

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra zoologie a rybářství



Půdní fauna antropogenně ovlivněných půd

Bakalářská práce

Autor práce: Lenka Němcová

Veřejná správa v zemědělství a krajině

Vedoucí práce: Ing. Jakub Hlava, Ph.D.

© 2019 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Půdní fauna antropogenně ovlivněných půd" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 18.04.2019

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkoval(a) panu Ing. Jakobovi Hlavovi, Ph.D. za veškerou pomoc, rady, náměty a postřehy, které mi při zpracování této práce poskytl. Panu Ing. Františkovi Dragomirovi, za ochotu, umožnění přístupu na popílkoviště a poskytnutí podkladových informací k nim. A nakonec mé rodině za veškerou podporu a trpělivost, a mojí sestře navíc za obětování volného času na pomoc při sbírání vzorků.

Půdní fauna antropogenně ovlivněných půd

Souhrn

Tato bakalářská práce se zabývá půdní faunou na rekultivovaných plochách v severozápadních Čechách. Jako plochy pro extrahování půdních bezobratlých, byla vybrána dvě bývalá odkaliště popílku z elektrárny Tušimice. Obě plochy mají stejný základ, a v časovém odstupu na nich byla provedena rekultivace. V první - teoretické části práce jsou popsány druhy půdní fauny, které je možné v antropogenně ovlivněných půdách nalézt, a také jejich význam pro půdu. V druhé – praktické části jsou poté popsána a porovnána obě odkaliště. Je vyhodnocena rozmanitost, zastoupení a početnost půdních bezobratlých na základě indexů diverzity a podobnosti, QBS indexu a QBS-e indexu pro společenstva žížal na těchto plochách.

Odběry půdních vzorků a žížal probíhaly v květnu, červnu, červenci a říjnu roku 2018. Půdní fauna byla vyextrahována pomocí Tullgrenových extraktorů, poté determinována pod binolupou a roztríděna do příslušných taxonů. Žížaly byly sbírány metodou ručního sběru, v laboratoři poté determinovány a zváženy.

Výsledky ukázaly, že nejčastějšími zástupci půdní fauny byli jedinci z řádů Acari, Oribatida a Collembola. Nejvíce bylo nalezeno 17 řádů půdních bezobratlých na lokalitě Vysočany a 14 řádů na odkališti Tušimice. Na obou plochách převládala dominance vždy minimálně jednoho z uvedených řádů. Největší diverzita společenstev byla na jaře (květen) na lokalitě Tušimice a v červnu na lokalitě Vysočany. Podobnost druhového složení obou odkališť se podle indexů podobnosti společenstev pohybovala kolem 85 %, resp. 73 % (podle Sørensenova, resp. Jaccardova indexu). V biologické kvalitě půdy založené na mikroarthropodech a Collembola si lépe vedly Vysočany. Stanovení QBS-e indexu ukázalo, že na obou lokalitách popílkovišť je třída kvality půdy hodnocena jako „špatná“ pro společenství žížal. Ve Vysočanech byly nalezeny žížaly druhů *Aporrectodea caliginosa*, *Aporrectodea rosea*, *Aporrectodea sp.* a *Aporrectodea longa* o celkovém počtu 25 jedinců. V Tušimicích nebyl nalezen ani jeden zástupce žížalovitých.

Vybraná stanoviště poskytovala některým druhům půdní fauny příznivé podmínky pro život, pro další rozvoj by však bylo zapotřebí delšího období sukcese. Nové postřehy na vývoj půdních společenstev na podobných stanovištích by mohl přinést další podrobný výzkum.

Klíčová slova: půdní fauna, diverzita, odkaliště, rekultivace, společenstvo, žížaly

Soil fauna in anthropogenic land

Summary

This bachelor thesis deals with soil fauna on reclaimed areas in northwestern Bohemia. Two areas of fly ash landfills from the Tušimice power station were selected as areas for extracting soil invertebrates. Both areas have the same basis, and reclamation has been carried out on them. In the first - theoretical part of the thesis the types of soil fauna that can be found in anthropogenically influenced soils, and its importance for soil are described. In the second - practical part, there are described and compared both fly ash landfills. On these places, the diversity and abundance of soil invertebrates were evaluated based on the indices of diversity and similarity, the QBS (Soil Biological Quality) index, and the QBS-e index based on earthworms.

Samples of soil and earthworms were collected in May, June, July and October 2018. Soil fauna was extracted by Tullgren extractors, determined under binocular microscope and sorted into appropriate taxons. Earthworms were collected by use of hand sorting method, then identified into species and weighed in the laboratory.

The results showed that individuals of the order Acari, Oribatida and Collembola were the most frequent representatives of soil fauna. Most found was 17 orders of soil invertebrates in the locality Vysočany and 14 orders in the fly ash landfill reclamation Tušimice. On both localities dominated always at least one of the above-mentioned orders. The largest diversity of communities was in the spring (May) in the Tušimice and in June in the Vysočany site. The similarity of the species composition of these two fly ash landfills was, according to the community similarity indices, around 85 %, respectively 73 % (according to Sørensen and Jaccard index respectively). Soil Biological Quality index based on microarthropods and Collembola was higher at Vysočany site, as well as QBS-e index based on earthworms. Determining the QBS-e index showed that the soil quality class is rated "bad" for the earthworm communities at both fly ash landfills. However, it was found 25 representatives of earthworms from species of *Aporrectodea caliginosa*, *Aporrectodea rosea*, *Aporrectodea sp.* and *Aporrectodea longa* in the Vysočany; and no earthworm individual was found in the Tušimice site.

Selected habitats should provide favourable living conditions for some species of soil fauna, however, a longer succession period is needed for further development. Next detailed research could bring new insights into the development of soil communities at similar habitats.

Keywords: Soil fauna, Diversity, Fly ash landfill, Reclamation, Community, Earthworms

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Rozdělení půdní fauny.....	3
3.1.1	Mikrofauna	3
3.1.1.1	Prvoci (Protozoa).....	3
3.1.1.2	Hlístice (Nematoda)	4
3.1.1.3	Vířníci (Rotifera).....	5
3.1.1.4	Želvušky (Tardigrada).....	5
3.1.2	Mezofauna	5
3.1.2.1	Roztoči (Acari), pancířníci (Oribatida)	6
3.1.2.2	Chvostoskoci (Collembola).....	6
3.1.2.3	Hmyzenky (Protura).....	7
3.1.2.4	Vidličnatky (Diplura)	7
3.1.2.5	Stonožky (Symphyla)	7
3.1.3	Makrofauna/ Megafauna.....	7
3.1.3.1	Mnohonožky (Diplopoda).....	8
3.1.3.2	Stonožky (Chilopoda).....	8
3.1.3.3	Stejnonožci (Isopoda).....	9
3.1.3.4	Škvoři (Dermaptera).....	9
3.1.3.5	Třásnokřídli (Thysanoptera).....	10
3.1.3.6	Pavouci (Araneae)	10
3.1.3.7	Blanokřídli (Hymenoptera)	11
3.1.3.8	Polokřídli (Hemiptera)	12
3.1.3.9	Dvoukřídli (Diptera) - larvy	12
3.1.3.10	Brouci (Coleoptera).....	13
3.1.3.11	Žížaly (Lumbricina)	13
3.2	Význam půdní fauny	14
3.3	Rekultivované plochy, a jejich současné využití – obecně.....	16
3.4	Půdní fauna antropogenních půd.....	18

4	Materiál a metody	21
4.1	Charakteristika odběrných míst	21
4.1.1	Klimatické poměry odkališť Vysočany a Tušimice	21
4.1.2	Odkaliště (popílkoviště) Vysočany	21
4.1.3	Odkaliště (popílkoviště) Tušimice	22
4.2	Postup odběru vzorků	23
4.2.1	Determinace půdní fauny	23
4.3	Postup odběru vzorků žížal	23
4.4	Zpracování (hodnocení) dat	24
4.4.1	Indexy diverzity	24
4.4.2	Indexy podobnosti.....	25
4.4.3	QBS index	25
4.4.4	QBS-e index pro společenstva žížal.....	26
5	Výsledky	27
5.1	Odkaliště Vysočany	27
5.2	Odkaliště Tušimice	29
5.3	Porovnání odkališť Vysočany a Tušimice	31
5.3.1	Simpsonův index diverzity.....	31
5.3.2	Shannon – Wienerův index	31
5.3.3	Margalefův index druhové pestrosti.....	31
5.3.4	Sørensenův index podobnosti a Jaccardův index	31
5.3.5	Soil Biological Quality index (QBS index).....	32
5.3.6	QBS-e index pro společenstva žížal.....	32
6	Diskuze	34
7	Závěr	36
8	Seznam literatury	37

1 Úvod

Důležitost půdy je nepopíratelná, bez ní by neexistoval život v takové podobě, jaký jej dnes známe. Už v pravěku lidé sbírali divoce rostoucí rostliny, což časem přerostlo v organizované obdělávání – zemědělství. Pro člověka je tedy jednou z nejdůležitějších vlastností půdy úrodnost. Z ekonomického hlediska je to výrobní faktor, bez kterého nelze nic vyrobit ani získat. Bohužel jej máme omezené množství, o to více bychom si ho měli vážit a pečlivě zvažovat jeho využití. Půda je zdrojem surovin a energie, je to prostor, na kterém lidé staví svá obydlí, nebo jej přetváří k různým účelům (rekreační, hospodářské a další využití).

Avšak většina z nás si neuvědomuje, že součástí půdy jsou organismy, bez kterých by půda byla jen mrtvou zónou, na které bychom těžko něco pěstovali a tím jí mohli lépe využít. Některé organismy svou činností upravují fyzikálně-chemické vlastnosti půdy (například žížaly), další díky svému metabolismu zajišťují rozklad organické hmoty a tím zvyšují její úrodnost.

Dnes v podstatě nenajdeme na Zemi místo, které by nebylo ovlivněno lidskou činností. Existuje i celá řada ploch, které jsou narušené lidskou činností, a které musely ustoupit například těžbě dřeva a nerostných surovin (zejména uhlí), ukládání odpadu či zaplavování. Tato území se nazývají antropogenní a život původních populací je na nich narušen nebo zcela zničen. Jednou z takových ploch jsou i odkaliště popílku po těžbě uhlí. Jedno z největších území povrchové těžby v České republice se nachází v severozápadních Čechách, v Ústeckém kraji. Proto jsem se v této práci zaměřila na rekultivované plochy bývalých odkališť popílku z elektrárny Tušimice, které se nacházejí v Tušimicích a Vysočanech. Pro obě místa jsou v budoucnu plánovaná kulturně – rekreační využití pro obyvatele. Pokusila jsem se tedy blíže popsat půdní faunu dvou rekultivovaných území odkališť a v rámci této práce porovnat druhové složení na obou plochách.

2 Cíl práce

Cílem této práce je seznámení s vybranými druhy půdní mikro, meso a makrofauny. Některé druhy půdní fauny byly následně vybrány k biologickému porovnání dvou rekultivovaných ploch původních odkališť. Z odebraných půdních vzorků byla poté hodnocena početnost vybraných druhů půdní fauny a byly stanoveny základní ekologické indexy na těchto lokalitách.

3 Literární rešerše

3.1 Rozdělení půdní fauny

Půda je samoorganizovaný ekologický systém, v němž se organismy vzájemně propojují. Mikroorganismy vytvářejí komunity a fyzické struktury v nejmenším měřítku (mikrony), následuje komunita jejich predátorů organizovaná v malých potravních sítích (desítky mikronů), funkční domény postavené ekosystémovými inženýry (centimetry na metry), ekosystémy a krajiny. Inženýři ekosystémů, což jsou zejména rostlinné kořeny, žížaly, termity a mravenci (makrofauna a megafauna), hrají klíčovou roli při vytváření stanovišť pro jiné organismy a kontrolují jejich činnost prostřednictvím fyzikálních a biochemických procesů. Biogenní, organické a organicko-minerální struktury, které produkují, se hromadí v půdním prostoru a vytvářejí mozaiky funkčních domén obývajících specifické komunity menších organismů (mikrofauna a mezofauna, mikroorganismy), které pohánějí procesy půdy specifickými cestami (Lavelle et al. 2016).

3.1.1 Mikrofauna

Mitter et al. (2013) uvádí, že přežití každého organismu na Zemi závisí na jeho interakcích s jinými organismy. Živočichové například vytvářejí spojení se střevní mikroflórou, zatímco rostliny rozvíjejí symbiotické asociace se sousedními rostlinami, mikroflórou a mikrofaunou. Většina spojení mezi rostlinami a mikroorganismy je zprostředkována organickými sloučeninami uvolňovanými rostlinami. Kořenový systém rostlin působí jako továrna a vylučuje obrovské množství chemických látek, které efektivně komunikují s okolními půdními organismy. Rostlinné a bakteriální/živočišné partnerství je efektivní jak pro zvýšení produkce biomasy, tak pro zvýšení obranyschopnosti rostlin. Jejich význam a účel v zemědělských systémech je stále podceňován. Například Guo et al. (2019) ve svém skleníkovém experimentu s kultivační směsí *Trifolium pratense* L. a *Lolium perenne* L. přidáním háďátka *Meloidogyne hapla* zjistili, že háďátka pozitivně ovlivnila vliv rostlinné vnitrodruhové diverzity na nadzemní biomasu *T. pratense*. Na druhou stranu však biomasa *L. perenne* nebyla háďátky ovlivněna. Ve studii Clarholm (1985) byla zkoumána schopnost bakterií a prvoků mineralizovat půdní dusík ve vzorcích sterilizované půdy. Do některých vzorků byly zasazeny rostliny pšenice. Přidání rostlin ovlivnilo transformaci dusíku. V neosázených půdních vzorcích, nebyla pozorována změna biomasy dusíku ani anorganického dusíku. Ve vzorcích pěstovaných s pšenicí se přidáním bakterií projevila mineralizace dusíku. Pokud byli přidáni prvoci, příjem dusíku rostlinou vzrostl o 75 %. Výsledky naznačují, že s energií dodanou kořeny rostlin mohou půdní bakterie mineralizovat dusík z půdní organické hmoty pro podporu jejich vlastního růstu. Bakterie jsou nezbytné k tomu, aby byla bakteriální biomasa dusíku k dispozici pro příjem rostlinami.

3.1.1.1 Prvoci (Protozoa)

Protozoa jsou mikroskopické organismy s vlastnostmi živočichů. Každý prvok obvykle existuje jako jediná nezávislá buňka a všichni Protozoa, kteří žijí volně, splňují definici

fagotrofických mikrobiálních eukaryot (Finlay & Esteban 2013). Protozoa jsou na bázi heterotrofní eukaryotické potravní sítě, a základním prvkem v mořských, sladkovodních i půdních ekosystémech, protože konzumují významnou část (obvykle více než 50 %) bakteriální produktivity. Zvyšují nutriční cykly a energetické toky ve prospěch mikroorganismů, rostlin a živočichů. Mají jedinečné fyziologické vlastnosti: zkonsumují více potravy, mají vyšší míru respirace na jednotku hmotnosti, mají kratší generace (životní cyklus), a rychleji se reprodukuje. Je známo, že na suchozemských stanovištích žije přibližně 1600 druhů prvoků (Foissner 1999).

3.1.1.2 Hlístice (Nematoda)

Nematoda jsou nejvíce specifickým kmenem Metazoa na zemi. Velké množství z nich parazituje na všech známých skupinách živočichů. Objevují se v půdách jako cizopasnici rostlin a vyskytují se v hojném počtu v extrémních podmínkách: od antarktických údolí až po bentickou zónu oceánu. Jsou velmi variabilní ve svých tělesných charakteristikách, přičemž každá skupina vykazuje morfologické přizpůsobení prostředí, které obývá. Formy obývající půdu jsou extrémně malé (Gardner 2013). Základní tvar těla hlístic je červovitý (niťovitý) krytý kutikulou, která se skládá z více vrstev. Pod kutikulou se nachází hypodermis (pokožka). Tělní dutinou je nečleněný, oboustranně souměrný pseudocoel mající čtyři hlavní podélné epidermální chordy, podélnou svalovinu, centralizovanou nervovou soustavu a protonefridiální vylučovací soustavu (Bird & Bird 1991). Gutierrez et al. (2016) ve své studii uvádějí, že mezi půdními organismy jsou hlístice považovány za nejslibnější kandidáty na bioindikaci zdraví půdy. Dostupné studie se zabývají zejména vlivem některých znečišťujících látek (jako jsou N, P, K, pH, SOM, CaCO₃, granulometrická frakce apod., Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu a Hg a léčivé přípravky a přípravky osobní hygieny, PPCPs).

Například studie účinků atmosférického znečištění Pb na hlístice žijící v mechu v průmyslové oblasti na řece Po v severní Itálii, při které byly vzorky mechů ovlivněné znečištěním Pb, odebrány každý měsíc po dobu jednoho roku z osmi míst. Celkem se odebralo a identifikovalo přibližně 15 000 vzorků. Komunita hlístic se ukázala být citlivá na znečištění Pb. Celková biomasa nematod, počet druhů a Shannonův index diverzity výrazně klesaly při zvýšení obsahu Pb v mechu. Hustota jedinců se však znečištěním nezdála být ovlivněna (Zullini & Peretti 1986).

