

ÚSTŘEDNÍ KOMISE BIOLOGICKÉ OLYMPIÁDY

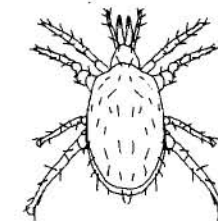
BIOLOGICKÁ OLYMPIÁDA

1993—1994

**ÚVOD
DO PŮDNÍ BIOLOGIE**

Přípravný text pro kategorie A, B

RNDr. Ladislav MIKO



**Institut dětí a mládeže
Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR
Praha 1993**

O b s a h

1. Úvod	1
2. Vznik a vývoj půd (pedogeneze)	2
2.1. Půdní profil a půdní typ	3
3. Půda jako ekosystém	7
3.1. Složky půdního ekosystému	7
3.1.1. Neživé složky půdy (půdní prostředí)	7
3.1.1.1. Pevná fáze	8
3.1.1.2. Kapalná fáze	11
3.1.1.3. Plynná fáze	12
3.1.2. Živé složky půdy (obyvatelé půdy)	12
3.1.2.1. Půdní mikroflóra	13
3.1.2.2. Půdní mikrofauna	14
3.1.2.3. Půdní mesofauna	15
3.1.2.4. Půdní makrofauna	18
3.1.3. Kořeny vyšších rostlin	20
3.1.3.1. Význam kořenů pro půdní prostředí	20
3.1.3.2. Význam kořenů pro rostliny	21
3.2. Fungování půdního ekosystému	24
3.2.1. Fyzikální a chemické procesy	25
3.2.2. Biologické procesy	26
3.2.2.1. Dekompoziční řetězce	27
3.2.2.2. Predační a parazitické řetězce	30
3.2.3. Interakce mezi živou a neživou složkou půdy	32
3.2.4. Interakce mezi živými organismy v půdě	33
3.2.4.1. Interakce rhizosféry	34
3.2.4.2. Interakce půdní fauny a mikroflóry	36
3.2.5. Regulace procesů v půdě, koloběh živin	37
3.2.6. Některé vlivy člověka	39
4. Některé metody studia půdních ekosystémů	41
4.1. Odběr půdních vzorků	42
4.2. Stanovení vlhkosti	42
4.3. Stanovení půdní reakce	43
4.4. Přibližné stanovení obsahu organického uhlíku	44
4.5. Stanovení celulolytické aktivity	44
4.6. Stanovení produkce CO ₂	45
4.7. Aktivita půdní fauny	46
4.7.1. Extrakční metody a mikroskopické zpracování	47
4.7.2. Determinace půdní fauny	49
5. Doporučená literatura	57

1. ÚVOD

Pojem půda je asi každému dobře známý. Přesto není vůbec jednoduché půdu správně a vyčerpávajícím způsobem definovat. Proto se také v průběhu času objevilo několik různých definicí, z nichž každá nahlíží na půdu z trochu jiného úhlu. V zásadě lze říci, že půda je komplikovaný systém, vzniklý postupným zvětráváním hornin, různými přeměnami a přemísťováním. Jedná se tedy o nejsvrchnější vrstvu litosféry, hmotností i objemem poměrně malou, ale nesmírně významnou. Jestliže přijmeme představu naší Země jako velkého organismu, potom tvoří půda jeden z jeho nejdůležitějších orgánů.

Studiem půdy se zabývá speciální vědní disciplína, pedologie (také půdoznalství). Půdu si nelze představit bez nespočetných živých organismů, které jsou její funkční součástí. Studium živé složky půdy se zabývá půdní biologie, jedna z ekologických disciplín, které zaznamenávají prudký rozvoj teprve v posledních desetiletích. Příčinou je neutěšený stav půd na celé planetě, problémy způsobené lidskou civilizací. Jedním z hlavních cílů pedologie i půdní biologie je kromě co nejdokonalejšího poznání půdy hledání východisek ze současné krize, tak aby bylo možno půdu využít jako obnovitelný zdroj v rámci tzv. setrvalého rozvoje ("sustainable development" v anglicky psané odborné literatuře).

