., Ryngaert, A., Perie, F., Diels, L., Damidot, D. Evolution of bacterial community during bioremediation of PAHs in a coal tar contaminated soil. *Chemosphere*, 2010, 81(10): 1263–1271.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.021>
- Malý, S., Fiala, P., Reininger, D., Obdržálková, E. The relationships among microbial parameters and the rate of organic matter mineralization in forest soils, as influenced by forest type. *Pedobiologia*, 2014, 57(4-6): 235-244. ISSN 00314056.
<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2014.09.003>
- Malý, S., Královec, J., Hampel, D. Effects of long-term mineral fertilization on microbial biomass, microbial activity, and the presence of r- and K-strategists in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45(7): 753-760. ISSN 0178-2762.
<https://doi.org/10.1007/s00374-009-0388-5>
- Meehan, M.L., Song, Z., Lumley, L.M., Cobb, T.P., Proctor, H. Soil mites as bioindicators of disturbance in the boreal forest in northern Alberta, Canada: Testing taxonomic sufficiency at multiple taxonomic levels. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 349–365.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.043>
- Mikanová, O., Nováková, J., Hanzlíková, A., Kubá, J., Filip, Z. Vliv dlouhodobého hnojení a antropogenní zátěže na biomasu a zastoupení některých skupin mikroorganismů. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1996, 42(9): 391-397. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:af7d4de0-517d-11ed-a10b-005056822549>
- Mühlbachová, G. Dynamics of soil microbial activity and heavy metal availability after amendment of contaminated soils by lucerne substrate. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 2001, 47(12): 560-565. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:e60d2600-5394-11ed-84d6-0050568d9066>
- Ndiaye, E.L., Sandeno, J.M., McGrath, D., Dick, R.P. Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2000, 15(1):26-36. <https://doi.org/10.1017/S0889189300008432>
- Ning, Y., Jin, C., Zhou, H., Wang, E., Huang, X., Zhou, D. Screening indices for cadmium-contaminated soil using earthworm as bioindicator. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 32358–32372. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-3207-4>
- Novák, B. Effect of starch and inorganic nitrogen on microbial transformations of organic compounds in soil. *Folia Microbiologica*, 1980, 25(2): 140-143. ISSN 0015-5632. <https://doi.org/10.1007/BF02933013>
- Nováková, J., Ettler, P. Effect of Clays on Soil Microorganisms activity. *Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene. Zweite Naturwissenschaftliche Abteilung: Allgemeine, Landwirtschaftliche und Technische Mikrobiologie*, 1974, 129(1-2): 201-216. ISSN 00444057. [https://doi.org/10.1016/S0044-4057\(74\)80079-1](https://doi.org/10.1016/S0044-4057(74)80079-1)
- Nováková, M., Voříšek, K. Microbiological parameters of soil set aside before and after desiccation. *Plant, Soil and Environment*, 2006, 52(3): 97-104. ISSN 12141178. <https://doi.org/10.17221/3352-PSE>
- O'Neill, K.P., Godwin, H.W., Jimenez-Esquilin, A.E., Battigelli, J.P. Reducing the dimensionality of soil micro invertebrate community datasets using Indicator Species Analysis: Implications for ecosystem monitoring and soil management. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(2): 145–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.024>
- Onwosi, C.O., Odimba, J.N., Igbokwe, V.C., Nduka, F.O., Nwagu, T.N., Aneke, C.J., Eke, I.E. Principal component analysis reveals microbial biomass carbon as an effective bioindicator of health status of petroleum-polluted agricultural soil. *Environmental Technology*, 2020, 41(24): 3178–3190. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2019.1603252>
- Oulehle, F., Tahovská, K., Chuman, T., Evans, C.D., Hruška, J., Růžek M., Bárta, J. Comparison of the impacts of acid and nitrogen additions on carbon fluxes in European conifer and broadleaf forests. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 884-893. ISSN 02697491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.081>
- Owagboriaye, F., Dedeke, G., Bamidele, J., Aladesida, A., Isibor, P., Feyisola, R., Adeke, M. Biochemical response and vermiremediation assessment of three earthworm species (*Alma millsoni*, *Eudrilus eugeniae* and *Libyodrilus violaceus*) in soil contaminated with a glyphosate-based herbicide. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105678. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.10.5678>
- Panzarino, O., Hyrsl, P., Dobes, P., Vojtek, L., Vernile, P., Bari, G., Terzano, R., Spagnuolo, M., de Lillo, E. Rank-based biomarker index to assess cadmium ecotoxicity on the earthworm *Eisenia andrei*. *Chemosphere*, 2016, 145: 480–486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.077>

- Parri, S., Campani, T., Conti, V., Cai, G., Romi, M., Casini, S., Zari, R., Caldini, F., Marsili, L. New olive-pomace fertilizer tested with a 2-tiers approach: Biomarkers on *Eisenia fetida*, physiochemical effects on *Solanum lycopersicum* and *Olea europaea*. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119915. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119915>
- Pedro, P.M., Cullen Jr, L., Prado, F., Uezu, A., Piper, R., Faria, C.M.A., Knogge, C., Razzolini, M.T.P., Paiva, M.B., Dropa, M., Silva, M., Rech, T.C., Puttker, T. Ecological monitoring using Collembola metabarcoding with extremely low bycatch amplification. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111202>
- Peres, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L., Cluzeau, D. Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia*, 2011, 54: S77–S87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015>
- Pižl, V. Žížalovití (Annelida: Lumbricidae) CHKOP Křivoklátsko. *Bohemia centralis*, 2011, 31: 237–242.