Studie Blakely et al. (2002) se zabývala účinky komplexní směsi polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH) na složení a početnost půdních bezobratlých (hlístic, chvostoskoků a roztočů). Celkem bylo odebráno devadesát neporušených půdních vzorků během tří let z půdy, která byla kontaminována komplexní směsí PAH po dobu 50 let. Tato směs PAH ovlivnila půdní potravní síť. Předpokládá se, že hád'átka byla přímo ovlivněna PAH více než chvostoskoci nebo roztoči, a to z důvodu jejich těsného kontaktu s kontaminovanými půdními částicemi a propustnou kutikulou.

Volně žijící stadia *Steinernema kraussei* (Rhabditida), která jsou endoparazity *Cephalcia abietis* L. (Hymenoptera), jsou při hledání hostitelských nymf vystavena různým půdním podmínkám. Terénní studie a laboratorní experimenty ukázaly, že kyselost půdy hraje hlavní roli ve schopnosti nematod parazitovat nymfy *C. abietis*. V půdách smrkový lesů byly nalezeny pozitivní korelace mezi pH půdy, hustotou hád'átka a parazitovaným hmyzem. Kyselá půda

s hodnotami pH nižšími než 4 může omezit výskyt parazitických háďátek (Fischer & Führer 1990).

Ve studii van Kessel et al. (1989) byla izolována juvenilní stadia háďátek *Caenorhabditis elegans*, která byla chována v axenickém médiu obsahujícím různé koncentrace CdCl_2 . Růst organismů a reprodukce hlístic byla významně snížena s koncentrací $1 \mu\text{M CdCl}_2$. Při hladinách 160 a $320 \mu\text{M CdCl}_2$ byl růst časných juvenilních stadií opožděný, organismy nedosáhly pohlavní zralosti a nemohly se tedy reprodukovat.

3.1.1.3 Vířníci (Rotifera)

Tito drobní živočichové se vyznačují dvěma hlavními anatomickými znaky: prvním je na předním konci specializovaná oblast označovaná jako corona, a druhým znakem je mastax, což je svalnatý hltan, který obsahuje složitou sadu čelistí nazvanou trophi (Wallace & Snell 2009).

Patří k nejmenším ze sladkovodních živočichů, dosahují velikosti mezi 50 a $2000 \mu\text{m}$ a je známo přibližně $2\,500$ druhů. Vykazují různorodé morfologie, mají rozmanité strategie života a zabírají širokou škálu stanovišť. Jejich rozšíření zahrnuje mořské, brakické a sladké vody, stejně jako tenké vrstvy vlhkosti, které pokrývají suchozemské mechy a hydratované půdy. Jsou důležitým článkem mezi mikrobiální smyčkou a vyššími trofickými hladinami (Wallace & Smith 2009) Vířníci jsou skupinou půdních živočichů, která není běžně kvantifikována (Devetter 2010). V půdě jsou běžní především vířníci z třídy pijavenky, tvořící cca $80 - 90 \%$ populací, ale i pravidelně se vyskytující točivky. Převážná část z nich získává v půdě potravu způsobem charakteristickým pro tento kmen, a to pohybem brv vířivého orgánu – filtrací mikročástic z půdního roztoku (Devetter 2010).

3.1.1.4 Želvušky (Tardigrada)

Nelson et al. (2015) uvádí, že Tardigrada jsou malí živočichové, z nichž většina měří méně než 1 mm , zaujímají rozmanitá místa na sladkovodních, mořských a suchozemských stanovištích. Bývají nazýváni „vodními medvědy“ kvůli své pomalé, prkenné chůzi. Tito Lobopodi mají čtyři páry nohou, které jsou zakončené drápky. Želvušky mají kompletní trávicí trakt, hřbetní gonádu s jedním nebo dvěma gonodukty a hřbetní lalokovitý mozek s ventrálním nervovým provazcem a čtyřmi gangliemi. Vzhledem k charakteristickým rozložením populací Tardigrada je málo známá jejich populační dynamika a trofické vztahy. V průběhu života se u nich může objevit fáze kryptobiózy a diapauzy (Guidetti et al. 2011).

3.1.2 Mezofauna

Agregace půdy získala v posledních letech velkou pozornost; avšak ta byla zaměřena především na půdní mikroorganismy nebo větší půdní faunu, zejména žížaly. Dopad velké skupiny mikroarthropodů, např. Collembola, Acari apod., je v literatuře nedostatečně zastoupen, a proto je téměř neznámý (Maaß et al. 2015).

Půdní mezofauna se skládá z malých bezobratlých živočichů, kteří žijí v půdě a jsou citliví na klimatické podmínky, systémy řízení, pokrytí rostlinami a jiné fyzikální nebo chemické atributy půdy. Tyto organismy jsou aktivní při cyklování živin, protože fragmentují organickou hmotu, čímž se zrychluje mikrobiální rozklad (Zagatto et al. 2019).

3.1.2.1 Roztoči (Acari), pancířníci (Oribatida)

Jak uvádí Jeffery et al. (2010) roztoči jsou spolu s Chvostoskoky nejpočetnějšími arthropody v půdě. Jejich populace čítá tisíce, desetitisíce a někdy i stovky tisíc jedinců na metru čtverečním v daném prostředí. Jsou přítomni ve všech typech půd po celém světě, a to včetně extrémních arktických a antarktických půdních stanovišť, kromě toho je lze nalézt i v mikrohabitátech, kde je přítomna organická hmota. Acari žijí i v nadzemních ekosystémech jako paraziti živočichů nebo rostlin. Skupina roztočů Oribatida, kterou nacházíme dnes, je velmi podobná těm, kteří byli nalezeni jako fosilie na Devonských ložiskách. Přítomnost stejných forem roztočů po tak dlouhou dobu dokazuje vysokou relativní stabilitu ekologických podmínek v půdě, ale také vysokou hodnotu biologické rozmanitosti půdy (Gulvik 2007).

Rozměr těl roztočů je mezi 0,2 až 0,8 mm. Dospělí jedinci mají obvykle čtyři páry nohou a tělo uspořádané do dvou hlavních částí, jejichž segmentace je snížena a v některých případech jsou hlavní segmenty roztaženy. Povrch těla je zesílen (sklerotizován) a tvoří ochranu těla proti suchu a útokům dravců. Ústní část roztočů je velice proměnlivá a uzpůsobená převážně ke kousání, píchání, řezání nebo sání. Vzhledem k jejich edafickému životnímu stylu jsou převážně slepí, jen málo z nich má několik jednoduchých očí. U některých druhů se objevuje dorzální nepárová plocha, která reaguje na světlo. Jiné receptory jsou naproti tomu velmi dobře vyvinuty, například senzorké chloupky a pórovité nebo pohárkovité formace (Jeffery et al. 2010).

Roztoči jsou extrémně bohatý taxon, který se ekologicky dokáže přizpůsobit všem podmínkám prostředí na Zemi. Prozatím bylo popsáno více než 48 000 druhů, ačkoliv celkový počet se odhaduje na 400 000 až 900 000. Dravé druhy regulují svou kořist, parazitické a polo-parazitické druhy se živí na kořenech rostlin nebo na tělech živočichů (Paoletti et al. 2007). Saprofágní roztoči se živí se rozkládajícími se listy, dřevem, houbovými hyfami a výkaly jiných živočichů (Wallwork 1970). Většina druhů se podílí na rozkladu mrtvé organické hmoty. Z uvedeného vyplývá, že jsou velmi důležití pro biologickou indikaci (Paoletti et al. 2007).

Jejich činnosti pomáhají při vytváření půdní struktury a jejich rozmístění v půdě je ovlivněno abiotickými faktory, složením rostlinného společenstva a typem půdy (Wallwork 1970).

3.1.2.2 Chvostoskoci (Collembola)

Podle popisu Cipola et al. (2019) jsou Collembola malí suchozemští členovci podobní hmyzu, kteří mají tři tagmata, jeden pár tykadel a tři páry hrudních nohou. Odlišují se od ostatních šestinohých ve třídě Entognatha nepřítomností křídel a objevují se u nich tři zvláštní břišní přívesky: ventrální trubice, retinaculum a furcula.

Collembola se nacházejí v půdním prostředí kosmopolitně, dokonce i v Arktidě a Antarktidě. Jsou považováni za nejhojnější hexapody na Zemi. Existuje více než 6000 druhů chvostoskoků, a v jedné hrsti půdy může být stovka či tisíce jedinců, zastupujících stovky různých druhů. Některé druhy jsou lépe přizpůsobeny pro život v podestýlce a na povrchu půdy. Tito jedinci jsou obvykle pigmentovaní, mají relativně dlouhé končetiny a také šupiny nebo chlupy, které zabraňují ztrátě vlhkosti. Druhy, které žijí v hlubších půdních vrstvách, mají obvykle redukované oči a končetiny, také jim chybí pigmentace. Collembola jsou primárně

detritovoři a mikrobivoři, živí se plísněmi, hyfami a organickými zbytky. Spolu s hlísticemi jsou jedni z hlavních agentů biokontroly mikrobiální populace (Jeffery et al. 2010).

3.1.2.3 Hmyzenky (Protura)

Hmyzenky jsou nepigmentovaní půdní členovci. Délka jejich těla je v rozmezí od 0,2 až 2,6 mm v dospělosti. Podobají se hmyzu, ale každé tagma vykazuje výrazné modifikace. Kromě individuálně vytvrzených, nažloutlých pigmentovaných částí těla jsou živí jedinci téměř průsvitní a lze u nich pozorovat peristaltické pohyby střev. Obývají vlhké štěrbinu uvnitř půdy, lesní humus, mech, ale i povrch listů. Protura se nacházejí v oblastech po celém světě vyjma polárních oblastí. Dosud bylo popsáno 750 druhů (Koch 2009).

3.1.2.4 Vidličnatky (Diplura)

Koch (2009) uvádí, že Diplura je skupinou slepých, převážně nepigmentovaných půdních členovců, kteří, i když jsou často zařazováni do třídy hmyzu (Insecta), bývají v současnosti uznáváni spíše jako nejbližší příbuzní hmyzu. Vidličnatky jsou obecně považovány za primitivní Hexapoda, ale jejich obecná morfologie může být charakterizována jako přizpůsobení se životním podmínkám v půdních štěrbinách, např. prognátní hlavou; nepřítomností očí a pigmentace; měkkým prodlouženým dorzoventrálně zploštělým tělem. Důležitými taxonomickými znaky je také počet a uspořádání trichobotrií, detaily tykadel a cerci (párových přívěsků desátého zadečkového článku).

Diplura žijí v hlubších vrstvách půdy, nebo v její svrchní části. Mají kousací ústrojí, které naznačuje, že se jedná o dravce, obvykle jiných malých členovců, jako jsou chvostokoci, roztoči nebo hlístice a roupicovití, i když mohou také konzumovat plísně a mycelia a rostlinné zbytky. Jsou přítomni v řadě půd a biomů, preferují půdu s relativně vysokým a stabilním obsahem vlhkosti. Ačkoli nemají specifická omezení stanovišť, nikdy nedosahují vysoké hustoty. Celosvětově bylo popsáno kolem 800 druhů (Jeffery et al. 2010).

3.1.2.5 Stonoženky (Symphyla)

Jeffery et al. (2010) popisují stonoženky jako malou skupinu půdních stonožkovců. Připomínají stonožky, ale jsou menší a průsvitnější (bledší). Velikost těla je v rozmezí několika milimetrů. Mají dvanáct párů nohou, z nichž první pár je zmenšený. Na hlavě se nacházejí dlouhá segmentovaná tykadla a poslední část těla je štíhlá, postrádá nohy a má hedvábné žlázy na dvou plochých přívěscích. Živí se především rozkládající se vegetací a mikroorganismy. Lze je nalézt v půdě do hloubky cca 50 cm. Na celém světě je známo asi 200 druhů.

3.1.3 Makrofauna/ Megafauna

Makrofauna má hlavní vliv na houbové a bakteriální aktivity, a to jak přímo skrze krmení a průchod potravy trávicím traktem, tak nepřímo ovlivňováním mikrobiálního prostředí podestýlky a půdy (Anderson 1998).

Vliv makrofauny na akumulaci organických látek v půdě, hydrologické vlastnosti půdy, mikrobiální respiraci, mikrobiální biomasu, složení mikrobiální komunity a hustotu půdní

mezofauny byla studována Frouzem et al. (2006). Prokázali, že půdní makrofauna významně nezvyšovala mineralizaci uhlíku, ale zvýšila translokaci organické hmoty do minerální vrstvy. Akumulace organické hmoty v minerální vrstvě vedla k vyššímu mikrobiálnímu dýchání, větší biomase, a ke zvýšené retenci vody v půdě.

Smith et al. (2008) ve své studii ukázali, že řízení agro-environmentálních programů může významně ovlivnit jejich hodnotu pro půdní makrofaunu. Aby byli podpořeni bezobratlí, kteří mohou chybět v orné půdě, měly by se agro-environmentální režimy zaměřit na minimalizaci kultivace půdy a na rozvoj půdní povrchové vrstvy. To však může být v rozporu s jinými cíli těchto režimů, jako je například zvýšení rozmanitosti flóry a diverzity opylovačů.

3.1.3.1 Mnohonožky (Diplopoda)

Mnohonožky jsou členovci, jejichž velikost se pohybuje mezi 2 a 280 mm. Lze je snadno odlišit od ostatních suchozemských členovců, neboť na většině článků svého těla mají dva páry nohou. Výjimku tvoří první článek za hlavou, který nemá vůbec žádné přívěsky, a jen několik dalších segmentů, které mají pouze jeden pár nohou. Typické mnohonožky mají velmi prodloužená a pravidelně válcovitá těla, existuje však také mnoho druhů s ventrálně nebo dorsoventrálně zploštělým tělem. S výjimkou některých primitivnějších druhů je kutikula dobře sklerotizována a často prostoupena vápenatými solemi. Tito členovci vyvinuli několik mechanismů sebeobrany: někteří jsou schopni se stočit do spirály, někteří se stácejí v kuličku, malé primitivnější druhy mají delší chloupky chránící tělo před mravenci. Mohou také použít chemickou obranu za pomoci látek vylučovaných žlázami na boční straně těla. Diplopoda žijí převážně v horních vrstvách půdy, kde se živí rozpadajícími se listy a další odumřelou rostlinnou hmotou. Jejich výkaly tak přispívají k tvorbě koprogenního humusu. Obývají převážně podestýlku mírných, subtropických a tropických lesů, ale aby se snadněji srovnaly s ekologickými odchylkami a lépe se rozšiřovaly na nová stanoviště, vykazují některé mnohonožky partenogenezi, periodomorfózu nebo morfismus (Golovatch & Kime 2009). Dosud bylo popsáno přibližně 10 000 druhů. (Jeffery et al. 2010).

3.1.3.2 Stonožky (Chilopoda)

Jeffery et al. (2010) uvádí, že jejich velikost se může pohybovat v rozmezí od několika milimetrů do délky přibližně 30 cm. Tělo stonožek je protáhlé, složené z několika článků, z nichž každý má jeden pár nohou. První část těla má pár nohou přeměněn na kusadla, která mají jedové kanálky sloužící k lovu kořisti (obvykle to mohou být roztoči, chvostoskoci, háďátka apod.), ale v době hladovění se mohou také dočasně živit rostlinným opadem. I přes jejich hojný výskyt a časté setkání s lidmi, není jejich jed a jedový aparát zatím příliš dobře znám. Jedová žláza se skládá z četných epiteliálních sekrečních jednotek, z nichž každá má svůj vlastní jedinečný ventilový vylučovací systém (Undheim & King 2011). Vyvinuly se u nich dvě hlavní formy těla: větší druhy žijící obvykle blízko povrchu půdy v hnilém dřevu nebo v půdní skrývce, mají obvykle zploštělé tělo s nižším počtem článků a s delšími a silnějšími nohama umožňujícími velmi rychlý pohyb. Další jsou druhy, které se specializují na život v hlubších vrstvách půdy, přičemž jejich tělo je obvykle menší, užší, téměř válcové, mající velmi vysoký počet článků a malé, drobné nohy. Barvy edafických druhů jsou obecně bledší

a v některých případech mohou být úplně bez pigmentu. Chilopoda patří mezi nejstarší existující suchozemské členovce a jsou ekologicky významnou skupinou půdních a podestýlkových predátorů (Undheim & King 2011).

3.1.3.3 Stejnonožci (Isopoda)

Terestrické Isopody patří do podřádu Oniscidea, což je jediná skupina korýšů plně přizpůsobená životu na zemi. S více než 3600 druhy představují největší podřád Isopoda. Suchozemští stejnonožci jsou segmentovaní živočichové s pevným exoskeletem (obsahující uhličitán vápenatý a chitin) a kloubovými končetinami. Jejich délka se pohybuje přibližně od 1,5 mm do 60 mm, ale většina druhů nepřesahuje délku 20 mm (Jeffery et al. 2010).

Stejně jako u většiny korýšů je tělo Isopoda rozděleno do tří oddílů: hlavy, hrudníku a zadečku. Srůstem předního hrudního článku s hlavou vzniká hlavohruď (cephalothorax). Hruď se skládá ze sedmi volných článků, z nichž každý nese dvojici párových nohou (pereiopodů) sloužících k pohybu a pro zachycení kořisti. Poslední částí je zadeček (pleon), který se skládá z pěti volných článků a z posledního šestého článku: telsonu. Isopoda mají složené oči, dva páry tykadel a čtyři sady čelistí. První tykadla jsou využívána jako chemoreceptory a druhý pár tykadel má typickou hmatovou strukturu. Dalšími ústními orgány jsou čelisti, vysoce modifikované přívěsky fúzovaného prvního hrudního segmentu (Brusca 1997).