V české (ani slovenské) literatuře zatím neexistuje souhrnná učebnice půdní biologie. Většina základních poznatků je roztroušena v různých učebnicích pedologie, zoologie, mikrobiologie, botaniky, mykologie a ekologie (některé z nich jsou uvedeny v doporučené literatuře). Novější výsledky výzkumu jsou u nás mnohdy dostupné pouze v originálních pracích publikovaných v odborných časopisech. Tento stručný úvod do půdní biologie byl vypracován jako pomůcka pro základní orientaci účastníků biologické olympiády, která bude v ročníku 1993-1994 převážně zaměřena právě na půdní biologii.

2. VZNIK A VÝVOJ PŮD (PEDOGENEZE)

Vznik každé půdy je dlouhodobý proces, začínající zpravidla postupným zvětráváním tzv. matečné horniny. Půda se v průběhu času vyvíjí a mění v důsledku působení různých pedogenetických faktorů. Nejvýznamnějšími pedogenetickými faktory jsou druh matečné horniny, tvar reliéfu, podnebí, podzemní voda, živé organismy (zejména vegetační kryt) a v současném období stále více člověk. Pedogenetické faktory ovlivňují půdu prostřednictvím různých procesů, souvisejících především s přemísťováním půdních částic a s působením vody (pohyb rozpuštěných látek - vyplavování, rozpouštění, vztlínání atd.). Úloha živých organismů souvisí především s dodáváním a přeměnami organické hmoty. Pokud se podmínky dlouhodobě příliš nemění, dospěje půda do určité, daným podmínkám odpovídající rovnováhy, která se projeví uspořádáním půdy v určitých vrstvách (stratifikace). Plně vyvinuté půdy s dobrou propustností, odpovídajícím vývoji hlavních pedogenetických faktorů (matečná hornina, klima, vegetační kryt) se nazývají zonální (=historicky odpovídají klimatickým a vegetačním zónám), na rozdíl od nevyvinutých, nezralých půd azonálních (půdy, které ještě nedospěly do rovnovážného stavu, např. nově vznikající půdy na málo zvětralých horninách). Intrazonální půdy jsou méně ovlivněny klimatem, určující jsou spíše faktory propustnosti a obsahu určitých chemických látek, takže podobné půdy mohou vznikat i v rozdílných klimatických podmínkách.

Podle způsobu a místa vzniku možno ještě půdy rozdělit do dvou základních skupin: na půdy zvětralé (vzniklé zvětráváním matečné horniny na místě) a půdy usazené neboli sedimentované (vznikaly na jiném místě, ale byly transportovány větrem, vodou nebo ledovci, přičemž se měnily a byly uloženy často daleko od místa svého vzniku - např. sedimenty nížin a říčních naplavenin, spraše).

Půda (zejména zonální) tedy do značné míry odráží historii příslušné části zemského povrchu.

Na uvedených vlastnostech půdy jsou založeny všechny moderní

systemy klasifikace půd. U nás byla dlouhou dobu používána klasická sovětská klasifikace. Vzhledem k nezávislému vývoji pedologie v mnoha zemích je známá celá řada pedologických klasifikací (americká, německá, francouzská atd.). Moderní česká klasifikace půdních typů do jisté míry shrnuje mezinárodně uznávané půdně klasifikační jednotky (viz Němeček a kol., 1990). V celosvětovém měřítku se používá srovnávací morfogenetická klasifikace půd, schválená a používaná celosvětovými organizacemi sdruženými při OSN (např. světová organizace pro zemědělství a výživu FAO).

2.1. Půdní profil a půdní typ

U většiny vyvinutých půd lze od sebe velmi dobře odlišit jednotlivé vrstvy, lišící se celou řadou vlastností - strukturou, barvou, mocností, konzistencí, obsahem chemických látek atd. Tyto vrstvy jsou podle částic, které v nich převládají, rozčleněny do 3 hlavních vrstev - horizontů - tvořících dohromady tzv. půdní profil, charakteristický pro každý typ půdy. Jednotlivé horizonty se pak dále člení na řadu subhorizontů. Horizonty se označují velkými písmeny (A - C) a subhorizonty obvykle indexy u těchto písmen (např. A₁). Návosloví a zejména označení subhorizontů není ustálené a v dostupné literatuře se používají různé klasifikace.