- Pižl, V. Distribution of earthworms (Lumbricidae) in Bohemian Switzerland. In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. *Sandstone Landscapes*. Academia, Praha, 2007, p. 147–150.
- Pižl, V. Společenstva žížalovitých (Lumbricidae) vybraných mokřadních ekosystémů v povodí Odry a Moravy. In: Kovařík, P., Machar, I. (eds.) *Mokřady 2000*. Sborník z konference při příležitosti 10. výročí vzniku CHKO Litovelské Pomoraví. Správa CHKO ČR a Český Ramsarský výbor, Olomouc, 2000, p. 227–229.
- Pižl, V. Earthworm communities in hardwood floodplain forests of the Morava and Dyje Rivers as influenced by different inundation regimes. *Ekológia (Bratislava)*, 1999a, 18: 199–206.
- Pižl, V. Earthworm succession in abandoned fields - a comparison of deductive and sequential approaches to study. *Pedobiologia*, 1999b, 43: 705–712.
- Pižl, V. Žížaly (Oligochaeta, Lumbricidae) Krkonoš. In: Sarosiek, J., Štursa, J. (eds.), *Geoekologické problémy Karkonoszy*. Tom II. Poznaň, 1998, p. 115–120.
- Pižl, V., Starý, J. The effects of mountain meadows management on soil fauna communities (on example of earthworms and oribatid mites). *Silva Gabreta*, 2001, 7: 87–96.
- Pižl, V., Starý, J., Tajovský, K. Půdní fauna na dně inverzních roklí v Národním parku České Švýcarsko. *Sborník Oblastního muzea v Mostě, řada přírodovědná*, 2014, 35/36: 31–42.
- Pižl, V., Tajovský, K. Vliv letní povodně na půdní makrofaunu lužního lesa v Litovelském Pomoraví. In: *Krajina, voda, povodeň*. Sborník Správy chráněných krajinných oblastí České republiky, 2, SCHKO Praha, 1998, p. 47–54.
- Pižl, V., Rusek, J., Starý, J., Tajovský, K. Půdní fauna – modelové skupiny. In: Papáček M. (ed.): *Biota Novohradských hor: modelové taxony, společenstva a biotopy*. Jihočeská universita, České Budějovice, 2004, p. 177–183.
- Plattau Arenhardt, T.C., Vitorino, M.D., Martins, S.V. Insecta and Collembola as bioindicators of ecological restoration in the Ombrophilous Dense Forest in Southern Brazil. *Floresta e Ambiente*, 2021, 28(4): e20210008. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0008>
- Popelářová, E., Voříšek, K., Strnadová, S. Relations between activities and counts of soil microorganisms. *Plant, Soil and Environment*, 2008, 54(4): 163–170. ISSN 12141178. <https://doi.org/10.17221/390-PSE>
- Porazinska, D.L., Duncan, L.W., McSorley, R., Graham, J.H. Nematode communities as indicators of status and processes of a soil ecosystem influenced by agricultural management practices. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(1): 69–86.

- [http://dx.doi.org/10.1016/S0929-1393\(99\)00018-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0929-1393(99)00018-9)
- Porazinska, D.L., McSorley, R., Duncan, L.W., Graham, J.H., Wheaton, T.A., Parsons, L.R. Nematode community composition under various irrigation schemes in a citrus soil ecosystem. *Journal of Nematology*, 1998, 30(2): 170–178, 1998.