Suchozemští stejnonožci se vyskytují na všech druzích stanovišť, od přímořských oblastí až po vysoké hory, od lesů až po velmi suché oblasti polopouště až pouště (Jeffery et al. 2010). Živí se mrtvým organickým materiálem a jsou regulátory ekosystémových funkcí rozkladu a recyklace živin (Paoletti & Hassal 1999). V mnoha suchozemských ekosystémech hrají Isopoda důležitou úlohu v rozkladných procesech prostřednictvím mechanického a chemického rozkladu rostlin a zvyšováním mikrobiální aktivity. Jejich výkaly se vyznačují vysokým obsahem dusíku a poskytují příznivý substrát pro kolonizaci a růst mikrobiální populace (Zimmer 2002).

3.1.3.4 Škvoři (Dermaptera)

Rankin & Palmer (2009) popisují Dermaptera jako malý, relativně starý, hemimetaboózní řád hmyzu charakterizovaný ve vnější anatomii párovými cerci (kleštěmi) na zadní části a krátkými tegminy neúplně kryjícími zadní křídla. Některé druhy škvorů jsou v dospělosti bez křídel, ale většina z nich má krátká přední křídla (tegminy), která nepokrývají břicho. Odvození názvu se týká zesílených nebo kůži podobných předních křídel. Zadní křídla jsou na rozdíl od křídel jiných skupin hmyzu pŕlkruhová a membránová, s radiálně uspořádanými žilkami. Ve chvílích klidu je vějířovitě složí pod přední pár. Škvoři jsou pro člověka neškodní, jejich ústní části je nejsou schopny pokousat a také nejsou nositeli žádných patogenů. Některé rody jsou uváděny jako škůdci domů, zahrad a sadů. Jejich thigmotaktická povaha spojená s agregačními feromony, může vést k vysokým hustotám škvorů v domech a jejich okolí.

3.1.3.5 Třásnokřídli (Thysanoptera)

Řád Thysanoptera má lemovaná křídla a tvar těla podobný ostatním půdním mikroarthropodům. Jednotlivci této skupiny jsou obvykle jen asi 1 mm dlouzí a lze je nalézt v nadzemních i podzemních ekosystémech. V půdě se živí širokou škálou živých nebo rozpadajících se rostlinných a živočišných materiálů, obvykle perforují buněčné stěny a vysávají jejich obsah. Některé druhy mohou využívat jako zdroje potravy spory hub, řasy nebo pyl. Další mohou být predátorské nebo parazitické (např. na půdních roztočích). Řád zahrnuje celou řadu druhů, kteří jsou významnými škůdci komerčních rostlin a také přenašeči onemocnění. Hustota třásnokřídlych je velmi variabilní; v dobrých environmentálních podmínkách se jejich počet může exponenciálně zvýšit během krátké doby. Doposud bylo na celém světě popsáno asi 5000 druhů (Jeffery et al. 2010).

Mound (2009) dále uvádí, že podřád třásněnky má jedinečná asymetrická kusadla zahrnující pouze jednu čelist. Mnoho druhů třásněnek vykazuje složité vzorce chování, včetně námluv, bojů a eusociality.

3.1.3.6 Pavouci (Araneae)

Pavoukovci jsou jen vzdáleně příbuzní jiné hlavní pozemské artropodní skupině: hmyzu, a představují oddělený evoluční přechod od mořského k suchozemskému životu, protože jejich nejbližší žijící příbuzní jsou mořští ostrepi (Xiphosura) a nohatky (Pycnogonida). Pavouci mohou být snadno odlišeni od jiných pavoukovců výrazným zúžením, které dělí tělo na prosoma (hlavohruď) a opisthosoma (zadeček). Ačkoli jsou pavouci méně různorodí než hmyz, obývají téměř všechna pozemská prostředí s dostatkem kořisti. Pavouci jsou jedineční mezi členovci ve využívání pavoučích vláken ve všech fázích života. Vlákna jsou produkována v břiše ve specializovaných žlázách. Každý druh pavouků vytváří jiný typ vláken (Gillespie & Spagna 2009).

Jeffery et al. (2010) popisují pavouky jako velmi mobilní dravce, kteří se živí téměř všemi obyvateli půdy včetně nematodů, žížal a různých skupin půdních členovců. Araneae jsou dobře přizpůsobeni dravému životu: mají obvykle dlouhé nohy, dobře vyvinuté oči a chelicery přizpůsobené predaci, stejně jako schopnost produkovat jed.

Na celém světě je více než 4 000 rodů a 46 000 popsáných druhů pavouků. Prakticky všechny z nich mají jedové žlázy, které pomáhají při chytání kořisti i obraně. Toxicita těchto jedů se významně liší. Pouze relativně malý počet druhů představuje závažné zdravotní problémy pro člověka a domácí zvířata. Ze 113 čeledí pavouků, pouze 23 zahrnuje druhy zdravotně-veterinárního významu (Mullen & Vetter 2019).

Větší druhy se vyskytují většinou na povrchu půdy (nebo podestýlce), často se ukrývají pod kameny a dřevem. Někteří si vyhrabávají díry v půdě, ze kterých pak chytají kořist. V půdě nalezneme také malé druhy, které obývají její póry a dutiny. Pavouci se hojně vyskytují téměř na všech typech stanovišť. V některých prostředích může být přítomno až 200 jedinců na m² půdy (Jeffery et al. 2010).

3.1.3.7 Blanokřídlí (Hymenoptera)

Blanokřídlí jsou hlavním řádem holometaboózního hmyzu. Jejich zástupci podstupují úplnou metamorfózu s odlišnými stádii vajíček, larev, pupalů a dospělců. Je to možná jeden z nejbohatších druhů hmyzu mírných podnebných pásů. Vzhledem k tomu, že Hymenoptera jsou velmi velký řád, se značným počtem biologii a strategií života, mají velký počet taxonů. Hymenoptera obecně prochází pěti fázemi instarů, v endoparazitických taxonech je jejich počet obvykle menší (Quicke 2009).

Reed & Landolt (2019) uvádějí, že mravenci, včely a vosy, jakožto sociální hmyz, jsou známí svým sklonem k bodání na obranu sebe a svých kolonií. Většina blanokřídlič používá své žihadlo (modifikované kladélko) ke kladení vajíček. Druhy, u kterých hrozí časté pobodání, jsou převážně včely, sršně, vosíci, a ohniví mravenci. Jed těchto druhů je komplexní směsí sloučenin, které vyvolávají bolest, lokalizovaný otok a erytémy u obratlovců. Každá z těchto skupin vykazuje chování, které udržuje soudržnost kolonií a přispívá k jejich přežití, například získáváním potravy, obranou, odchovem larev a reprodukcí.

Velikost mravenců se pohybuje v rozmezí od 0,75 do 53 mm. Většina druhů je zbarvená do červena nebo do černa a jen několik druhů je žlutých, zelených nebo s kovovým leskem.

Mravenci tvoří kolonie, které mají od několika desítek jedinců žijících v malých přirozených dutinách, až po vysoce organizované kolonie, které mohou zabírat velká území a sestávat z milionů jednotlivců. Wilsonova definice (Wilson 1971) uvádí, že mravenci (společně s termity a některými druhy vos, včel a mšic) mohou být považováni za eusociální hmyz, jejichž společenskou organizaci charakterizuje přítomností tří důležitých podmínek: reprodukční dělba práce (s konkrétními jednotlivci oddanými reprodukci a často téměř celková sterilita ostatních členů kolonie (Gadagkar 2019)), soužití více než dvou generací žijících v hnízdě a kooperativní péče o mladé. Obecně platí, že v koloniích mravenců existují tři různé kasty: dělnice (sterilní samice bez křídel), královny (plodné samice) a trubci (plodní samci). Kolonie jsou někdy popisovány jako superorganismy, protože mravenci působí jako sjednocená entita, společně spolupracují na podpoře kolonie (Jeffery et al. 2010).

Da Costa-Milanez et al. (2017) zjistili, že spolu s termity, červy a jinými bezobratlými, tyto organismy podporují tvorbu kanálků, pórů a agregátů, které ovlivňují pohyb plynů a vody v půdním profilu.

Mravenci ovlivňují fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy. Účinky na fyzikální půdní vlastnosti jsou spojeny s budováním chodeb, které zvyšují pórovitost půdy a způsobují rozdělení půdních částic. Chemické změny půdy jsou zprostředkovány hlavně posunem pH směrem k neutrálním hodnotám a zvýšením obsahu živin (většinou dusíku a fosforu). Účinky na biologické vlastnosti půdy se mohou projevit zvýšením nebo snížením mikrobiální aktivity, která je ovlivněna akumulací organické hmoty, vnitřní teplotou hnízda a zejména vlhkostí (Frouz a Jílková 2008).

Ve studii Eubanks et al. (2019) zdokumentovali sto padesát druhů mravenců na mršině. Krmením se na jatečně upravených tělech přímo ovlivňovali jejich rozklad. Nepřímo je ovlivňovali predací na mršině žijících se bezobratlých. Navzdory tomu, že mravenci byly všudypřítomní, je jejich role v ekologii rozkladu naprosto nedostatečná.

3.1.3.8 Polokřídli (Hemiptera)

Sedlák (2005) uvedl, že této řád spojuje dřívější řády Homoptera (stejnokřídli) a Heteroptera (ploštice). Bodavě savé ústní orgány, sloužící k sání rostlinných i živočišných tekutin, jsou přiložené ke spodní straně hlavy a směřují nejčastěji šikmo dozadu (hypognátní nebo opistognátní poloha).

Podřád Heteroptera je jednou z nejrozmanitějších skupin hmyzu. Někteří jsou draví, další se živí rostlinami a mohou být vážnými škůdci. Do tohoto podřádu jsou zahrnuty ploštice, štěnice domácí a další hmyz, který může šířit Chagasovu nemoc. Velikost tohoto hmyzu se pohybuje v délce od jednoho milimetru do více než 8 cm a šířky od milimetru do několika centimetrů. Vyskytují se ve všech barvách a kombinacích barev, včetně drahokamových kombinací zlata nebo zelené na duhově fialovém pozadí. Žijí v různých biotopech od půdy po lidská obydlí. Ploštice mají proměnu nedokonalou (neexistuje stádium kukly, a nymfy vypadají velmi podobně jako dospělci) (Schaefer 2013).

Většina druhů polokřídliých se živí mizou rostlin, což dává tomuto řádu hmyzu značný význam v zemědělství, a to jak přímým poškozením rostlin, tak přenosem virových chorob rostlin. Na druhé straně někteří Hemiptera prospívají zemědělství tím, že se živí škůdci. Několik druhů saje krev obratlovců, což dokazuje jejich zdravotní a veterinární význam (Dolling 1991).

3.1.3.9 Dvoukřídli (Diptera) - larvy

Sedlák (2005) popsal larvy tohoto řádu následovně: nemají končetiny a podle stupně redukce hlavové schránky mohou být eucefalní, hemicefalní anebo acefalní. Žijí ve vodě, v zemi, v rostlinných i živočišných tkáních. Kukla je mumiová i volná, a nakonec je obalená ztvrdlou poslední larvální exuvií – pupariem. Dospělci řádu Diptera mají pouze první pár křídel vyvinutý. Druhý pár je zakrnělý a změněný v kyvadélka. Tykadla mají tříčlánková nebo mnohočlánková, a ústní orgány jsou bodavě či lízavě savé.

Dvoukřídli jsou skupinou známých druhů hmyzu, která zahrnuje komáry, černé mouchy, pakomáry, octomilky a mouchy domácí a dalších přibližně 150 000 doposud popsanych druhů. Tento řád je různorodý nejen druhovým bohatstvím, ale také strukturální rozmanitostí, ekologickými návyky a ekonomickým významem (Merritt et al. 2009).

Jeffery et al. (2010) uvedli, že larvy Diptera jsou ekologicky velmi heterogenní, jsou dravé, parazitární, všežravé, koprofágní, fytofágní nebo saprofágní, živí se rozkládající se organickou hmotou. Mohou tak zásadně přispět k fragmentaci a rozkladu mrtvého organického materiálu. Vzhledem k jejich velkému množství a biomase, slouží larvy Diptera také jako důležitá kořist dravců. V některých typech půd, jako jsou například vlhké a zamokřené louky nebo smíšené lesní porosty, jsou jednou z nejdůležitějších částí potravinových řetězců rozkladačů (Elmer et al. 2004). Půdní organická hmota, která projde trávicím traktem larev, není pouze rozložená, ale může být ovlivněná její pH a stát se více neutrální. Proto výkaly larev podporují enzymatickou aktivitu, přispívají k fermentačním procesům v organických vrstvách půdy a ovlivňují tak biologické a fyzikálně-chemické procesy (Martin & Marinissen 1993).

3.1.3.10 Brouci (Coleoptera)

Brouci jsou reprezentováni několika druhy s velmi odlišnou potravní specializací. Mezi dravými druhy jsou nejpočetnější drabčíkovití (Staphylinidae), z nichž někteří jsou přizpůsobeni pro život v hlubších půdních vrstvách. Těla euedafických druhů se podobají chvostoskokům, hmyzenkám nebo jiným mikroarthropodům. Nemají oči, mají velmi krátké nohy a další přívěsky. Specializovaní detritofágové jsou skupinou, která tráví svá larvální stádia v půdě. Nejznámější z této skupiny jsou četné druhy chrobáků, kteří se živí trusem býložravců. Zahrabávají ho do půdy, kde slouží jako potrava pro larvy. Další skupinou jsou saprofágní brouci, jejichž larvy se živí mrtvými těly živočichů. Jsou schopni zahrabat mrtvá těla (až do velikosti malých savců) do půdy a opět tak přispět k rozkladu a recyklaci organické hmoty. Larvy mnoha druhů brouků (čeledí vrubounovití, roháčovití, kovaříkovití, nosatcovití, mandelinkovití, tesaříkovití atd.) jsou známé jako bílé ponravy nebo drátovky a obývají půdu nebo půdní povrch. Krmí se na kořenech rostlin nebo na rozpadajícím se organickém materiálu (většinou na dřevě nebo podestýlce) (Jeffery et al. 2010).

Sedlák (2005) uvedl, že tělo brouků je většinou silně sklerotizované. Pronotum (hřbetní povrch předohrudi) je vyvinuto do tvaru štítu. Přední pár křídel mají přeměněné v krovky a druhý pár je blanitý, někdy zakrnělý. Ústní orgány jsou kousací.

3.1.3.11 Žížaly (Lumbricina)

Žížaly mají několik hlavních systematických rysů a to, že jsou bilaterálně symetrické, externě segmentované s odpovídajícím vnitřním článkováním. Nemají žádnou kostru, a na všech segmentech těla, vyjma prvních dvou, z tenké pigmentované kutikuly vyrůstají štětinky. Strukturálně, mají žížaly velkou tělesnou dutinu obsahující coelomocyt (Edwards & Bohlen 1995). Nervová soustava je tvořena hlavovou uzlinou, podjícnovou uzlinou a břišní nervovou páskou probíhající pod trávicí trubicí (Pižl 1996). Žížaly mají uzavřenou cévní soustavu se třemi hlavními cévami: hřbetní cévou a dvěma ventrálně položenými cévami (Pižl 1996; Jelínek a Zicháček 2007). Lumbricina dýchají celým povrchem těla za pomoci husté sítě jemných podkožních vlásečnic. Sliz, který se nachází na povrchu jejich těl, pomáhá také při výměně plynů (Jelínek a Zicháček 2007; Pommeresche et al. 2010). Žížaly mají schopnost regenerace zadní části těla, pokud o ni přijdou. Přední část vyloučí sliz a přejde do klidového stádia, aby se zregenerovala (Pommeresche et al. 2010).

Podle Jeffery et al. (2010) lze žížaly rozdělit do tří samostatných ekologických skupin na základě jejich prostorového rozložení v půdě:

Epigeické druhy - žijí na povrchu půdy, v opadaných listech, ve vrstvách humusu, hnoji, kompostu a někdy v prvních několika centimetrech půdy. Jsou obecně malé, měří 1 - 5 cm na délku. Jsou důležité při promíchávání a biodegradaci organické hmoty. Nevytvářejí žádné nebo jen pár nor a živí se rozkládající se podestýlkou na povrchu půdy (Jeffery et al. (2010). Mají krátký životní cyklus, který je vyvážen vysokou reprodukční rychlostí. Přežívají sucho ve fázi kokonu. Bývají vystaveny velmi vysoké predaci (Kula a Švarc 2011).

Většina druhů žížal je neutrofilní, vyhovuje jim tedy pH půdy v hodnotách 6 – 7. Za další méně významné faktory, které mohou ovlivnit jejich výskyt, lze považovat obsah kyslíku, oxidu uhličitého, utužení půdy, světelné záření (hlavně UV), koncentrace solí, atd. (Pižl 2002). Pro

žížaly je také důležitá půdní vlhkost, a to zejména jako prevence proti vyschnutí. Žížaly mají k dispozici různé mechanismy a způsoby, kterými regulují ztrátu vody (například migrují na vlhčí místa nebo vyvinuli modifikaci životního cyklu, tzv. kokonizaci, což znamená, že jedinec přečká suché období v klidu, ve stádiu kokonu), tyto jsou však celkem málo výhodné. Přesto je však tolerance žížal ke ztrátě vody velmi vysoká. Optimální vlhkostní podmínky pro tyto půdní inženýry se pohybují v rozsahu 40 – 60 % maximální vodní kapacity půdy. Pro žížaly žijící v Evropě je limitující pokles půdní vlhkosti na cca 20 % (Pižl 2002).