Svrchní horizont A je charakteristický obsahem většího množství organické hmoty, proto se nazývá humusový. Jeho rozčlenění na subhorizonty je silně závislé na typu vegetace a podmínkách prostředí. Nejvýrazněji je rozvrstven v lesních ekosystémech s pomalým rozkladem mrtvé organické hmoty a kyselou reakcí prostředí (např. jehličnaté lesy, bučiny). Tady na povrchu půdy leží různě tlustá vrstva, tvořená prakticky pouze mrtvou organickou hmotou. Nazývá se pokryvný nebo nadložný humus a označuje se A_o. Podle stupně rozkladu organické hmoty se dále člení na několik vrstev. Nejsvrchnější z nich tvoří opad

(označení A_0 nebo L - z anglického litter), tvořený nezměněnými zbytky rostlinných a živočišných těl, t.j. opadlým listím nebo jehličím, odumřelou trávou a mechem, kůrou, větvičkami atd. Pod opadem je vrstva starších organických zbytků, různě pozměněných mechanickou a enzymatickou činností živých organismů i volných enzymů, nazývaná hrabanka, neboli fermentační vrstva (označení F), složená ze dvou podvrstev: svrchnější drti (F_1 neboli A_{02}) ve které lze ještě rozeznat struktury jednotlivých úlomků organické hmoty (kousky listí nebo jehliček, drť z kůry apod.) a spodnější měli (F_2 neboli A_{03}), tvořené beztvárymi, obvykle tmavými organickými látkami s mikroskopickou strukturou.

Pod nadložním humusem leží humózní subhorizont A_1 (někdy označován A_h), obsahující v převážné míře jemné minerální částice, promíchané s humusovitými částicemi, které mu dodávají tmavé zabarvení. Český název pro tuto vrstvu je prst neboli mydát. Subhorizont A_2 je obvykle u těchto půd tvořen tenkou vrstvičkou světlé barvy, protože tmavé humusové látky jsou odtud vymývány do nižších horizontů. Nazývá se eluviální (vybělený) horizont. V závislosti na podmínkách může být nezřetelný nebo i chybět.

Uvedené členění horizontu A může být mnohem jednodušší, některé vrstvy mohou chybět nebo být málo vyvinuty (např. u travinných ekosystémů nahrazuje opad a hrabanku tzv. stařina, u skalních stepí nadložní vrstva není vyvinuta atd.), nebo mohou úplně chybět, jako je tomu například u orných půd, kde je svrchní vrstva půdy činností člověka proměněna v prakticky homogenní ornici.

Střední horizont B (označovaný jako metamorfovaný) lze charakterizovat jako horizont minerální, protože je tvořen jemnými minerálními částicemi. Jen ve svrchním subhorizontu může být někdy uložena tmavě zbarvená vrstvička humusových látek, které jsou sem vyplaveny z eluviálního horizontu (A_2), tento subhorizont se označuje B_1 nebo také B_h a nazývá se iluviální. Zbylou část B horizontu lze ještě obvykle rozčlenit na dva subhorizonty - B_2 a B_3 , zbarvené hnědavě, okrově nebo červeně sloučeninami železa.

Spodní horizont C je tvořen nezvětralou nebo málo zvětralou

matečnou horninou, ze které půda vzniká, proto se nazývá substrátový.

Za určitých podmínek mohou být půdy složeny pouze ze dvou horizontů (A-C nebo B-C). Příkladem můžou být krasové půdy - rendziny - kde je různě silná vrstva silně humózního, tmavého horizontu A přímo na skalním podloží (C).

Podle toho, jaké subhorizonty jsou přítomny, podle jejich mocnosti, chemického složení a barevnosti a dalších vlastností, odrážejících konkrétní podmínky vzniku té které půdy, rozlišujeme tzv. půdní typy a subtypy. Z hlediska půdoznalectví jsou dnes už půdní typy příliš širokou jednotkou a proto se jako základní používají půdní subtypy, pro potřeby půdní biologie však obvykle vystačíme s úrovní půdních typů nebo jejich skupin. Ze zonálních půd se u nás lze setkat častěji se skupinou podzolových půd (vznikají v chladném podnebí pod jehličnatým lesem), hnědozemí (mírné a vlhké podnebí, listnatý opadavý les) a černozemí (polosuché kontinentální podnebí, horniny se zásaditou reakcí, step). První dvě skupiny mají vyvinuty všechny 3 horizonty, u černozemě je horizont A_1 velmi silný a chybí horizont B.