- Potapov A.M., Chen T.-W., Striuchkova A.V., Alatalo J.M., Alexandre D., et al. Global fine-resolution data on springtail abundance and community structure. *Scientific Data*, 2024, 11: 22. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02784-x>
- Potapov A.M., Guerra C.A., van den Hoogen J., Babenko A., Bellini B.C., et al. Globally invariant metabolism but density-diversity mismatch in springtails. *Nature Communications*, 2023, 14: 674. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36216-6>
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., Rutgers, M. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(5): 529-538, ISSN 1877-3435. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
- Ritz, K., Black, H.I.J., Campbell, C.D., Harris, J.A., Wood, C. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1212-1221, ISSN 1470-160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.02.009>
- Rusek, J., Starý, J., Tajovský, K., Pižl, V. Dlouhodobý půdně – zoologický výzkum v CHKO Jeseníky. In: *Campanula, Sborník referátů, z konference k 35. výročí CHKO Jeseníky (1969 – 2004)*, Jeseník, 2005, p. 28–33.
- Růžek, L., Voříšek, K., Strnadová, S., Nováková, M., Barabasz, W. Microbial characteristics, carbon and nitrogen content in cambisols and luvisols. *Plant, Soil and Environment*, 2004, 50(5): 196-204. ISSN 12141178. <https://doi.org/10.17221/4022-PSE>
- Růžek, L., Voříšek, K., Vráblíková, J., Strnadová, S., Vráblík, P. Chemical and biological characteristics of reclaimed soils in the Most region (Czech Republic). *Plant, Soil and Environment*, 2003, 49(8): 346-351. ISSN 12141178. <https://doi.org/10.17221/4135-PSE>
- Sakchoowong, W., Nomura, S., Ogata, K., Chanpaisaeng, J. Diversity of pselaphine beetles (Coleoptera: Staphylinidae: Pselaphinae) in eastern Thailand. *Entomological Science*, 2008, 11(3): 301–313, 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1479-8298.2008.00281.x>
- Sharafatmandrad, M., Khosravi Mashizi, A. Shrublands Ground-Dwelling Arthropods: Their Response to Management. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction A-Science*, 2021, 45(4): 1237–1245. <http://dx.doi.org/10.1007/s40995-021-01146-9>
- Shen, W., Zhu, N., Cui, J., Wang, H., Dang, Z., Wu, P., Luo, Y., Shi, C. Ecotoxicity monitoring and bioindicator screening of oil-contaminated soil during bioremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 124: 120–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.10.005>
- Sobucki, L., Ramos, R.F., Meireles, L.Ar., Antonioli, Z.I., Seminoti Jacques, R.J. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2021, 45: e0210109. <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcs20210109>
- Song, J., Yuan, L., Liu, X., Liu, Y., Wang, Z., Chen, Q., Zhang, Z., Long, Z., Lin, J., Yin, X. Nematode structure and its indication in natural selenium-rich paddy soil of Gulping City, Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Chinese Science Bulletin-Chinese*, 2022, 67(6): 537–547. <http://dx.doi.org/10.1360/TB-2021-0118>
- Starý, J. Půdní roztoči – pancířníci (Oribatida). In: Jongepierová I. (ed.): *Louky Bílých Karpat, Grasslands of the White Carpatians Mts. ZO ČSOP Bílé Karpaty*, 2008, p. 214–216.

- Starý, J. Pancířníci (Acari: Oribatida) CHKO Blanský les, Jižní Čechy. *Sborník Jihočeského muzea v Českých Budějovicích, Přírodní vědy*, 2006, 46: 207–219.
- Starý, J. Pancířníci (Acari: Oribatida) Moravskoslezských Beskyd, Česká republika. *Časopis slezského muzea, Opava (A)*, 1993, 42: 259–266.
- Starý, J. Pancířníci (Acari: Oribatida) některých vrchovišť na Šumavě, Jižní Čechy. *Sborník Jihočeského muzea v Českých Budějovicích, Přírodní vědy*, 1988, 28: 99–107.