Anektické druhy - žijí ve stálých, svislých chodbách, které jsou spojeny s povrchem půdy a mohou být 5 - 6 m dlouhé. Anektické druhy jsou obecně nejdelšími žížalami, jsou 10 - 110 cm dlouhé. Objevují se na povrchu půdy, obvykle během noci, aby se živily mrtvým organickým materiálem (rozkládající se podestýlkou, listy) Jeffery et al. (2010). Mají relativně dlouhý životní cyklus i délku života. Pokud se dostanou na povrch, jsou vystaveny velkému predačnímu tlaku, jinak jsou chráněny v systémech svých chodeb. Nepříznivé podmínky, jako je například období sucha, přečkávají ve fázi kviescence (Kula a Švarc 2011).

Endogeické druhy - žijí v půdě, téměř nikdy se nedostanou na povrch půdy. Tyto druhy jsou obecně střední až velké, o délce těla 1 - 20 cm. Živí se půdou a odvozují svou výživu od humifikované organické hmoty v půdě. Vyrábějí dočasný horizontální systém nor, které vyplňují svým trusem Jeffery et al. (2010). Pro tyto druhy žížal je charakteristická střední délka životního cyklu. Nejsou vystaveny velkému predačnímu tlaku a období sucha přečkávají ve fázi diapauzy (Kula a Švarc 2011).

Tuto skupinu živočichů můžeme charakterizovat jako půdní, ekologické inženýry, kteří svou činností přebudovávají a výrazně ovlivňují jednotlivé ekosystémy, v nichž se vyskytují. Žížaly mají vliv na půdní strukturu, pedogenezi, rozklad organické hmoty a koloběh živin (Pižl 2002).

3.2 Význam půdní fauny

Změny biodiverzity v půdě vyvolané globálními změnami jsou výsledkem přímých dopadů změny teploty a vlhkosti. Nepřímo pak prostřednictvím posunů v dodávkách živin z rostlin. Invazivní rostliny a živočichové zvyšují složitost těchto dlouhodobých procesů. Zvýšení složitosti potravinové sítě v půdě by mělo zajistit lepší „zdraví“ (tj. lepší recyklaci živin) v agroekosystémech. Budoucí účinky půdních biot a půdních procesů při globální změně klimatu zahrnují změny v evoluci a zachytávání hlavních skleníkových plynů a jejich vzájemného působení s rezistentní organickou hmotou v půdě. Zvyšování nároků na ekosystémové služby, narůstání tlaku lidské populace, vyžaduje inovativní myšlení a výzkum (Coleman et al. 2018).

Wardle et al. (2004) a Lavelle et al. (2006) jsou přesvědčeni, že půdní biota reguluje četné ekosystémové procesy. Její činnosti poskytují množství základních ekosystémových služeb, jako je např. stabilizace půdy, vytváření a obnovování úrodnosti půdy, poskytování živin pro růst rostlin, rozkládání organické hmoty, kontrolu škůdců a patogenů rostlin a živočichů, úprava hydrologického cyklu (včetně zmírňování povodní a kontroly eroze) či filtrování vody. Rostliny, půdní biota a jejich konzumenti jsou pevně spjatí. Půdní organismy jsou stále více uznávány pro svůj vliv na všeobecné ekologické funkce, jako je produktivita, rychlost rozkladu, vzorce biologické rozmanitosti a globální změny (Wall 2005). Biologická rozmanitost půdy

ovlivňuje ekosystémové procesy ve všech ekosystémech, suchozemských i vodních, včetně atmosféry, regulací toku CO₂ a sekvestrací uhlíku v půdách. Pochopení toho, jak se bude měnit biologická rozmanitost půdy a v důsledku toho globálně ovlivňovat fungování ekosystémů jako např. úrodnost půd, to je důležitý úkol pro tvůrce politik a členy veřejnosti, kteří potřebují rozvíjet a zavádět strategie pro budoucnost (Wall 2005).

Mikrofauna v půdě podporuje několik funkcí ekosystému. Její nejznámější funkcí je podpora koloběhu živin konzumací různých potravinových zdrojů a uvolňováním živin přes jejich exkrementy (Frouz 2018). Většina mikroorganismů se živí bakteriemi, houbami a mrtvým rostlinným materiálem. Přitom mohou regulovat velikost populace a aktivitu půdních mikrobů a mohou podpořit konkurenceschopnost a šíření prospěšných mikrobiomů rhizosféry selektivní pastvou na škodlivém půdním mikroorganismu. Mikrofauna, která žije v rhizosféře rostlin, může také ovlivnit produktivitu, složení rostlin a změnu produkce rostlinných hormonů a jejich obranu. Velikost populace a různorodost mikrofauny může být řízena od shora dolů jinými půdními bionty, a zdola nahoru hostitelskou rostlinou a jejími mutualismy, nebo prostřednictvím konkurenčních interakcí (Wall et al. 2012).

Pavao-Zuckerman (2008) uvádí, že heterogenita půdního prostředí podporuje velmi vysokou rozmanitost bakterií, hub a mikroskopických a makroskopických půdních živočichů. Rozmanitost půdních organismů je patrná také v jeho funkčních charakteristikách, přičemž organismy ovlivňují vlastnosti ekosystému, od půdních fyzikálních charakteristik až po dynamiku živin. Trofická interakce v půdních potravinářských sítích řídí mnoho z těchto ekosystémových funkcí.

Ve své studii Menta et al. (2014) o obnovování půdy v důlním lomu „La Speranza“, která probíhala v Itálii od roku 2008 do roku 2012, prokázali postupné zlepšování půdní úrovně, kdy se během studie objevily i edafické organismy, které jsou spojovány se stabilními podmínkami v půdě např. Symphyla, Protura, Chilopoda. Těžba způsobuje značné škody na životním prostředí: odstraněním vrchních vrstev půdy dochází ke ztrátě struktury a funkčnosti s následným snížením biodiverzity. Půdní společenstva jsou důležitá pro tvorbu půdy, přispívají ke zlepšení vlastností půdy a hrají klíčovou úlohu v mnoha procesech, které zvyšují úspěch obnovy. Půdní fauna je špatně monitorována a popsána (Coleman et al. 2018), i když představuje dobrý nástroj pro hodnocení kvality půdy.

Např. cílem studie George et al. (2017) bylo zhodnotit rozdíly mezi komunitami mesofauny, zejména Acari a Collembola, napříč různými typy stanovišť a půd, jakož i úrovně organických látek a jejich vztahy s charakteristikami půdy. Na 658 lokalitách ve Walesu byly odebrány půdní vzorky. Na nich bylo měřeno složení rostlinné komunity, určil se typ půdy, byly stanoveny fyzikální a chemické proměnné, včetně pH, celkového C a N. Množství mesofauny bylo trvale nejnižší v orných lokalitách a nejvyšší v nížinných lesích. Populace Oribatida byla nejmenší v minerálních půdách a korelovala se všemi vlastnostmi půdy s výjimkou obsahu vlhkosti. Výskyt Collembola a Mesostigmata byl nejnižší v horských rašelinných stanovištích, pravděpodobně z důvodu negativního ovlivnění zvýšenými hladinami vlhkosti. Tyto skupiny měly také nízké populace ve vřesovištích, což se projevilo nízkými hodnotami diverzity. Studie tedy ukázala, že je možné účinně identifikovat rozdíly ve struktuře komunit mesofauny a korelací s vlastnostmi půdy.

Coleman et al. (2018) uvádí, že makrofauna, včetně hmyzu, jako jsou mravenci a termiti, je „bioturbátory“ (hybateli) půdy. Žížalám je v posledních 30 letech přisuzován ještě větší

význam a jsou považovány za primární „ekosystémové inženýry“ zásadně ovlivňující rozklad rostlinných a mikrobiálních zbytků. Úloha žížal v prostředí modifikovaném člověkem a v přírodním prostředí je prostřednictvím bioturbačního působení zásadní v tom, že je půda biologicky, chemicky a fyzicky pozměněna; živiny jsou přemísťovány; organická hmota se rozkládá a transformuje; a okolní biota interaguje. Žížaly zde zvyšují mikrobiální aktivitu a obecně stimulují růst rostlin (Cunha et al. 2016).

3.3 Rekultivované plochy, a jejich současné využití – obecně

Nejvýstižnějším pojmem vyjadřujícím v našem pojetí rekultivační proces je německý termín Wiedernutzbarmachung, který lze přeložit do češtiny jako „znovuzvyžitelnění“. Vzhledem k jeho těžké výslovnosti, se u nás (ale i v jiných zemích) vžil termín rekultivace. Působení člověka na krajinu lze vyjádřit humanizací či kultivací krajiny, přičemž dle povahy vlivů lze rozlišovat krajiny původní, kultivované, degradované a devastované. Objektem rekultivace je krajina devastovaná. V České republice se jedná převážně o místa, která byla dotčena různými druhy těžby (ať už hlubinné, či povrchové). Při volbě optimálního způsobu rekultivace jsou zpravidla zvažovány alternativy jako: zemědělská, lesnická, hydrologická, rekreační, včetně řady ostatních způsobů využití devastovaných území. Současná legislativní úprava rekultivační povinnosti je konkretizována zákonem č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), podle něhož je těžební organizace povinna zajistit sanaci (která obsahuje i rekultivace podle zvláštních zákonů) všech pozemků dotčených těžbou (Štýs et al. 2014).

Štýs et al. (2014) dále uvádějí, že za vývojově nejstarší lze považovat snahy o vrácení hlubinnou těžbou devastovaných pozemků k původnímu účelu, tj. zemědělskému využití, a to již na přelomu 19. a 20. století. V období mezi první a druhou světovou válkou se upřednostňovaly především lesnické rekultivace. Po roce 1945 až skoro do osmdesátých let převažovaly rekultivace pro obnovu půdního zemědělského fondu a souběžně rostly rekultivace lesnické a rekreační. Od devadesátých let minulého století se začal klást důraz na ekologické a rekreační aspekty, což lze chápat jako mix všech známých způsobů s preferováním lesů, vod a rekreace. V zemědělství je to především pak uplatňování trvalých travních porostů. Se snižováním těžby především uhlí, například vyčerpání suroviny v určité lokalitě, se vytvořily podmínky pro hydrologické rekultivace, kdy se zaplavují zbytkové jámy. V současné době jsou často žádaná využívání výsypek jako stavenišť a část území je ponechána bez zásahu přirozenému přírodnímu vývoji, jedná se o takzvanou renaturalizaci.

Feng et al. (2019) se ve svém výzkumu vyjadřují o tom, že povrchová těžba uhlí má řadu dopadů na půdní zdroje a tím se vytváří obrovský tlak na ekologické prostředí. Odklizení skrývky, těžba, přeprava, skládkování a navážka mají různé vlivy na fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy. Rekonstruovaná krajina navíc vytváří zvýšenou prostorovou heterogenitu těžných půd. Rostoucí obavy z negativních dopadů těžby zdůraznily význam rekultivace důlních půd. Byly zkoumány mechanismy těžby uhlí a rekultivace, které ovlivňují půdní vlastnosti; a byl popsán vývoj půdy v rekultivacích s důrazem na vlastnosti rekultivovaných lokalit. Hlavní závěry tohoto výzkumu byly:

- Náhodnost navážky půdy zvýšila heterogenitu vlastností důlních půd, což zvýšilo složitost rekultivačních postupů.

- Negativní nebo pozitivní důsledky těžebních a rekultivačních procesů na rekultivované těžební půdy je třeba rozpoznat vědeckými pozorováními, jako například analýzou půdních vlastností a půdní chronosekvence, na nichž je založena praxe rekultivace důlních půd.
- Pět fází rekultivace (tj. geomorfologická modelace, rekultivace půdy, hydrologická stabilita, obnova vegetace a přestavba krajiny) by mělo být považováno za komplexní systém rekultivace těžebních půd.
- Uplatňování nových technologií (např. přetvoření mikro - terénu a nedestruktivní detekce půdy) a nové studie (např. systematické studie, přestavba stanovišť pro živočichy a výzkum biologické rozmanitosti) by zlepšily nové koncepty rekultivace půdy a ekologickou obnovu v těžebních oblastech.

Globální problémy, kterým čelí lidstvo ve 21. století (například nedostatek potravin, změny klimatu, biologická rozmanitost, kvalita vody, odlesňování tropických oblastí, a chudoba) lze řešit prostřednictvím rekultivace půdy a krajiny, neboť je pro člověka zásadní žít v symbióze a harmonii s přírodou. Rekultivace půdy a krajiny je nezbytná pro posílení funkcí a služeb ekosystému. Mezi základní principy rekultivace krajiny patří kontrola eroze půdy, snižování ztráty vody a živin, izolování uhlíku, posílení biogeochemických cyklů, řízení pH půdy a vyvážení soli, zvyšování biokomplexity (pestrost, složitost a organizovanost živé složky) a vytváření půdy potlačující onemocnění. Technologie rekultivace krajiny musí zahrnovat realizaci obnovy půdy na úrovni krajiny, harmonizaci ekologických efektů se současnými a budoucími populačními a sociálními změnami, a využití tradičních poznatků. Zavedení vegetačního krytí, rozumné hospodaření s vodou, recyklace rostlinných živin a vytvoření vyvážené výživy rostlin jsou důležité pro obnovu krajiny. Dlouhodobé plánování je nezbytné pro udržitelné využívání konečných zdrojů a poskytování základních ekosystémových služeb. Koncentrace a kvalita organického uhlíku v půdě je důležitá pro obnovu krajiny a ekosystémových funkcí (Lal 2015).

Na druhou stranu existují i názory, že je lepší přirozená obnova namísto provádění rekultivací. Například Prach (2009) se ve svém článku zabývá tím, že je v České republice praktická ekologicky podložená (přírodě blízká) obnova zatím málo přijímána. Příčinu vidí ve špatně nastavených ekonomických a legislativních mechanismech a v malém nebo žádném ekologickém vzdělání mnoha lidí odpovědných za rozmanité rekultivace, revitalizace a dotace do nich. Technicky prováděná „obnova“ někdy bývá ekonomicky výhodná pro konkrétní firmy, nikoli však pro společnost jako celek. Místo úspor se financují formou různých dotací nevhodné rekultivace, špatně realizované revitalizace říčních systémů apod. Přes svůj velký potenciál je spontánní sukcese v ČR alespoň dodatečně uznána jako dobrá cesta obnovy ekosystému jen v méně než asi 0,05 % rozlohy narušených stanovišť, jako jsou těžební prostory, výsypky, opuštěná pole, okraje silnic a industriální a stavební plochy. Potenciál pro spontánní obnovu má však zhruba 95 % těchto stanovišť.

Půda je důležitá jako součást fungování suchozemských ekosystémů, uvedli Aksoy et al. (2017). Jsou přesvědčeni, že největší část půdní biodiverzity se přímo nebo nepřímo spoléhá na půdu. Samotná půda je stanovištěm velké rozmanitosti organismů. Schopnost půdy hostit takovou pestrost velmi souvisí s jejími fyzikálně-chemickými vlastnostmi a rysy prostředí. Vzhledem ke složitosti půdy a biologické rozmanitosti je však obtížné určit jasný a jednoznačný vztah mezi environmentálními parametry a biotou půdy. Rostoucí rozšiřování

integrovanějšího pohledu na ekosystémy a zejména rozvoj konceptu ekosystémových služeb zdůrazňuje potřebu lépe porozumět úloze, kterou hrají půdy při nabízení těchto služeb, včetně poskytování biotopů. Posouzení schopnosti půd hostit biologickou rozmanitost by přispělo k hodnocení kvality půdy, aby pomohlo tvůrcům politik při rozvoji vhodných a udržitelných činností řízení. Zatím však heterogenita půdy představuje překážku pro tvorbu rozsáhlého rámce, který přímo propojuje půdní rysy s organismy, kteří v něm žijí.

3.4 Půdní fauna antropogenních půd

Bach & Wall (2018) uvádějí, že půda je domovem asi jedné čtvrtiny všech živých druhů na Zemi. Biologická rozmanitost půdy je ústředním bodem udržení života na Zemi, včetně lidského. Tyto organismy produkují potravu, filtrují vodu a regulují globální cykly uhlíku a živin. Lidé se spoléhají na půdní organismy a na jejich interakce pro podporu kultury a obživy; lidská činnost však půdu ohrožuje. Jak lidstvo postupuje v období Antropocénu, potřebuje biologickou rozmanitost půdy, aby byly podpořeny ekosystémy, na nichž jsou závislí.