Půdní druh na rozdíl od půdního typu určuje poměr minerálních částic s různou velikostí (jíl - písek - skelet), podle čeho lze rozlišovat půdy hlinité, hlinito-písčité, písčito-hlinité, písčité a skeletnaté.

Podrobnější klasifikace půdních typů a druhů přináší odborná pedologická literatura.

3. PŮDA JAKO EKOSYSTÉM

Je jen velmi málo tak složitých a komplikovaných a přesto dobře fungujících systémů, jakým je půda. Každá půda je součástí určitého ekosystému v širším smyslu (např. louky, pole, lesa apod.), současně ji však možno bez nadsázky považovat za samostatný ekosystém s velmi komplikovanou strukturou a všemi typickými atributy ekosystému. Z tohoto hlediska pak možno studovat půdu jak z hlediska jejího složení, tak i z hlediska procesů, které v ní probíhají.

3.1. Složky půdního ekosystému.

Půda je obvykle charakterizována jako složitý, polydisperzní třífázový systém, t.j. systém složený z pevné, plynné a kapalné složky, které interagují jednak navzájem a jednak se živými organismy. Je důležité si uvědomit, že živé organismy jsou sice obyvateli půdy, ale nikoliv pouze obyvateli - jsou taky nedílnou součástí půdy. Bez nich by půda nebyla půdou, ale jen mrtvým substrátem.

3.1.1. Neživé složky půdy (půdní prostředí)

Půda je jediným prostředím živých organismů, kde je zastoupena jak pevná, tak i kapalná a plynná fáze v takových poměrech, že umožňuje současnou existenci typicky suchozemských organismů i druhů adaptovaných na vodní prostředí nebo vyžadujících alespoň vysokou koncentraci vodní páry. Prostorové uspořádání, struktura půdy vytváří i na relativně velmi malých plochách tak složitý

systém chodeb, pórů, mikroprostorů, vodních filmů a mikroskopických "bazének", že je zdrojem obrovského množství nejrozličnějších prostorových nik, jejichž rozměry i umístění se navíc s časem stále mění. V důsledku toho je velmi pravděpodobné, že se dva organismy, žijící fyzicky v nevelké vzdálenosti prakticky nikdy nepotkají. To umožňuje obrovskou rozmanitost půdního života a následně nesmírnou složitost dějů, probíhajících v půdním prostředí.

3.1.1.1. Pevná fáze

Samotnou makroskopickou podobu dávají půdě především její pevné složky. Pokud o nich mluvíme, musíme ihned rozlišit podle původu složky anorganické (minerální) a složky organické (mrtvé části organismů a produkty jejich rozkladu a přeměn - tzv. humusové látky).

Z minerálních složek půdy lze rozlišit podle velikosti jednotlivých částí skelet (velké úlomky kamenů, štěrky apod.), písek a jílové částice. Právě jíl má pro vlastnosti půdy rozhodující význam. Je tvořen mikroskopickými částicemi (menšími než 0.002 mm) s typickou stavbou a vrstevnatou strukturou. Chemické složení jílových částic a uložení jednotlivých prvků v jeho krystalové mřížce umožňuje vznik záporného náboje, schopného vázat protonové ionty (H^+) nebo různé další druhy kationtů. Díky tomuto náboji se stává součástí tzv. organominerálních komplexů v půdě, které jsou důležité pro půdní strukturu a pro schopnost půdy adsorbovat minerální látky.

Když pomineme živé organismy, organickou složku půdy tvoří jednak organické zbytky (viz výše) a jednak tzv. humusové látky, vznikající přeměnou produktů rozkladu mrtvých těl rostlin a živočichů, jak působením fyzikálních, chemických, tak i biologických (živé organismy) faktorů. Chemické složení humusu je předmětem rozsáhlých studií a mnoha diskusí. Podle novějších názorů je zřejmé, že žádný obecný chemický vzorec humusu neexistuje, jednak proto, že mezi humusové látky je řazeno mnoho různých druhů organických molekul a jednak proto, že jsou