- Sterzynska, M., Pižl, V., Tajovský, K., Stelmaszczyk, M., Okruszko, T. Soil Fauna of Peat-Forming Wetlands in a Natural River Floodplain. *Wetlands*, 2015a, 35: 815–829. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0672-0>
- Sterzynska, M., Tajovský, K., Nicia, P. Contrasting responses of millipedes and terrestrial isopods to hydrologic regime changes in forested montane wetlands. *European Journal of Soil Biology*, 2015b, 68: 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.03.005>
- Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B.G., Orgiazzi, A., Creamer, R.E. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Applied Soil Ecology*, 2016, 97: 12–22, ISSN 0929-1393. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.005>
- Suthar, S., Singh, S., Dhawan, S. Earthworms as bioindicator of metals (Zn, Fe, Mn, Cu, Pb and Cd) in soils: Is metal bioaccumulation affected by their ecological category? *Ecological Engineering*, 2008, 32(2): 99–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.10.003>
- Šantrůčková, H. Mikrobiologická biomasa jako ukazatel biologické aktivity půdy. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1993a, 39(9): 779–788. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:6741c3c0-4f4e-11ed-84d6-0050568d9066>
- Šantrůčková, H. Respirace půdy jako ukazatel její biologické aktivity. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1993b, 39(9): 769–778. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:65400050-4f4e-11ed-84d6-0050568d9066>
- Šantrůčková, H. Zdroje chyb při stanovení mikrobiální biomasy fumigační metodou. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1992a, 38(11): 893–898. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:1b1584d0-542d-11ed-84d6-0050568d9066>
- Šantrůčková, H. Microbial biomass, activity and soil respiration in relation to secondary succession. *Pedobiologia*, 1992b, 36(6): 341–350. ISSN 00314056. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(24\)00762-5](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(24)00762-5)
- Šantrůčková, H., Šimek, M. Effect of soil CO₂ concentration on microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*. 1997, 25(3): 269–273. ISSN 0178-2762. <https://doi.org/10.1007/s003740050313>
- Šantrůčková, H., Straškraba, M. On the relationship between specific respiration activity and microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(6): 525–532. ISSN 00380717. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(91\)90109-W](https://doi.org/10.1016/0038-0717(91)90109-W)
- Šantrůčková, H., Kurbatova, J.A., Shibistova, O.B., Smejkalova, M., Uhlirova, E. Short-Term Kinetics of Soil Microbial Respiration — A General Parameter Across Scales? Online. In: Binkley, D. a Menyailo, O. (ed.). *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, s. 229–246. ISBN 1-4020-3445-8. https://doi.org/10.1007/1-4020-3447-4_13
- Šantrůčková, H., Šimek, M., Křišťůfek, V. The initial response of soil microorganisms to soil aeration following anoxic incubation. *Pedobiologia*. 1996, 40(2): 186–192. ISSN 00314056. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(24\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(24)00352-4)
- Šantrůčková, H., Heinemeyer, O., Kaiser, E.-A. The influence of soil compaction on microbial

- biomass and organic carbon turnover in micro-and macroaggregates. *Geoderma*, 1993, 56(1-4): 587-598. ISSN 00167061. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90137-A](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90137-A)
- Šimek, M., Šantrůčková, H. Vliv skladování půdních vzorků na mikrobiální biomasu a její aktivitu. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1999, 45(9): 415-419. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:a9deddf0-50c8-11ed-a10b-005056822549>
- Šimek, M., Cooper, J.E., Pícek, T., Šantrůčková, H. Denitrification in arable soils in relation to their physico-chemical properties and fertilization practice. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1): 101-110. ISSN 00380717. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00137-6)
- Šimek, M., Makarova, N.M., Šantrůčková, H., Azarova, T.S. Vliv zvýšeného draselného hnojení na mikroflóru v půdě pod jarním ječmenem. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1993, 39(3): 193-202. ISSN 0370-663X. Dostupné z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:fb1ffab0-6fee-11ed-8442-5ef3fcd9a7>
- Šimonovič, V., Šimonovičová, A. Some production-ecological and microbiological characteristics of floodplain forests in the Morava river inundation area. *Ekológia (Bratislava)*. Bratislava: Slovak Academic Press, 1999, 18(4), p. 341. ISSN 1335-342X. Dostupné z: <https://dikda.snk.sk/uuid/uuid:7b2734a9-2b4e-4cf3-bd3c-eab5859bb0ae>
- Škoda, M., Ruzek, L., Dusek, L., Hofman, J., Sixta, J. Mineralization activity of microbial biomass in reclaimed soils in comparison with empirical mathematical model. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1997, 43(4): 179-186. ISSN 0370-663X. Dostupné také z: <https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:36f40501-0ec7-11e4-a8ab-001018b5eb5c>
- Šourková, M., Frouz, J., Fettweis, U., Bens, O., Hüttel, R.F., Šantrůčková, H. Soil development and properties of microbial biomass succession in reclaimed post mining sites near Sokolov (Czech Republic) and near Cottbus (Germany). *Geoderma*, 2005, 129(1-2): 73-80. ISSN 00167061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.032>
- Tajovský, K. Suchozemští stejnonožci (Isopoda: Oniscidea) CHKO a BR Křivoklátsko. *Bohemia centralis*, 2011, 31: 275–283.