Frouz (2018) ve svém článku uvedl, že půdní fauna zkonsumuje značné množství podestýlky a v některých ekosystémech tak může zkonsumovat celý roční opad. Účinnost asimilace fauny může dosáhnout 50 %, ale obvykle je mnohem menší. Půdní fauna může ovlivnit dynamiku půdní organické hmoty nejen asimilací podestýlky, ale také úpravou půdního prostředí v mnoha prostorových měřítkách. Zpracování podestýlky živočichy má obvykle za následek krátkodobé zvýšení mikrobiální aktivity ve výkalech, tato aktivita poté klesá tak, že se výkaly mohou dlouhodobě rozkládat mnohem pomaleji než původní podestýlka. Během průchodu trávicím traktem půdní fauny dochází k úpravám zahrnujícím: fragmentaci, konzumaci asociovaných mikroorganismů, změny pH a oxidačně – redukční změny, odstranění snadno rozkládajících se polysacharidů, zvýšení podílu ligninu, snížení rozpustných polyfenolů a poměru dusíku s uhlíkem. Ve větším měřítku ovlivňuje půdní fauna vyluhování a uvolňování částic organické hmoty. Živočichové také ovlivňují distribuci organické hmoty v půdním profilu a určují, zda se podestýlka bude rozkládat na povrchu půdy nebo to, jak se částice organické hmoty váží na částice půdy, což podstatně ovlivňuje mikrobiální společenství a rychlost rozkladu. Fauna ovlivňuje množství organických látek vstupujících do půdní organické hmoty (závisí na kvalitě podestýlky a obsahu uhlíku v půdě), může také změnit půdní profil, půdní vlastnosti a komunitu rostlin. Účinky půdní fauny bývají největší v ekosystémech, které jsou v přechodném stádiu, např. ekosystém vyvíjející se po určité disturbanci během sukcese.

Zagatto et al. (2019) ve své studii zhodnotili stav bezobratlých v půdě, která je neobdělávána, konvenčně obdělávána, minimálně obdělávána a v sekundárním lese, který se regeneruje. Studie byla prováděna během celého roku, aby byla zahrnuta všechna roční období. Bylo zjištěno, že v zemědělských systémech se více vyskytovali roztoči, ale chvostoskoci, kteří jsou citlivější na nízkou vlhkost a vysokou teplotu, byli naopak častější v lese. Rozmanitost a bohatství byla vyšší v lesní půdě než v ostatních systémech. V neobdělávané půdě byla hustota půdní mezofauny nižší. Atributy, které nejlépe vysvětlovaly variabilitu fauny v těchto systémech, byly: uhlík, základní kationty, pH a obsah hliníku.

Koehler (1992) se ve svém článku zmiňuje o tom, že vysoká citlivost roztočů vůči vnějšímu tlaku (např. vliv environmentálních chemických látek) spolu s jejich významem pro

funkce ekosystému činí půdní mezofaunu extrémně cennou pro ekotoxikologii. Teoretické úvahy ale mohou vést k závěru, že až v situacích, kdy je šetření mezofauny umístěno do ekosystémového kontextu, lze provést posouzení důsledků antropogenního vlivu.

V provedené studii Moradi et al. (2018) byly transplantovány bloky ornice z dobře rozvinuté louky na holou haldu po těžbě v Sokolovské těžební oblasti v roce 1995. Byl zkoumán účinek transplantace půdy na přežití a kolonizaci hornin půdní faunou po hlubinných těžbách ve dvou časových obdobích. Půdní mezofauna a makrofauna byla odebrána nejprve v počátečním období v letech 1995 – 1997 a poté o 20 let později ve sledovacím období v letech 2015 – 2016. Vzorky byly odebrány z transplantovaných bloků (Přivezené), ze skrývek ve vzdálenosti 2 m od transplantovaných bloků (Přilehlé) a ze skrývek ve vzdálenosti 30 m od bloků (Kontrolní). V počáteční fázi byl počet roztočů nejvyšší v transplantovaných blocích, a po dvaceti letech v blocích ze skrývek ve vzdálenosti 30 m od transplantovaných bloků. V obou časových obdobích byly žížalami a většinou smíšené makrofauny upřednostňovány transplantované bloky, soudě podle jejich větší hustoty na těchto místech. Tyto výsledky naznačují omezenou úlohu půdní skrývky v kolonizaci transplantovaných půdních bloků.

Hustotu půdní makrofauny a distribuci makrofaunálních výkalů a dalších struktur v ornici studoval Frouz et al. (2007) ve dvou chronosekvencích post-těžebních lokalit, z nichž první byla zarostlá spontánně rozvinutou vegetací a druhá byla obnovena za pomoci výsadby olše. Každá sekvence se skládala ze tří pozemků příslušného věku 15, 23 a 40 let od rekultivace. Hustota všech makrofaunálních skupin a zejména žížal byla vyšší u rekultivovaných než u nerekvultivovaných lokalit. Tvorba půdní mikrostruktury úzce souvisí s hustotou a aktivitou půdní fauny. Rychlejší kolonizace žížal způsobila časnější akumulaci koprolitů v ornici a urychlila následnou tvorbu humusové vrstvy v rekultivovaných lokalitách. Studie ukázala, že pro rozvoj půdy je důležitá úspěšná kolonizace půdní faunou, neboť podstatná část nově vytvořených půd se skládala z makrofaunálních výkalů.

Frouz et al. (2008) studovali více než 50 parametrů vegetace, půdy a půdní fauny ve 27 nerekvultivovaných těžebních lokalitách různého stáří (v rozsahu 1 – 41 let) v blízkosti města Sokolov. Hliněný alkalický substrát (s pH 8,5) byl uložen na testovaných místech. Jeho pH, obsah vápníku a sodíku se během sledování snížily. Celkový uhlík a dusík, dostupný draslík a ve vodě rozpustný fosfor postupem času vrostly. V počátečních stádiích, tj. před vytvořením keřového patra, byla ornice tvořena hlavně z odloženého hlušinového materiálu. V místech s převahou keřů (doba mezi 14. a 22. rokem) byla zásoba podestýlky na povrchu půdy vyšší než roční produkce podestýlky a pod vrstvou podestýlky se vyvinula silná fermentační vrstva, což naznačuje pomalý rozklad a míchání s půdou. Na pozemcích po 24 letech a více, byla vytvořena vrstva humusu a zmenšena tloušťka fermentační vrstvy. Mikrostrukturní analýza ukázala, že aktivita žížal, zejména míchání organických a minerálních vrstev, hrála hlavní roli při tvorbě humusové vrstvy. Žádná skupina půdní fauny neupřednostňovala počáteční fáze, ale Tardigrada, bakteriofágní a fungivorní Nematoda a mikrosaprofágní Diptera byli k těmto stádiím tolerantní. Hustota většiny společenství fauny vzrostla v mezistupních s hustou fermentační vrstvou. Pauropoda (drobnušky) a testované améby (měňavky) dosáhly na těchto místech nejvyšší hustoty. Makrosaprofágní společenstva půdní fauny, nejvýznamnější rozkladači, dosáhla své nejvyšší hustoty v nejpozdějším období. Všechny uvažované ekosystémové složky, tj. půda, půdní fauna a vegetace, prošly podstatnými změnami kolem 25. roku od nástupu a tyto byly vzájemně korelovány.

Forey et al. (2018) uvedli, že půdní organismy mohou silně ovlivnit dynamiku a složení přirozené vegetace, je relativně málo studií, které se zabývají manipulací půdní fauny, zejména v ekologii rekultivací. V jejich studii se tedy zaměřili na pozorování vlivu „inženýra půdního ekosystému“, žížaly *Lumbricus terrestris* L., na rostlinná společenstva a půdní organismy (chvostoskoky) v rekultivované nivě, dříve zbavené žížal. V rámci studie byla v hloubce 45 cm polovina kvadrátů (1 m²) inokulována 100 jednicí žížal, druhá polovina sloužila jako kontrola. Po jednom roce experimentu populace inokulovaných žížal zdvojnásobila rostlinnou biomasu. Množství a různorodost Collembola (v závislosti na funkčních skupinách) byly přítomností žížal negativně ovlivněny. Forey et al. (2018) tak zjistili, že tento negativní dopad byl pravděpodobně nepřímý a byl způsoben vlivem žížal na strukturu rostlinného společenstva a funkční skupiny rostlin. V tomto konkrétním případě naznačují, že rostlinná biomasa a funkční rysy mohou mít na společenství chvostoskoků větší vliv než vlastnosti půdy. Co se týká rekultivací, dospěli k názoru, že inokulace žížalami by mohla být zajímavým nástrojem pro zvýšení produktivity rostlin. Na druhou stranu však může poškodit biologickou rozmanitost půdy a změnit nadzemní i podzemní vazby.

Tropek a Řehounek (2014), ve svém článku uvádějí, že složiště a odkaliště popílku (zjednodušeně popílkoviště) jsou spíše místa tvořená odpady po spalování uhlí v tepelných elektrárnách, teplárnách a některých větších továrnách. Obecně se dá shrnout, že ryze antropogenní substrát složišť tvoří jemná minerální rezidua (popílek) a struska, jejichž poměr i složení závisí na kvalitě uhlí a na technologii samotného spalování. Částice popílku jsou obvykle velmi jemné (průměrně < 10 μm) a tedy náchylné k větrné erozi a relativně snadno se šíří do okolí. Popílek také často obsahuje zvýšené množství některých těžkých kovů a dalších toxických látek. Se změnou vnímání postindustriálních stanovišť se proto entomologové začali pozvolna zaměřovat i na popílkoviště a postupně na nich objevovali ochránářsky významné druhy. V rámci specializovaných psamofilních bezobratlých mají odkaliště nepochybně největší význam pro žahadlové blanokřídlé. Celkem jich autoři článku v dosud zpracovaném materiálu z popílkovišť ve východních a severozápadních Čechách zaznamenali 43 druhů. Popílkoviště slouží jako významná druhotná stanoviště i psamofilním pavoukům, křísům, určitým skupinám brouků a některým zástupcům několika dalších skupin hmyzu. Neméně zajímavý je výčet skupin bezobratlých živočichů, u nichž přes poměrně intenzivní snahu dosud téměř žádné ochránářsky výjimečné druhy nezjistili. Jde o noční motýly, ploštice, pestřenky, mravence, suchozemské plže, mandelinky a síťokřídlé. Dosud nejsou známy přesné důvody, proč ubývající druhy těchto skupin nevyhledávají druhotná útočiště na popílkovištích, na rozdíl od samotářských včel nebo pavouků. Přesto se však domnívají, že tento fakt dostatečně převažuje ohromný potenciál pro jiné skupiny bezobratlých živočichů.

Častým problémem antropogenních půd může být také ovlivnění znečištěním těžkými kovy. Böckl et al. (1998) ve své studii ověřovali, zda po metodě dekontaminace půd znečištěných těžkými kovy za pomoci vyluhování hydrolyzátem aminokyselin, poskytuje půda ideální podmínky pro růst bakterií. Pro odhad dalších důsledků této dekontaminace pro půdní biotu studovali re-kolonizaci mikrofauny a mesofauny ošetřených (dekontaminovaných) půdních částí vložených do orné půdy a do pole, které se nechalo ladem. Biomasa nematod se velmi rychle zvýšila, pravděpodobně kvůli imigraci, zatímco u Protozoa a Collembola se zpozdil jejich populační vývoj jak v orné půdě, tak i v té, která se neobdělávala. Výsledky studie

naznačují, že dekontaminační ošetření obecně nebrání kolonizaci půdními živočichy, ale že struktura potravní sítě se může posunout směrem k bakteriálnímu zaměření.

4 Materiál a metody

4.1 Charakteristika odběrných míst

4.1.1 Klimatické poměry odkališť Vysočany a Tušimice

Foral a Hlubůčková (2014), stejně tak Kolářová a Veleba (2016) ve svých zprávách uvedli, že zájmové území se řadí k teplým oblastem s dlouhým, teplým a suchým létem, velmi krátkým přechodovým obdobím s teplým až mírně teplým jarem a podzimem, krátkou mírně teplou a suchou až velmi suchou zimou. Průměrná roční teplota činí cca 8 °C a průměrný roční úhrn srážek dosahuje cca 450 - 500 mm. Obě území jsou ve srážkovém stínu Krušných hor a v menší míře i Doupovských hor, a jsou tudíž srážkově nedostatkové.

4.1.2 Odkaliště (popílkoviště) Vysočany

Území bývalého odkaliště Vysočany se nachází v Ústeckém kraji, na rozmezí okresů Chomutov a Louny, v sousedství obce Hrušovany, Žiželice a Hořetice. Prostor odkaliště je vymezen přibližně údolím levostranného přítoku toku Ohře - toku Hutná z jihozápadu a rychlostní silnicí R7 ze severu. Parcela je vedena jako trvalý travní porost. Bývalé odkaliště Vysočany bylo vybudováno na základě rozhodnutí vydaném v roce 1971 pro umístění stavby „Složišť popelovin Vysočany“, a sloužilo k ukládání vedlejších energetických produktů z Elektrárny Tušimice (ETU).

Ukládání popelovin do odkaliště probíhalo hydraulickou cestou za pomoci struskovodu, který v délce cca 15 km propojoval Elektrárny Tušimice s prostorem odkaliště. Ukládány byly popeloviny obsahující nepatrné množství nedopalu, které vizuálně představovaly tmavošedý jemnozrný až střednězrnitý materiál. Odkaliště bylo provozováno jako tzv. letní odkaliště, tzn., že provoz hydraulického ukládání probíhal vždy přibližně 10 měsíců v roce. Celková mocnost uložených popelovin dosahuje 50 m. Provoz odkaliště byl ukončen v říjnu roku 1999.

Vlastní výstavba odkaliště Vysočany začala příčným přehrazením údolí s původní kótou terénu v úrovni cca 256,00 m n. m. hrází V1 s kótou koruny v nadmořské výšce 275,00 m n. m. Výstavba hráze V1 probíhala pravděpodobně v letech 1973 – 1974. V průběhu ukládání popelovin byl postupně navyšován systém hrází (od hráze V1 až po hráz V7). Z původního záměru celkem 12 hrází, kdy úroveň nejvyšší koruny hráze měla dosahovat kóty 312,00 m n. m., byla výstavba dalších hrází omezena rozhodnutím příslušných orgánů statní správy. Jako poslední byla realizována hráz V7 s kótou koruny hráze 300,00 m n.m.

V rámci stavby došlo (vzhledem ke zvolenému typu odkaliště) k převedení povrchových vod včetně přítoků do nově vybudovaného koryta Vysočanské svodnice, která ústila do prostoru odkaliště. Toto opatření bylo realizováno zejména v západní části prostoru ukládání popelovin. V rámci pozdější rekultivace prostoru odkaliště došlo k přeložení části koryta Vysočanské svodnice, změně části jejího spádu a vybudování nové části koryta Vysočanské svodnice. Nové koryto je napojeno na původní trasu a odvádí povrchové vody podél jižní části odkaliště

a v současné době ústí do uklidňovací (sedimentační) nádrže mezi tokem Hutná a bývalou Čerpací stanicí vratné vody v oblasti pod hrází vlastního odkaliště.

Pro redukcí případného vlivu provozu odkaliště na okolí (dotací plavící vodou) docházelo po ukončení provozu odkaliště k postupnému snižování provozní hladiny v popelovém tělese.

Konečná rekultivace zájmové stavby (tj. překrytí úložných ploch zeminou s následným osázením travinami a rostlinami) začala probíhat od března 2011 na základě schválené projektové dokumentace a termín ukončení rekultivace byl v říjnu 2018. Celková plocha rekultivovaného území, v rámci rekultivace bývalého odkaliště Vysočany, představuje 169,99 ha. V platném územním plánu obce Hrušovany je plocha označena jako sportovně rekreační areál Vysočanské zahrady na rekultivovaném odkališti Vysočany. Územní plán navrhuje využití rekultivované plochy jako nezastavěné smíšené plochy kulturní krajiny se sportovně rekreačním využitím. Okolí bývalého odkaliště Vysočany je z jižní, západní a východní strany ohraničeno zemědělskými plochami a plochami smíšenými nezastavitelnými. Po okraji bývalého odkaliště je v Územním plánu navržena komunikace. Jižní svahy bývalého odkaliště Vysočany byly navrženy pro využití jako plochy výroby a skladování - areál fotovoltaických elektráren VF (Kolářová a Veleba 2016).

V současné době je prozatím celá plocha bývalého odkaliště využívána místním zemědělským podnikem, který jej obhospodařuje jako trvalý travní porost.

4.1.3 Odkaliště (popílkoviště) Tušimice

Odkaliště Tušimice se nachází v těsné blízkosti Elektrárny Tušimice jižním směrem a je v současné době rovinného typu se zemními hrázemi po celém obvodu (Straka 2016). Je situováno v prostoru mezi areálem elektrárny a levým břehem Nechranické přehrady na řece Ohři (7 km jihovýchodně od města Kadaň a 3 km jihozápadně od obce Rokle).

Prostor odkaliště je tvořen hrázovými systémy, střední svažitosti a plochou korunou na vrcholu. Na severní a východní straně je ohraničen silnicí a železniční vlečkou. Západní strana je lemována místní silnicí vedoucí k rekreačním chatám u vodní nádrže Nechranice. Spodní hranici jižní části tvoří panelová cesta. Na jižní část navazuje Přírodní rezervace Běšický chochol (regionální biocentrum ÚSES 1525) a Čachovický vrch. Podstatná je také blízkost ptačí oblasti Nechranice (Foral a Hlubůčková 2014).