chemicky nestabilní. Hlavními složkami, ze kterých jsou humusové látky složeny, jsou polysacharidy, aminové kyseliny a fenolické látky, které jsou v různých druzích humusu různě zastoupeny a různě uspořádány. Humus nemá žádnou pevnou strukturu, je tedy beztvář (amorfní) a rozměry jeho částic se mohou měnit. Nejblíže této skutečnosti odpovídá představa humusových látek jako složitých, rozvětvených polymerů s řadou funkčních skupin, které mají v zásadě spirální strukturu, umožňující svinování a natahování a tím i změnu rozměrů. Takto "košaté" molekuly mají pochopitelně velký aktivní povrch, pravděpodobně proměnný náboj a tendenci vytvářet komplexy s půdními kationty. Humusové látky, podobně jako jílová složka půdy, mají velkou sorpční kapacitu a spolu s jílem vedle některých dalších sloučenin (oxidů železa a hliníku, uhličitánů) umožňují spolu s činností půdních organismů (produkce slizu, růst houbových vláken apod.) vznik tzv. půdních agregátů (organominerálních komplexů), důležitých pro půdní strukturu.

Podle podmínek vzniku rozlišujeme tři základní typy humusu. V podmínkách chladného a vlhkého podnebí, na půdách s malým množstvím zásad je rozklad organických zbytků relativně pomalý. Zde rostoucí rostlinná společenstva (vrš, jehličnany, buk) poskytují opad s vysokým obsahem ligninu, s nedostatkem dostupného dusíku. V těchto podmínkách mohou žít pouze některé druhy půdních organismů. Nedokonalým rozkladem vznikají organické kyseliny, které nemohou být neutralizovány zásadami. Hlavním produktem rozkladu jsou fulvokyseliny hnědé a žlutohnědé barvy, které okyselují substrát, brání rozvoji bakterií a aktinomycetů, a napomáhají rozvoji houbových vláken. Současně chemicky narušují existující jílové koloidy, vytváří pozměněné organominerální komplexy, které mohou být vyplavovány do hlubších horizontů. Pomalý rozklad způsobuje vznik typických vrstev čistě organického horizontu A_0 , opadu a hrabanky, ve kterých lze ještě dlouho rozeznat části původních rostlinných struktur. Tento typ humusu - mor - je silně prorostlý houbovými vlákny a proto se mu někdy říká mykogenní humus.

V mírnějších podmínkách, obvykle porostlých různými listnatými lesy, má vznikající opad trochu jiný charakter. Obsah ligninu je

nižší a dostupného dusíku je více. To umožňuje větší rozvoj půdních organismů, zejména půdních členovců. Jejich činností se půda lépe provzdušňuje a kromě houbových vláken je umožněn také rozvoj bakterií a aktinomycetů. Rozklad probíhá poměrně rychle, není však úplný. Vzniká moder, práškovitý typ humusu, ve kterém jsou produkty dílčího rozkladu organické hmoty ve formě exkrementů promíseny s nerozloženými úlomky a minerálními částicemi. Vzhledem k tomu, že moder je typický vysokým obsahem exkrementů půdních živočichů, používá se někdy taký název koprogeenní humus.

Bohaté půdy s dostatečným obsahem půdních zásad a dusíku, (obvykle v teplém a vlhkém klimatu - např. pod travnatými porosty, v některých typech lesů, v zahradách apod.) umožňují dokonalejší rozklad a přeměny mrtvé organické hmoty. Dominantním produktem jsou huminové kyseliny, které vznikají jednak působením půdní mikroflóry a jednak syntézou rozkladných produktů v trávicím traktu půdních organismů (např. žížal, kterých bývá v těchto podmínkách vysoký počet). Huminové kyseliny vytvářejí pevně chemicky vázané organominerální komplexy s jílovitými částicemi. Tyto mikroagregáty jsou stálé a dodávají půdě tmavé zbarvení (viz výše). Tento typ humusu se nazývá mul neboli jemný humus.

Jak je zřejmé, neživá organická složka půdy - označovaná jako humus - je velmi složitá struktura a různorodého původu. Přitom v posledním období mnozí autoři opouští samotný název humus a nahrazují ho širším (ale přesnějším) výrazem organická hmota (anglicky organic matter). Ty frakce organické hmoty, které jsou v půdě vázány ve formě složitých molekul a organominerálních komplexů se potom podle způsobu, jakým jsou vázány označují jako fyzicky chráněná nebo chemicky chráněná (vázaná) organická hmota. Analogicky je i rychlému rozkladu odolávající organická hmota, vázaná činností živých organismů, nazývána biologicky chráněnou organickou hmotou.