- Tajovský, K. Mnohonožky (Diplopoda). In: Jongepierová I. (ed.): *Louky Bílých Karpat, Grasslands of the White Carpatians Mts.* ZO ČSOP Bílé Karpaty, 2008a, p. 221–223.
- Tajovský, K. Stonožky (Chilopoda). In: Jongepierová I. (ed.): *Louky Bílých Karpat, Grasslands of the White Carpatians Mts.* ZO ČSOP Bílé Karpaty, 2008b, p. 219–220.
- Tajovský, K. Dosavadní poznatky o mnohonožkách (Diplopoda) a stonožkách (Chilopoda) na území Šumavy. In: Mánek J (Ed.): *Aktuality šumavského výzkumu*. Sborník z konference, Srní 2.-4. dubna. 2001a, p. 173–175.
- Tajovský, K. Millipede succession in abandoned fields. In: Wytwer J, Golovatch S (Eds.): *Progress in Studies on Myriapoda and Onychophora*. Fragmenta faunistica, 43 (Suppl.), Warszawa, 2000, p.361–370.
- Tajovský, K. Mnohonožky (Diplopoda), stonožky (Chilopoda) a suchozemští stejnonožci (Oniscidea) vybraných aluviálních ekosystémů střední a severní Moravy (Litovelské Pomoraví a Poodří). In: Kovařík P, Machar I (eds.): *Mokřady 2000*. Sborník z konference při příležitosti 10. výročí vzniku CHKO Litovelské Pomoraví. Správa CHKO ČR a Český Ramsarský výbor, 2000b, p. 230–232.
- Tajovský, K. Impact of inundations on terrestrial arthropod assemblages in Southern Moravian floodplain forests, the Czech Republic. *Ekológia (Bratislava)*, 1999, 18: 177–184.
- Tajovský, K. Diversity of terrestrial isopods (Oniscidea) in flooded and nonflooded ecosystems of Southern Moravia, Czech Republic. *Israel Journal of Zoology*, 1998, 44(3-4): 311–322.

- Tajovský, K. Mnohonožky (Diplopoda) Krkonoš. In: Sarosiek, J., Štursa, J. (eds.): *Geoekologické problémy Karkonoszy*. Tom II. Poznań, 1998b, p. 9–13.
- Tajovský, K. Terrestrial arthropods (Oniscidea, Diplopoda, Chilopoda) of the Labské pískovce Protected Landscape Area (North Bohemia, Czech Republic). In: Pižl V, Tajovský K (eds.): *Soil Zoological Problems in Central Europe*. Proc. 4th CEWSZ. České Budějovice, 1998c, p. 235–242.
- Tajovský, K. Společenstva mnohonožek (Diplopoda) a suchozemských stejnoonožců (Oniscidea) Velké kotliny v Hrubém Jeseníku (Česká republika). *Entomofauna Carpathica*, 1996, 8: 158–166.