Straka (2016) dále uvádí, že základní hráz byla vybudována v roce 1967 a poslední, jedenáctá, zvyšovací hráz byla dokončena v roce 2001. Koruna poslední zvyšovací obvodové hráze T11 má kótu 331,50 m n. m., celková výška hrázového systému dosahuje téměř 41 m. Do odkaliště byl plaven popílek a struska z provozu Elektrárny Tušimice. Odkaliště bylo provozováno jako zimní, tzn. střídalo se ve využití s odkalištěm Vysočany až do roku 1999, kdy byl provoz Vysočan ukončen a Tušimice tedy byly využívány celoročně. Od roku 2003 byla započata asanace a tvarování odkaliště struskou. V říjnu 2010 bylo definitivně ukončeno plavení a zbytkové jezero zcela zavezeno. V roce 2011 byla zaslepena poslední potrubí vratné vody. Plán odkaliště byla upravena do sklonu směrem k obvodu odkaliště a překryta vrstvou zeminy. Srážkové vody jsou sváděny po povrchu odkaliště, průsakové vody jsou jímány drenážním systémem. Od roku 2012 jsou tyto vody čerpány do vsakovacích rýh na pláň odkaliště, část se odvádí do provozu elektrárny a část je přiváděna zpět do prostoru odkaliště. V roce 2013 byly postupně likvidovány nebo zabezpečovány odstavené provozní objekty

a zařízení včetně nepotřebných zařízení techniko-bezpečnostního dohledu. Souběžně probíhala biologická rekultivace odkaliště, v rámci které byla, mimo jiné, provedena výsadba dřevin v oploceném prostoru v severovýchodní části pláně. Celá plocha zájmového území rekultivace je cca 185,6 ha.

Rekultivovaná plocha je vedena jako druh pozemku: ostatní plocha. Další úpravy území byly provedeny s ohledem na výskyt velmi vzácného motýla okáče metlicového. Jak doporučili Foral a Hlubůčková (2014), pěstební zásah byl navržen tak, aby byly v maximální míře odstraňovány méně hodnotné křoviny (šípky). Naopak byly zachovány některé specifické křoviny (svída, zimolez, brslen, dřín). S ohledem na poměrně malé rozšíření stromů, bylo navrženo odstranění pouze jejich omezeného počtu, zpravidla jde o akáty nebo poškozené dřeviny. Doporučilo se zachovávat cennější druhy – planá hrušeň, jabloň, třešeň, jeřáb, habr, dub, střemcha, borovice. Výsledný lesostepní charakter lokality by měl mít pokryvnost dřevin 25 % s výskytem jednotlivých keřů a stromů. Tím se podpoří biotop i pro ostatní stepní organismy.

V současné době se plocha obhospodařuje za pomoci pastvy ovcí.

4.2 Postup odběru vzorků

Odběry půdní fauny proběhly na lokalitách Odkaliště Vysočany a Tušimice. Bylo odebráno šest vzorků půdy ve čtyřech termínech, a to 1x v květnu, 1x v červnu, 1x v červenci a 1x v říjnu 2018. Celkem tedy bylo z každé lokality odebráno 24 půdních vzorků. Vzorky byly odebírány vždy ve vzdálenosti cca 20 metrů od sebe, aby byla, vzhledem k rozloze lokalit, pokryta reprezentativní část terénu. Za pomoci lopatky byly do uzavíratelného plastového sáčku odebírány půdní vzorky o velikosti cca 15 x 15 cm a 10 cm hloubky. Tyto byly pak převezeny do laboratoře České zemědělské univerzity v Praze, kde byly umístěny do Tullgrenových extraktorů po dobu 10 dní.

Nad extraktorem byl zavěšen zdroj světla, v tomto případě žárovka. Pod tímto světelným zdrojem byl umístěn trychtýř větších rozměrů, na kterém byl položen válec se sítím, s odebraným a zkoumaným půdním vzorkem. Do ústí trychtýře se umístila nádobka se 70% etanolem, do které se zachytávala půdní fauna. Živočichové se ve snaze skrýt před nevyhovujícími podmínkami přemísťovali do míst, kde očekávali více vlhkosti a tmu, a to směrem dolů. Dostali se tak na hladký povrch trychtýře, ze kterého pak sklouzli do připravené odběrné nádoby s etanolem.

4.2.1 Determinace půdní fauny

Vyextrahovaná půdní fauna byla pod binolupou roztříděna do vyšších taxonů a byly zaznamenány počty jedinců.

4.3 Postup odběru vzorků žížal

Na lokalitách odkališť byly v blízkosti odběrových míst půdní meso a makrofauny vymezeny tři čtverce na každých šest odběrných míst půdních vzorků. Každý z čtverců měl plochu 1 m² a byly od sebe vzdáleny cca 40 metrů. Žížaly byly odebírány z vykopané zeminy ručně namísto použití behaviorálních metod (např. vyplavování). Bylo tak učiněno vzhledem

k velmi suchému a teplému počasí v roce 2018. Jedinci byli mechanicky vybíráni brzy ráno nebo k večeru, v hloubce půdy až 30 cm. Žížaly byly odebírány do připravených nádob s navlhčenou zeminou, která sloužila k tomu, aby se případně probrali z klidového stádia. Díky vytvoření lepších podmínek došlo k probuzení žížal a ty pak byly převedeny do kelímků se 70% etanolem. V laboratoři pak byly přendány do roztoku formaldehydu po dobu 14 dní, aby došlo k vytvrzení těl a poté byly determinovány a zváženy.

Získání jedinců z čeledi Lumbricidae bylo determinováno pod binolupou pomocí klíčů Pižl (2002) a Sims & Gerard (1998). U žížal byla také stanovena biomasa každého z jedinců s přesností na 10 mg. Výsledky byly zaneseny do připravených tabulek.

4.4 Zpracování (hodnocení) dat

Pro každé místo byly použity údaje o množství a rozmanitosti půdní fauny. Pro výpočet byly použity následující indexy:

4.4.1 Indexy diverzity

Simpsonův index

$$D=1/\sum p_i^2$$

p_i – relativní početnost i-tého druhu

Tento základní index hodnotí významnost druhu. Zjišťuje, zda jsou ve společenstvu přítomny silně dominantní druhy nebo je společenstvo spíše vyrovnané (Somerfield et al. 2008).

Shannon – Wienerův index

$$H=-\sum p_i \log p_i$$

p_i – relativní početnost i-tého druhu

Je založen na rovnosti nebo vyrovnanosti společenstva. Čím je index H větší, tím je biocenóza tvořena větším počtem druhů s relativně nižší početností (Spellerberg 2008).

Margalefův index druhové pestrosti

$$P=(S-1)/\log N$$

S - celkový počet druhů

N - celkový počet jedinců

Jedná se o index druhové rozmanitosti, který zdůrazňuje druhové bohatství. Je potřeba brát v potaz jeho závislost mezi druhovou diverzitou a počtem odebraných organismů (Death 2008).

4.4.2 Indexy podobnosti

Používají se ke srovnání vzorků nebo lokalit na základě druhového složení. Používají se zde pro data prezence/absence druhů. Ve výpočtu nejsou zahrnuty proměnné, které u obou srovnávaných objektů nabývají nulové hodnoty. Nejpoužívanější jsou Sørensenův a Jaccardův index (Haruštiaková a kol 2012).

Sørensenův index podobnosti (CC = coefficient of community)

$$CC = 2C/(S_1+S_2)$$

C – druhy, které jsou společné pro obě společenstva

S_{1,2} – počet druhů ve společenstvu 1 a 2

Jaccardův index

$$J = C/(S_1+S_2-C)$$

C – druhy, které jsou společné pro obě společenstva

S_{1,2} – počet druhů ve společenstvu 1 a 2

4.4.3 QBS index

Biologická kvalita půdy byla hodnocena za použití indexu QBS (Biological Soil Quality), který byl navržen Parisi (2001). QBS index je založen na předpokladu, že čím vyšší je kvalita půdy, tím vyšší bude počet skupin ryze edafických organismů. QBS index je aplikován rozdělením půdních organismů v extrahovaném vzorku půdy do vyšších taxonů s homogenními morfoloogickými znaky. Každý taxon je pak ohodnocen dílčím ekomorfoogickým indexem (EMI), jehož hodnota vyjadřuje míru adaptace konkrétního taxonu na život v půdě, tj. míru vázanosti na půdní prostředí (Parisi 2001).

V této práci jsou prezentovány biologické ukazatele kvality půdy založené na mikroarthropodech a Collembola (Tab 1).

Tab 1 – Základní hodnoty ekomorfoogických indexů pro hodnocení pomocí QBS (Parisi, 2001)

Řád	EMI	Řád	EMI
Acari	10	Diptera (larvy)	10
Collembola 1 - epigeon	2	Araneae	2
Collembola 3 - hemiedafické	8	Hemiptera	1
Collembola 5 - euedafické	17	Chilopoda	10
Oribatida	20	Protura	20
Hymenoptera	5	Diplura	20
Symphyla	20	Dermaptera	1
Ost. holometabola (larvy)	10	Thysanoptera	1
Isopoda	10	Diplopoda	10
Coleoptera (imaga)	20	Ost. holometabola (imaga)	1

4.4.4 QBS-e index pro společenstva žížal

Žížaly jsou považovány za jeden z nejčastěji používaných bioindikátorů pro hodnocení udržitelnosti využívání půdy. S cílem zlepšit sledování biologické úrodnosti půdy byl vytvořen index QBS-e, který hodnotí biologickou kvalitu půdy na základě diverzity žížalích společenstev (Paoletti et al. 2013; Fusaro et al. 2018).

V následující tabulce (Tab 2) jsou ekomorfologické indexy (EMI) přiřazené každé ekologické kategorii a stádiu jedince.

Tab 2 - Ekomorfologické indexy žížal (Paoletti et al. 2013)

Ekologická kategorie	Stádium vývoje	EMI
Hydrofilní (HYD)	Nedospělec (Im)	1
Hydrofilní (HYD)	Dospělý (Ad)	1
Koprofágní (COP)	Nedospělec (Im)	2
Koprofágní (COP)	Dospělý (Ad)	2
Epigeické (EPI)	Nedospělec (Im)	2.5
Endogeické (END)	Nedospělec (Im)	2.5
Epigeické (EPI)	Dospělý (Ad)	3
Endogeické (END)	Dospělý (Ad)	3.2
Anektické / žijící v hlubších vrstvách půdy (ANE)	Nedospělec (Im)	10
Anektické / žijící v hlubších vrstvách půdy (ANE)	Dospělý (Ad)	14.4

Paoletti et al. (2013) dále stanovuje třídy kvality půdy a na základě hodnoty celkového QBS-e indexu (Tab 3):

Tab 3 - Třída kvality půdy dle indexů QBS-e (Paoletti et al., 2013)

Hodnota QBS-e	Třída kvality půdy (agroekosystém, polopřírodní prostředí)
QBS-e > 1000	Vynikající (4)
600 < QBS-e < 1000	Dobrá (3)
300 < QBS-e < 600	Slušná (2)
100 < QBS-e < 300	Dostatečná (1)
0 < QBS-e < 100	Špatná (0)

5 Výsledky

5.1 Odkaliště Vysočany

Byly provedeny čtyři odběry půdních vzorků v měsících květen, červen, červenec a říjen roku 2018. Následující tabulky (Tab 4, Tab 5) ukazují celkový přehled determinovaných řádů půdní meso a makrofauny, druhy žížal a jejich početnost.

Tab 4 – Determinované řády meso a makrofauny a jejich celková početnost - Vysočany

Řád	Celkový počet jedinců
Protura	92
Diplura	96
Collembola1	49
Collembola3	137
Collembola5	223
Dermaptera	3
Hemiptera	7
Thysanoptera	0
Coleoptera (imaga)	17
Hymenoptera	115
Diptera (larvy)	15
Acari	1427
Oribatida	270
Isopoda	13
Chilopoda	14
Diplopoda	4
Araneae	13
Symphyla	53
Ost. holometabola (larvy)	18
Ost. holometabola (imaga)	3

Tab 5 – Determinované druhy žížal, jejich početnost a biomasa - Vysočany

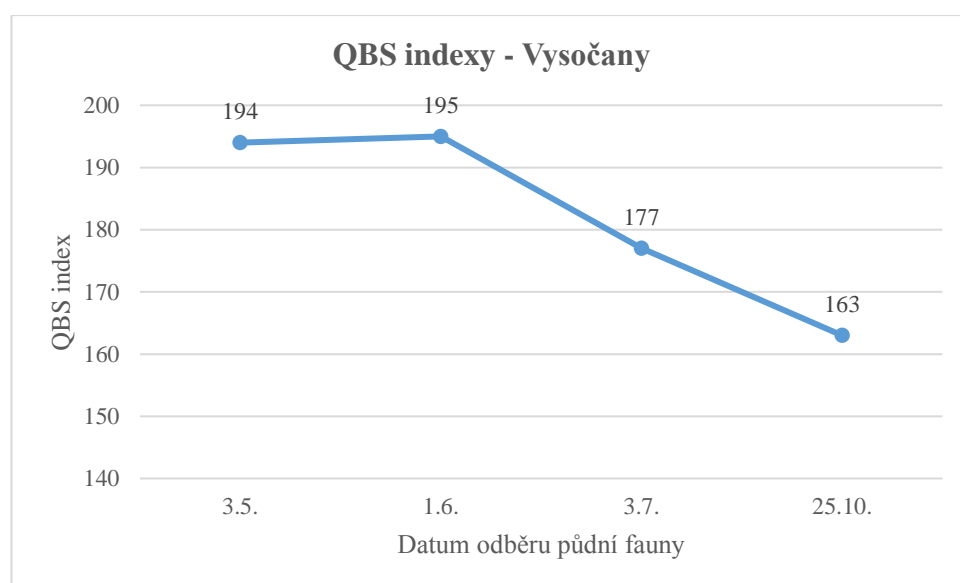
Druh	Celkový počet jedinců	Stadium juvenil	Stadium subadult	Stadium adult	Celková biomasa (g)
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	13	12	1	-	2,38
<i>Aporrectodea rosea</i>	6	2	1	3	1,31
<i>Aporrectodea sp.</i>	3	3	-	-	0,21
<i>Aporrectodea longa</i>	3	-	-	3	1,92

V následující tabulce (Tab 6) jsou uvedeny počty nalezených jedinců z jednotlivých odběrů.

Tab 6 – Celkové počty jedinců při jednotlivých odběrech - Vysočany

Řád	Odběr 3.5.2018	Odběr 1.6.2018	Odběr 3.7.2018	Odběr 25.10.2018
Protura	36	55	1	0
Diplura	35	36	18	7
Collembola1	14	9	10	16
Collembola3	45	20	25	47
Collembola5	82	53	33	55
Dermaptera	0	0	2	1
Hemiptera	0	0	7	0
Thysanoptera	0	0	0	0
Coleoptera (imaga)	5	2	6	4
Hymenoptera	4	106	4	1
Diptera (larvy)	9	2	0	4
Acari	521	243	333	330
Oribatida	83	87	83	17
Isopoda	7	2	4	0
Chilopoda	4	6	2	2
Diplopoda	2	1	0	1
Araneae	4	4	5	0
Symphyla	15	30	4	4
Ost. holometabola (larvy)	10	4	2	2
Ost. holometabola (imaga)	0	1	2	0

V Grafu 1 vidíme indexy QBS z jednotlivých odběrů v lokalitě Vysočany.



Graf 1 – QBS indexy z odběrů půdní fauny Vysočany

5.2 Odkaliště Tušimice

Na tomto odkališti byly taktéž provedeny čtyři odběry půdních vzorků v měsících květen, červen, červenec a říjen roku 2018. V tabulce (Tab 7) je uveden celkový přehled počtu determinovaných řádů půdní meso a makrofauny. V této lokalitě nebyl nalezen během odběrů ani jeden zástupce čeledi žížalovitých.

Tab 7 – Determinované řády meso a makrofauny a jejich početnost - Tušimice

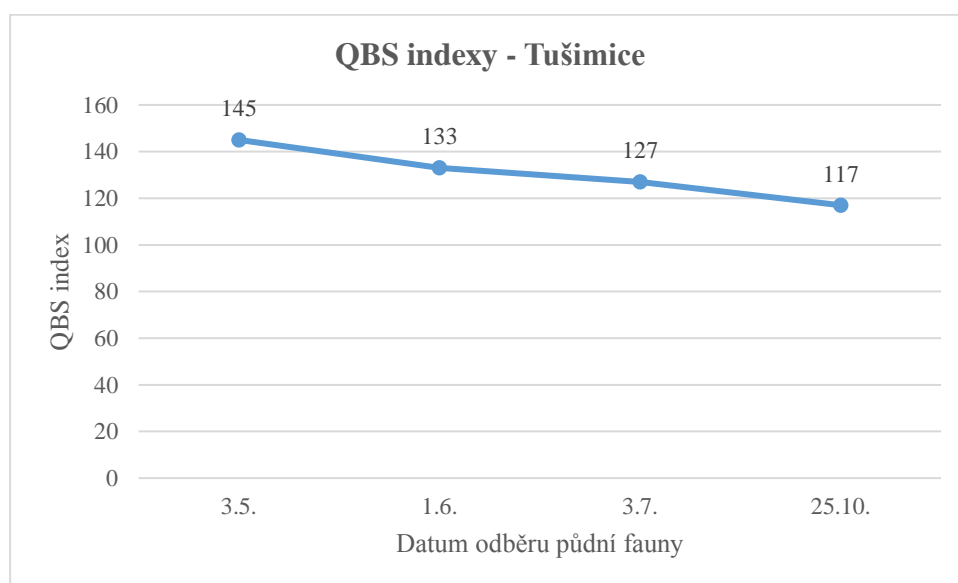
Řád	Celkový počet jedinců
Protura	0
Diplura	0
Collembola1	29
Collembola3	161
Collembola5	278
Dermaptera	0
Hemiptera	9
Thysanoptera	0
Coleoptera (imaga)	8
Hymenoptera	73
Diptera (larvy)	6
Acari	1320
Oribatida	66
Isopoda	10
Chilopoda	2
Diplopoda	0
Araneae	2
Symphyla	17
Ost. holometabola (larvy)	26
Ost. holometabola (imaga)	0

V následující tabulce (Tab 8) je přehled počtů nalezených jedinců z uvedených řádů při jednotlivých odběrech.

Tab 8 – Počty jedinců při jednotlivých odběrech - Tušimice

Řád	Odběr 3.5.2018	Odběr 1.6.2018	Odběr 3.7.2018	Odběr 25.10.2018
Protura	0	0	0	0
Diplura	0	0	0	0
Collembola1	15	11	2	1
Collembola3	92	39	19	11
Collembola5	104	70	62	42
Dermaptera	0	0	0	0
Hemiptera	1	8	0	0
Thysanoptera	0	0	0	0
Coleoptera (imaga)	2	3	2	1
Hymenoptera	13	60	0	0
Diptera (larvy)	2	1	3	0
Acari	246	289	651	134
Oribatida	41	17	1	7
Isopoda	6	0	2	2
Chilopoda	1	1	0	0
Diplopoda	0	0	0	0
Araneae	2	0	0	0
Symphyla	10	3	3	1
Ost. holometabola (larvy)	10	2	13	1
Ost. holometabola (imaga)	0	0	0	0

V Grafu 2 vidíme indexy QBS z jednotlivých odběrů na lokalitě Tušimice.



Graf 2 – QBS indexy z odběrů půdní fauny Tušimice

5.3 Porovnání odkališť Vysočany a Tušimice

5.3.1 Simpsonův index diverzity

Tab 9 – Simpsonův index diverzity v jednotlivých odběrech

Odkaliště	Odběr 3.5.2018	Odběr 1.6.2018	Odběr 3.7.2018	Odběr 25.10.2018
Vysočany	2,64	5,05	2,44	2,10
Tušimice	3,62	2,70	1,34	2,01

Jak vyplývá z tabulky Tab 9, byla nejvyšší diverzita společenstva dle Simpsona na odkališti Vysočany dne 1.6.2018. Naopak nejnižší diverzita byla v odběru dne 3.7.2018 na lokalitě Tušimice. Nejvyrovnanější diverzita na obou lokalitách byla v říjnu 2018.

5.3.2 Shannon – Wienerův index

Tab 10 – Hodnoty Shannon – Wienerova indexu v jednotlivých odběrech

Odkaliště	Odběr 3.5.2018	Odběr 1.6.2018	Odběr 3.7.2018	Odběr 25.10.2018
Vysočany	0,68	0,86	0,62	0,53
Tušimice	0,71	0,61	0,26	0,45

Ve výsledcích v tabulce (Tab 10) vidíme, že na obou lokalitách jsou společenstva velmi druhově chudá, při těchto hodnotách lze předpokládat dominanci jednoho druhu. Shannon – Wienerův index obvykle dosahuje hodnot v rozmezí 1,5 až 4,5.

5.3.3 Margalefův index druhové pestrosti

Tab 11 – Margalefův index druhové pestrosti v jednotlivých odběrech

Odkaliště	Odběr 3.5.2018	Odběr 1.6.2018	Odběr 3.7.2018	Odběr 25.10.2018
Vysočany	5,10	5,67	5,85	4,83
Tušimice	4,75	4,07	3,13	3,48

Tab 11 vyjadřuje počet přítomných druhů (taxonů) na lokalitě v poměru k celkovému počtu jedinců chycených na lokalitě. Jak je z výsledků patrné, vyšší hodnoty vykazuje odkaliště Vysočany. V červnu a červenci bylo na této lokalitě nalezeno 17 řádů půdní fauny.

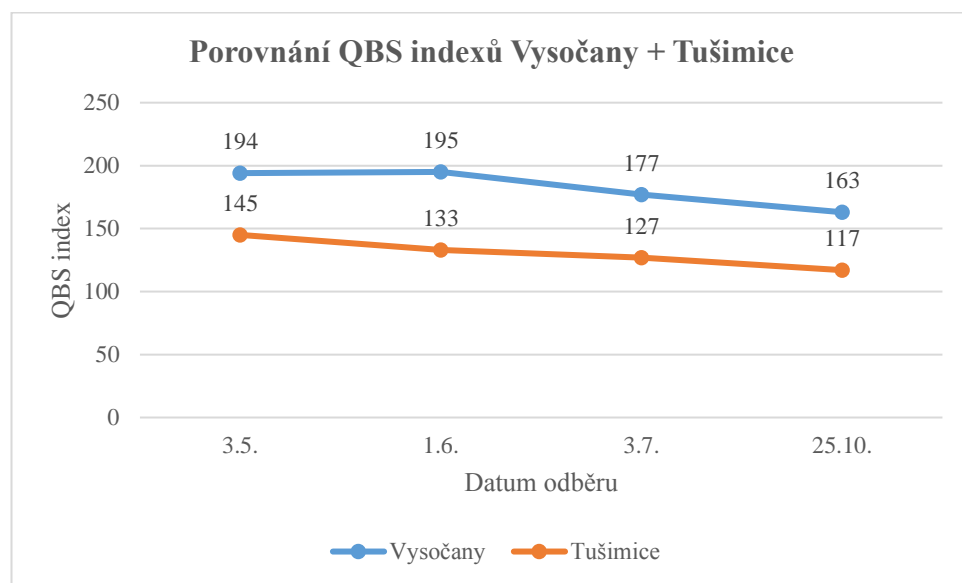
5.3.4 Sørensenův index podobnosti a Jaccardův index

Na odkališti ve Vysočanech bylo nalezeno celkem 17 řádů, na odkališti Tušimice pak 14 řádů půdní fauny. Obě společenstva mají společných 14 řádů. Podobnost druhového složení obou lokalit dosahuje podle Sørensenova indexu druhové podobnosti 84,84 %, podle Jaccardova indexu 73,68 %.

Dle výsledků lze usuzovat, že společenstva na obou odkalištích si jsou druhově velmi podobná.

5.3.5 Soil Biological Quality index (QBS index)

V Grafu 3 jsou porovnány QBS indexy z odběrů půdní fauny z obou lokalit. Pokud sečteme všechny EMI indexy všech řádů, které byly určovány z půdních vzorků, vyšel by nám EMI index v hodnotě 198. Z výsledků v grafu je patrné, že lokalita Vysočany se tomuto indexu nejvíce přiblížila, lze z toho tedy vyvodit závěr, že půda na tomto odkališti se, co se týká mikroarthropodů a Collembola, dá považovat jako prostředí vhodné pro život těchto organismů. Odkaliště Tušimice má v průměru tyto hodnoty skoro o čtvrtinu nižší.



Graf 3 – Porovnání QBS indexů z odběrů půdní fauny Vysočany + Tušimice

5.3.6 QBS-e index pro společenstva žížal

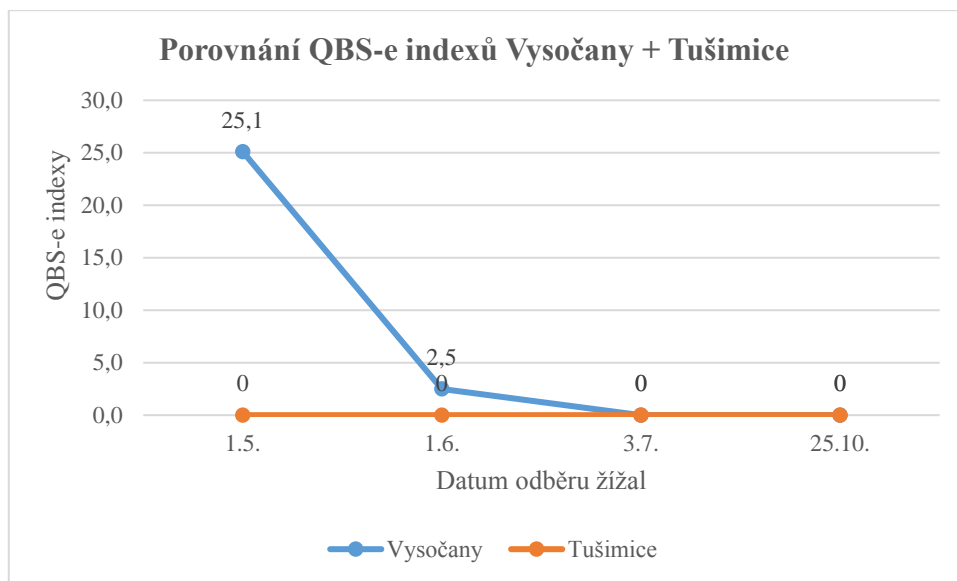
QBS-e indexy z odběrů této půdní makrofauny na odkališti Vysočany po sečtení EMI indexů všech druhů žížal, byly následující:

- Hodnota 25,1 – ze dne 1.5.2018
- Hodnota 2,5 – ze dne 1.6.2018
- Při dalších odběrech nebyl na lokalitě nalezen žádný zástupce žížal

Na lokalitě byli dne 1.5.2018 nalezeni tři jedinci rodu *Aporrectodea sp.*, v juvenilním stadiu, které nebylo možné blíže určit. Tito pak byli pro hodnocení EMI zařazeni do stejné kategorie jako druh, který se v daný odběr vyskytoval na lokalitě nejčastěji, v tomto případě *Aporrectodea rosea*. Celková biomasa odebraných zástupců žížal činila v případě prvního odběru (květen) 4,54 g, v případě června 1,28 g (celkově 5,82 g).

Po porovnání s tabulkou (Tab 3) je možno vidět, že v obou případech spadala hodnota QBS-e do kategorie vyjádřená: $0 < \text{QBS-e} < 100$, což je značí špatnou kvalitu půdy na základě diverzity žížalích společenstev.

Stejný výsledek vyšel i pro lokalitu Tušimice, kde nebyl nalezen ani jeden zástupce žížalovitých. Pro vizualizaci výsledků byl použit níže uvedený Graf 4.



Graf 4 – Porovnání QBS-e indexů z odběrů žížal Vysočany + Tušimice

6 Diskuze

Půdní prostředí má vliv na přítomnost bezobratlých, pro něž je půda přirozeným místem pro život. V této práci jsem se zabývala složením půdní meso a makrofauny na dvou bývalých odkalištích popílku z elektrárny Tušimice. Na každé ploše bylo během roku 2018 odebráno celkem 24 reprezentativních vzorků půdní fauny a bylo provedeno 9 sběrů žížal. Extrakcí a rozbohem půdních vzorků byl na stanovištích rekultivovaných odkališť doložen výskyt 17 (Vysočany), resp. 14 taxonů (Tušimice) půdní mesofauny. Rozbohem vzorků *in situ* bylo získáno celkem 25 zástupců žížal, a to pouze na odkališti Vysočany (všichni náleželi rodu *Aporrectodea*). Na ploše odkaliště Tušimice nebyl během sběrů nalezen žádný jedinec z čeledi žížalovitých.

Ze zjištěných výsledků lze odvodit, že přestože množství determinovaných jedinců na rekultivovaných plochách nebylo zanedbatelné, nejpočetnější skupinou půdních bezobratlých byly na obou místech řady Acari, Oribatida a Collembola, kteří na obou lokalitách jasně dominovali. Tento fakt může souviset s tím, že roztoči a chvostoskoci jsou známí svou vysokou mírou adaptace na nejrůznější prostředí, jak ostatně uvádějí i Jeffery et al. (2010) a Paoletti et al. (2007). Tyto organismy napomáhají v půdě koloběhu živin tím, že fragmentují organickou hmotu a urychlují její mikrobiální rozklad (Zagatto et al. 2019). Další velmi početnou skupinou byl řád Hymenoptera (v tomto případě mravenci). Význam těchto bezobratlých spočívá zejména v tom, že svou činností v půdě podporují tvorbu pórů a agregátů ovlivňujících pohyb plynů a vody v půdním profilu, jak uvádí např. da Costa-Milanez et al. (2017).

Biologická kvalita půdy (zaměřená na arthropody a Collembola) hodnocena podle indexu QBS byla na obou lokalitách uspokojivá, ačkoliv některé taxony neměly velké početné zastoupení. Rozmanitost půdní fauny na rekultivovaných plochách bývalých odkališť může souviset s fyzikálně chemickými vlastnostmi půdy, jak tvrdí Aksoy et al. (2017). K tomu by však v tomto případě byly potřeba výsledky chemického rozboru půdy. Ty budou součástí dalšího zkoumání na obou studovaných lokalitách. Kvalita půdy, která byla použita při rekultivaci, může ovlivňovat rozvoj půdních organismů. Moradi et al. (2018) ve své studii zjistili, že půdní fauna upřednostňovala po rekultivaci kvalitní ornici navezenou na holou haldu po těžbě, a až postupem času se rozšířila do míst, kde byly použity jiné druhy půd.

Jak je patrné z výsledků indexů podobnosti, druhová diverzita je na obou odkalištích podobná. To může souviset s vybranými lokalitami, které byly rekultivovány stejným způsobem, a mezi kterými je vzdálenost cca 15 km a nacházejí se tak ve stejné klimatické oblasti.

Vzhledem k velmi malé abundanci žížal, bylo hodnocení kvality půdy na základě QBS-e indexu pro společenstva žížal velmi špatné. Přítomnost žížal v půdě je důležitá, neboť svou činností ovlivňují celé půdní ekosystémy, zejména vlivem na půdní strukturu a rozklad organické hmoty. Pokud bychom chtěli zvýšit počet žížal na uvedených rekultivovaných plochách, mohla by být provedena inokulace půdy žížalami, kterou ve svém experimentu úspěšně vyzkoušel Forey et al. (2018). Po jednom roce tyto žížaly na pokusné ploše svou aktivitou zapříčinily zdvojnásobení rostlinné biomasy.

Vzhledem k tomu, že bylo prováděno monitorování pouze během jednoho roku, nelze s určitostí říci, zda na výsledky měla vliv kvalita půdního prostředí, nebo je ovlivnilo extrémní sucho, které v roce 2018 zasáhlo (nejen) Českou republiku. Obojí mohlo vytvořit nepříznivé

podmínky pro půdní faunu, především pro žížaly, které běžně přečkávají období sucha ve stadiu kokonizace (Pižl 2002).

Je možno konstatovat, že půdní fauna umí být, co se týká rekultivovaných půd, přizpůsobivá, avšak záleží na činnostech, kterými člověk půdu ovlivňuje a také na způsobu provedené rekultivace. Pokud budou při rekultivaci vytvořeny příznivé podmínky pro půdní bezobratlé (kvalitní půda, rostliny a dřeviny přirozené danému prostředí, ochrana před znečištěním při další lidské činnosti apod.) je možné, že rozvoj jejich společenstev bude postupovat rychleji.

Dá se předpokládat, že vzhledem k lepším výsledkům získaným na lokalitě Vysočany, kde probíhá sukcese delší dobu, bude za několik let patrné zlepšení i na odkališti Tušimice. Pro potvrzení tohoto předpokladu bude zapotřebí provést výzkum v delším časovém období a získat tak více podkladů pro další hodnocení biologického oživení studovaných lokalit.

7 Závěr

Cílem této práce bylo popsat a dále pak na rekultivovaných plochách bývalých odkališť popílku z elektrárny Tušimice odebrat, determinovat a porovnat rozmanitost půdní fauny.

Půda je samoorganizovaný ekologický systém, v němž všechny organismy vzájemně spolupracují. Půdní organismy zásadně ovlivňují všeobecné ekologické funkce, jako jsou rychlost rozkladu organické hmoty, biologická rozmanitost a půdotvorné procesy. Žížaly zvyšují mikrobiální aktivitu a obecně stimulují růst rostlin.

Rekultivace půdy a krajiny je nezbytná pro posílení funkcí a služeb ekosystému po ovlivnění lidskou činností (těžbou uhlí, nerostných surovin, ukládáním odpadu apod.). Technologie rekultivace by měla být prováděna v souladu s okolní přírodou, aby i poté mohla rekultivovaná plocha poskytovat základní ekosystémové služby.

Rekultivované plochy odkališť byly vybrány pro porovnání z důvodu shodného využití (ukládání popílku) a způsobu rekultivace, která probíhala v časovém rozestupu několika let. Popílek na nich uložený má stejný původ, a tudíž se dá říci, že i složení.

Získané výsledky, které byly porovnány za pomoci indexů diverzity, rozmanitosti a biologické kvality půdy, naznačují, že podmínky pro půdní mesofaunu jsou na vybraných plochách příznivé. Výsledky porovnání obou odběrových lokalit ukazují, že na odkališti Vysočany (kde sukcese probíhá déle) bylo přítomno více taxonů i abundance půdních bezobratlých. Lze se domnívat, že podobně bude sukcese pokračovat i na odkališti v Tušimicích. U makrofauny, v tomto případě žížal, bude pro vývoj společenstev potřeba výrazně delší časové období.

Ačkoliv byl výzkum prováděn v relativně krátkém období, při porovnání ploch lze z hlediska biologického oživení půd říci, že se na tyto plochy postupem času vrací život. Přesto pro ověření tohoto tvrzení by bylo zapotřebí sledovat lokality v průběhu podstatné části sukcesního vývoje a získat tak dostatek podkladů pro porovnání rozvoje půdní fauny v čase.