- Tajovský, K., Štrichelová, J., Tuf, I.H. Terrestrial isopods (Oniscidea) of the White Carpathians (Czech Republic and Slovakia). *ZooKeys*, 2018, 801: 305–321. <https://doi.org/10.3897/zookeys.801.24133>
- Tajovský, K., Wytwer, J. Millipedes and centipedes in wetland alder stands in north-eastern Poland. *Soil Organisms*, 2009, 81(3): 761–772. Dostupné z: <https://soil-organisms.org/index.php/SO/article/view/220>
- Tesařová, M., Šimek, M. Rhizosphere Microflora of Managed Grasslands. In: *Interrelationships between Microorganisms and Plants in Soil*, Proceedings of an International Symposium Liblice. Developments in Soil Science. Elsevier, 1989, s. 307–313. ISBN 9780444989222. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70230-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70230-7)
- Tesařová, M., Řepová, A. Microbial biomass of a grassland soil as estimated by the fumigation and direct counting methods. *Folia Microbiologica*, 1984, 29(2): 189–192. ISSN 0015-5632. <https://doi.org/10.1007/BF02872936>
- Tomášek, M., Knotková, E. Mikrobiologická aktivita půd na zvětralinách čedičů a příbuzných hornin, stanovená metodou respirace. Rostlinná výroba. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1970, 16(8): 861–876. ISSN 0370-663X. Dostupné z: [https://kramerius-](https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:abf546a0-1a69-11ed-9097-005056822549)
[dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:abf546a0-1a69-11ed-9097-005056822549](https://kramerius-dnnt.nkp.cz/uuid/uuid:abf546a0-1a69-11ed-9097-005056822549)
- Tsiafouli, M.A., Thébault, E., Sgardelis, S.P., de Ruiter, P.C., van der Putten, W.H., et al. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 2015, 21: 973–985. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>
- Uhlířová, E., Šimek, M., Šantrůčková, H. Microbial transformation of organic matter in soils of montane grasslands under different management. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(3): 225–235. ISSN 09291393. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.08.002>
- Úlehlová, B. Resources of soil fertility in grasslands. *Ekológia* (Bratislava). Bratislava: Slovak Academic Press, 1990, 9(2), p. 193–206. ISSN 1335-342X. Dostupné z: <https://dikda.snk.sk/uuid/uuid:2becbc99-1471-4f69-89ae-3fc5713b8465>
- van Agtmaal, M., Straathof, A.L., Termorshuizen, A., Lievens, B., Hoffland, E., de Boer, W. Volatile-mediated suppression of plant pathogens is related to soil properties and microbial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 164–174, ISSN 0038-0717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.015>
- van Groenigen JW, Lubbers IM, Vos HM, Brown GG, De Deyn GB, van Groenigen KJ. 2014. Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Sci Rep*. 4:6365.
- VanStraalen, N.M., Verhoef, H.A. The development of a bioindicator system for soil acidity based on arthropod pH preferences. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(1): 217–232. <http://dx.doi.org/10.2307/2404860>
- Vraný, J. Respiration and microflora of the rhizosphere soil of wheat influenced by foliar application of urea. *Folia Microbiologica*, 1983, 28(2): 118–123. ISSN 0015-5632. <https://doi.org/10.1007/BF02877367>
- Wardle, D.A., Barker, G.M., Bonner, K.I. and Nicholson, K.S. Can comparative approaches based on plant ecophysiological traits predict the nature of biotic interactions and

- individual plant species effects in ecosystems?. *Journal of Ecology*, 1998, 86: 405-420
- Wessen, E., Hallin, S. Abundance of archaeal and bacterial ammonia oxidizers - Possible bioindicator for soil monitoring. *Ecological Indicators*, 2011, 11(6): 1696–1698. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.018>
- Wolejko, E., Jablonska-Trypuc, A., Wydro, U., Butarewicz, A., Lozowicka, B. Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides - A review. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.006>
- Wytwer, J., Tajovský, K. Centipedes in the spruce forests of the Moravskoslezské Beskydy Mountains, Czech Republic. In: Tajovský K, Schlaghamerský J, Pižl V (Eds.): *Contributions to Soil Zoology in Central Europe I*. ISB AS CR. České Budějovice, 2005, p. 211–215.
- Zhao, F., Xu, K., He, Y. Application of the Ludox-QPS method for estimating ciliate diversity in soil and comparison with direct count and DNA fingerprinting. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 49: 112–118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.002>
- Zheng, W., Hou, S., Chen, Y., Ge, C., Ni, B., Zheng, X., Chen, H., Zhao, T., Wang, A., Ren, N. Removal and assessment of cadmium contamination based on the toxic responds of a soil ciliate Colpoda sp. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 474: 134762. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134762>
- Zhou, D., Ning, Y., Wang, B., Wang, G., Su, Y., Li, L., Wang, Y. Study on the influential factors of Cd²⁺ on the earthworm *Eisenia fetida* in oxidative stress based on factor analysis approach. *Chemosphere*, 2016, 157: 181–189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.045>

Používané zkratky institucí:

ČZU	Česká zemědělská univerzita v Praze
JČU	Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
MENDELU	Mendelova univerzita v Brně
ÚHÚL	Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem
UK	Univerzita Karlova v Praze
ÚKZÚZ	Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno
ÚPBB	Ústav půdní biologie a biogeochemie Akademie věd České republiky, v. v. i., České Budějovice
VÚMOP	Výzkumný ústav monitoringu a ochrany půdy, v. v. i., Praha
VÚRV	Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Praha
Recetox MUNI	Recetox, ústav Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity, Brno