8 Seznam literatury

- Aksoy E, Louwagie G, Gardi C, Gregor M, Schröder C, Löhnertz M. 2017. Assessing soil biodiversity potentials in Europe. *Science of The Total Environment* **589**: 236 – 249.
- Anderson JM. 1998. Spatiotemporal effects of invertebrates on soil processes. *Biology and Fertility of Soils* **6**: 216 – 227.
- Bach EM, Wall DH. 2018. Trends in Global Biodiversity: Soil Biota and Processes. Pages 131 – 143 in Dellasala DA, Goldstein MI, editors. *Encyclopedia of the Anthropocene*. Elsevier, Amsterdam.
- Bird AF, Bird J. 1991. *The Structure of Nematodes*. Academic Press, Cambridge.
- Blakely JK, Neher DA, Spongberg AL. 2002. Soil invertebrate and microbial communities, and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. *Applied Soil Ecology* **21**: 71 – 88.
- Böckl M, Blay K, Fischer K, Mommertz S, Filser J. 1998. Colonisation of a copper-decontaminated soil by micro- and mesofauna. *Applied Soil Ecology* **9**: 489 – 494.
- Brusca R. 1997. Isopoda. Version 6. Richard Brusca, Tuscon. Available from <http://tolweb.org/Isopoda/6320/1997.08.06> (accessed April 2019).
- Cipola NG, Da Silva DD, Bellini BC. 2019. Chapter 2 - Class Collembola. Pages 11 – 55 in Hamada N, Thorp JH, Rogers C, editors. *Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates*. Volume 3: Keys to Neotropical Hexapoda. 4th ed. Academic Press, Cambridge.
- Clarholm M. 1985. Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry* **17**: 181 – 187.
- Coleman DC, Callahan Jr. MA, Crossley Jr. DA. 2018. *Fundamentals of Soil Ecology*. 3rd ed. Academic Press, Cambridge.
- Cunha L, Brown GG, Stanton DWG, da Silva E, Hansel FA, Jorge G, McKey D, Vidal-Torrado P, Macedo RS, Velasquez E, James SW, Lavelle P, Kille P. 2016. Soil Animals and Pedogenesis: The Role of Earthworms in Anthropogenic Soils. *Soil Science* **181**: 110 – 125.
- da Costa-Milanez CB, Majer JD, Castro PTA, Ribeiro SP. 2017. Influence of soil granulometry on average body size in soil ant assemblages: implications for bioindication, *Perspectives in Ecology and Conservation* **15**: 102 – 108.
- Death R. 2008. Margalef's Index. Pages 2209 – 2210 in Jørgensen SE, Farth BD, editors. *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, Amsterdam.
- Devetter M. 2010. A method for efficient extraction of rotifers (Rotifera) from soils. *Pedobiologia* **53**: 115 – 118.
- Devetter M. 2010. Akvatická fauna v půdním prostředí – jak ji pozorovat? *Živa* **2010**: 94 – 96.
- Dolling WR. 1991. *Hemiptera*. Oxford University Press, Oxford.
- Edwards CA, Bohlen PJ. 1995. *Biology and Ecology of Earthworms*. 3rd ed. Springer Netherlands, Amsterdam.

- Elmer M, La France M, Förster G, Roth M. 2004. Changes in the decomposer community when converting spruce monocultures to mixed spruce/beech stands. *Plant and Soil* **264**: 97 – 109.
- Eubanks MD, Lin C, Tarone AM. 2019. The role of ants in vertebrate carrion decomposition. *Food Webs* (e00109) DOI: 10.1016/j.fooweb.2018.e00109.
- Federální shromáždění Československé socialistické republiky. 1988. Zákon č. 44 ze dne 19. dubna 1988 o ochraně využití nerostného bohatství (horní zákon). Pages 175 – 188 in *Sbírka zákonů Československá socialistická republika, 1988, částka 8. Česká republika*.
- Feng Y, Wang J, Bai Z, Reading L. 2019. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review *Earth-Science Reviews* **191**: 12 – 25.
- Finlay BJ, Esteban GF. 2013. Protozoa. Pages 286 – 297 in Levin SA, editor. *Encyclopedia of Biodiversity*. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Fischer P, Führer E. 1990. Effect of soil acidity on the entomophilic nematode *Steinernema kraussei* Steiner. *Biology and Fertility of Soils* **9**: 174 – 177.
- Foissner W. 1999. Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **74**: 95 – 112.
- Foral T, Hlubůčková M. 2014. Pěstební zásah na hrázovém systému odkaliště Tušimice [Technická zpráva]. Ing. Markéta Hlubůčková ENGINEERING – MH, Kadaň.
- Forey E, Chauvat M, Coulibaly SFM, Langlois E, Barot S, Clause J. 2018. Inoculation of an ecosystem engineer (Earthworm: *Lumbricus terrestris*) during experimental grassland restoration: Consequences for above and belowground soil compartments. *Applied Soil Ecology* **125**: 148 – 155.
- Frouz J. 2018. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma* **332**: 161 – 172.
- Frouz J, Elhottová D, Kuráž V, Šourková M. 2006. 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* **33**: 308 – 320.
- Frouz J, Jílková V. 2008. The effect of ants on soil properties and processes. *Myrmecological News* **11**: 191 – 199.
- Frouz J, Pižl V, Tajovský K. 2007. The effect of earthworms and other saprophagous macrofauna on soil microstructure in reclaimed and un-reclaimed post-mining sites in Central Europe. *European Journal of Soil Biology* **43** (suppl. 1): S184 – S189.
- Frouz J, Prach K, Pižl V, Háněl L, Starý J, Tajovský K, Materna J, Balík V, Kalčík J, Řehounková K. 2008. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology* **44**: 109 – 121.
- Fusaro S, Gavinelli F, Lazzarini F, Paoletti MG. 2018. Soil Biological Quality Index based on earthworms (QBS-e). A new way to use earthworms as bioindicators in agroecosystems. *Ecological Indicators* **93**: 1276 – 1292.

- Gadagkar R. 2019. Ant, Bee and Wasp Social Evolution. Pages 599 – 608 in Chloe JC, editor. Encyclopedia of Animal Behavior. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Gardner SL. 2013. Worms, Nematoda. Pages 420 – 436 in Levin SA, editor. Encyclopedia of Biodiversity. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- George PBL, Keith AM, Creer S, Barrett GL, Lebron I, Emmett BA, Robinson DA, Jones DL. 2017. Evaluation of mesofauna communities as soil quality indicators in a national-level monitoring programme. *Soil Biology and Biochemistry* **115**: 537 – 546.
- Gillespie RG, Spagna JC. 2009. Chapter 241 - Spiders. Pages 941 – 951 in Resh VH, Cardé RT, editors. Encyclopedia of Insects. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Golovatch SI, Kime RD. 2009. Millipede (Diplopoda) distributions: A review. *Soil Organism* **81**: 565 – 597.
- Guidetti R, Altiero T, Rebecchi L. 2011. On dormancy strategies in tardigrades. *Journal of Insect Physiology* **57**: 567 – 576.
- Gulvik M. 2011. Mites (Acari) as indicators of soil biodiversity and land use monitoring: a review. *Polish Journal of Ecology* **55**: 415 – 440.
- Guo X, Petermann JS, Wurst S. 2019. Interaction of a root-knot nematode (*Meloidogyne hapla*) and plant intraspecific diversity in clover-grass communities. *Journal of Plant Ecology* **12**: 1 – 9.
- Gutierrez C, Fernandez C, Escuer M, Campos-Herrera R, Beltrán-Rodríguez ME, Carbonell G, Rodríguez Martín JA. 2016. Effect of soil properties, heavy metals and emerging contaminants in the soil nematodes diversity. *Environmental Pollution* **213**: 184 – 194.
- Haruštiaková D, Jarkovský J, Littnerová S, Dušek L. 2012. Vícerozměrné statistické metody v biologii. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno.
- Jeffery S, Gardi C, Jones A, Montanarella L, Marmo L, Miko L, Ritz K, Peres G, Römcke J, van der Putten WH. 2010. European Atlas of Soil Biodiversity. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Jelínek J, Zicháček V. 2007. Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část). 9. vyd. Nakladatelství Olomouc, Olomouc.
- Koehler HH. 1992. The use of soil mesofauna for the judgement of chemical impact on ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **40**: 193 – 205.
- Koch M. 2009. Chapter 212 – Protura. Pages 855 – 858 in Resh VH, Cardé RT, editors. Encyclopedia of Insects. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Koch M. 2009. Chapter 75 – Diplura. Pages 281 – 283 in Resh VH, Cardé RT, editors. Encyclopedia of Insects. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Kolářová J, Veleba P. 2016. Analýza rizik pro bývalé odkaliště Vysočany a na něj navazující vodohospodářské objekty v k.ú. Hořetice u Žiželic, Hrušovany, Lažany u Chomutova a Vysočany u Chomutova [Závěrečná práce]. DEKONTA, a.s., Stehelčevy.

- Kula E, Švarc P. 2011. Žížaly (Lumbricidae) lesních ekosystémů narušených imisemi a ovlivněných rekompensačním vápněním v Krušných horách = Earthworms (Lumbricidae) of forest ecosystems disturbed by air pollution and affected by recompensation liming in the Ore Mountains. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Lal R. 2015. Chapter 2.1 - Tenets of Soil and Landscape Restoration. Pages 79 – 96 in Chabay I, Frick M, Helgeson J, editors. Land Restoration - Reclaiming Landscapes for a Sustainable Future. Academic Press, Cambridge.
- Lavelle P, Decaëns T, Aubert M, Barot S, Blouin M, Bureau F, Margerie P, Mora P, Rossi JP. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* **42** (suppl. 1): S3 – S15.
- Lavelle P, Spain A, Blouin M, Brown G, Decaëns T, Grimaldi M, Jiménez JJ, McKey D, Mathieu J, Velasquez E, Zangerlé A. 2016. Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil: A Review of Concepts and Future Research Questions. *Soil Science* **181**: 91 – 109.
- Maaß S, Caruso T, Rillig MC. 2015. Functional role of microarthropods in soil aggregation. *Pedobiologia* **58**: 59 – 63.
- Martin A, Marinissen JCY. 1993. Biological and physico-chemical processes in excrements of soil animals. *Geoderma* **56**: 331 – 347.
- Menta C, Conti FD, Pinto S, Lozano-Fondón C. 2014. Monitoring soil restoration in an open-pit mine in northern Italy. *Applied Soil Ecology* **83**: 22 – 29.
- Merritt RW, Courtney GW, Keiper JB. 2009. Chapter 76 - Diptera: (Flies, Mosquitoes, Midges, Gnats). Pages 284 – 297 in Resh VH, Cardé RT, editors. *Encyclopedia of Insects*. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Mitter B, Brader G, Afzal M, Compant S, Naveed M, Trognitz F, Sessitsch A. 2013. Advances in Elucidating Beneficial Interactions Between Plants, Soil, and Bacteria. *Advances in Agronomy* **121**: 381 – 445.
- Moradi J, Vicentini F, Šimáčková H, Pižl V, Tajovský K, Stary J, Frouz J. 2018. An investigation into the long-term effect of soil transplant in bare spoil heaps on survival and migration of soil meso and macrofauna. *Ecological Engineering* **110**: 158 – 164.
- Mound LA. 2009. Chapter 254 - Thysanoptera. Pages 999 – 1003 in Resh VH, Cardé RT, editors. *Encyclopedia of Insects*. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Mullen GR, Vetter RS. 2019. Chapter 25 - Spiders (Araneae). Pages 507 – 531 in Mullen GR, Durden LA, editors. *Medical and Veterinary Entomology*. 3rd ed. Academic Press, Cambridge.
- Nelson DR, Guidetti R, Rebecchi L. 2015. Chapter 17 - Phylum Tardigrada. Pages 347 – 380 in Thorp JH, Rogers CD, editors. *Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates*. 4th ed. Academic Press, Cambridge.
- Paoletti MG, Hassall M. 1999. Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **74**: 157 – 165.

- Paoletti MG, Osler GHR, Kinnear A, Black DG, Thomson LJ, Tsitsilas A, Sharley D, Judd S, Neville P, D'Inca A. 2007. Detritivores as indicators of landscape stress and soil degradation. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **47**: 412 – 423.
- Paoletti MG, Sommaggio D, Fusaro S. 2013. Proposta di indice di qualità biologica del suolo (QBS-e) basato sui lombrichi e applicato agli agroecosistemi. *Biologia Ambientale* **27**: 25 – 43.
- Parisi V. 2001. La qualità biologica del suolo. Un metodo basato sui microartropodi. *Acta Naturalia de "L'Ateneo Parmense"* **37**: 97 – 106.
- Pavao-Zuckerman MA. 2008. Soil Ecology. Pages 600 – 605 in Fath B, editor. *Encyclopedia of Ecology*, Volume 3. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam.
- Pižl V. 1996. Jak je utvářeno tělo žížaly. *Živa* **44**: 89 – 90.
- Pižl V. 2002. *Žížaly České republiky: Earthworms of the Czech Republic*. Přírodovědný klub v Uherském Hradišti, Uherské Hradiště.
- Pommeresche R, Hansen S, Løes AK. 2010. Žížaly a jejich význam pro zlepšování kvality půdy. *Bioinstitut Olomouc*, Olomouc.
- Prach K. 2009. Ekologie obnovy narušených míst, VI. Shrnutí a závěrečné poznámky. *Živa* **2009**: 262 – 264.
- Quicke DLJ. 2009. Chapter 127 - Hymenoptera: Ants, Bees, Wasps. Pages 473 – 484 in Resh VH, Cardé RT, editors. *Encyclopedia of Insects*. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Rankin SM, Palmer JO. 2009. Chapter 70 – Dermaptera: (Earwigs). Pages 259 – 261 in Resh VH, Cardé RT, editors. *Encyclopedia of Insects*. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Reed HC, Landolt PJ. 2019. Chapter 22 - Ants, Wasps, and Bees (Hymenoptera). Pages 459 – 488 in Mullen GR, Durden LA, editors. *Medical and Veterinary Entomology*. 3rd ed. Academic Press, Cambridge.
- Sedlák E. 2005. *Zoologie bezobratlých*. 2. vyd. Masarykova univerzita. Brno.
- Schaefer CW. 2013. True Bugs and Their Relatives, Diversity of. Pages 287 – 295 in Levin SA, editor. *Encyclopedia of Biodiversity*. 2nd ed. Academic Press, Cambridge.
- Sims RW, Gerard BM. 1998. *Earthworms: Notes for the identification of British species*. 4th ed. Field Studies Council, Shrewsbury.
- Smith J, Potts SG, Woodcock BA, Eggelton P. 2008. Can arable field margins be managed to enhance their biodiversity, conservation and functional value for soil macrofauna? *Journal of Applied Ecology* **45**: 269 – 278.
- Somerfield PJ, Clarke KR, Warwick RM. 2008. Simpson Index. Pages 3252 – 3255 in Jørgensen SE, Farth BD, editors. *Encyklopedia of Ecology*. Elsevier, Amsterdam.
- Spellerberg IF. 2008. Shannon–Wiener Index. Pages 3249 – 3252 in Jørgensen SE, Farth BD, editors. *Encyklopedia of Ecology*. Elsevier, Amsterdam.
- Straka D. 2016. *Provozní řád vodního díla Odkaliště Tušimice*. ČEZ a.s., Praha.
- Štýs S, Bízková R, Rotschelová I. 2014. *Proměny severozápadu*. Český statistický úřad, Praha.

- Tropek R, Řehounek J. 2014. Popílkoviště jako nečekaná šance na záchranu bezobratlých živočichů ohrožených vyhynutím. *Živa* **2014**: 285 – 289.
- Undheim EAB, King GF. 2011. On the venom system of centipedes (Chilopoda), a neglected group of venomous animals. *Toxicon* **57**: 512 – 524.
- Van Kessel WHM, Brocades Zaalberg RW, Seinen W. 1989. Testing environmental pollutants on soil organisms: A simple assay to investigate the toxicity of environmental pollutants on soil organisms, using CdCl₂ and nematodes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **18**: 191 – 190.
- Wall DH. 2005. Biodiversity. Pages 136 – 141 in Hillel D, editor. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press, Cambridge.
- Wall DH, Bardgett RD, Behan-Pelletier V, Herrick JE, Jones TH, Ritz K, Six J, Strong DR, Van der Putten WH. 2012. *Soil Ecology and Ecosystem Services*. Oxford University Press, Oxford.
- Wallace RL, Smith HA. 2009. Rotifera. Pages 689 – 703 in Likens GE, editor. *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press, Cambridge.
- Wallace RL, Snell TW. 2009. Chapter 8 - Rotifera. Pages 173 – 235 in Thorp JH, Covich AP, editors. *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. 3rd ed. Academic Press, Cambridge.
- Wallwork JA. 1970. *Ecology of soil animals*. McGraw-Hill, London.
- Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, van der Putten WH, Wall DH. 2004. Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. *Science* **304**: 1629 – 1633.
- Wilson EO. 1971. *The insect societies*. Belknap Press, Cambridge.
- Zagatto MRG, Zañão Júnior LA, Pereira APA, Estrada-Bonilla G, Cardoso EJBN. 2019. Soil mesofauna in consolidated land use systems: how management affects soil and litter invertebrates. *Scientia Agricola* **76**: 165 – 171.
- Zimmer M. 2002. Nutrition in terrestrial isopods (Isopoda: Oniscidea): an evolutionary-ecological approach. *Biological Reviews* **77**: 455 – 493.
- Zullini A, Peretti E. 1986. Lead pollution and moss-inhabiting nematodes of an industrial area. *Water, Air, and Soil Pollution* **27**: 403 – 410.