3.1.1.2. Kapalná fáze

Kapalnou fází půdy představují různé druhy půdní vody. Hlavním zdrojem podpovrchové vody jsou atmosferické srážky, ale lokálně může do půdy vstupovat i z okolního prostředí. Velká část vody, která se neodpaří z povrchu půdy nebo po něm neodteče, infiltruje do půdního profilu a buď jím protéká ve směru zemské tíže (gravitační voda), nebo se pohybuje jiným směrem, případně stojí. Zde možno rozlišit vodu kapilární, která se vyskytuje v kapilárních pórech a může vzlínat i proti působení gravitace a vodu adsorpční, vázanou na povrchu pevných částic hygroskopicky nebo osmoticky. Půdní voda rozpouští celou řadu v půdě přítomných látek, proto se v pedologické praxi taky používá označení půdní roztok. Po proniknutí na nepropustnou minerální vrstvu se gravitační voda koncentruje ve spodní části půdního profilu ve formě tzv. podzemní vody, která může být zdrojem kapilární vody v půdě.

Funkcí půdní vody je několik, všechny mají pro fungování půdního ekosystému velký význam. Už zmiňovanou tvorbu půdního roztoku podmiňuje fungování vody jako rozpouštědla. Běžně obsahuje rozpuštěné soli sodíku, draslíku, hořčíku, vápníku, chlóru a ionty NO_3^- , SO_4^{2-} a HCO_3^- , dále různé organické látky a některé další ionty, z nichž důležité jsou zejména stopové prvky a těžké kovy (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn).

Zcela zásadní funkcí půdní vody je transport rozpuštěných látek, vzhledem k mobilitě vody. Poměrně rychlý pohyb půdního roztoku je předpokladem mnoha chemických i biologických procesů v půdě, závislých na přesunu chemických substrátů. Půdní roztok je tedy velice dynamickou složkou půdního ekosystému, která se neustále pohybuje a mění a tím ovlivňuje celé půdní prostředí.

Další z funkcí vody v půdě je tvorba reakčního prostředí pro řadu chemických a biochemických reakcí, včetně pufrčních vlastností a ovlivnění fyzikálních faktorů půdního prostředí (vlhkost, teplota apod.). Navíc voda samotná do mnoha chemických reakcí vstupuje.

V neposlední řadě je potřeba uvést velký význam vody jako

životního prostředí živých organismů. Týká se to jak druhů vyžadujících k životu přímo vodní prostředí, tak i ostatních půdních organismů, obvykle málo tolerantních k nízké vlhkosti.

3.1.1.3. Plyná fáze

Plyná fáze půdy je tvořena půdním vzduchem, který vyplňuje volné prostory a póry mezi pevnými částicemi, které nejsou vyplněny vodou. Složení půdního vzduchu je ovlivňováno typem a strukturou půdy a procesy, které v ní probíhají. Zásadní rozdíl ve složení půdního vzduchu ve srovnání s atmosférickým spočívá především ve vyšší koncentraci oxidu uhličitého, který je do půdního prostředí uvolňován respirací půdních organismů a kořenů.

Ve zhuštěných půdách je difúze pomalejší, takže obsah oxidu uhličitého se může velmi výrazně zvýšit a zásoby dostupného kyslíku se mohou až úplně vyčerpat.

3.1.2. Živé složky půdy (obyvatelé půdy)

Každá půda je oživena obrovským množstvím nejrozmanitějších organismů. Jejich studiem se zabývá vědní disciplína půdní biologie neboli pedobiologie. Půdní organismy lze členit z nejrozmanitějších hledisek do různých skupin. Kromě systematického zařazení je důležitým aspektem funkce daného organismu v půdě, místo jeho výskytu, jeho velikost apod. V následujícím stručném přehledu jsou zahrnuty alespoň částečně všechny tyto aspekty. Funkce jednotlivých skupin organismů je probrána v dalších kapitolách.

Základní a nejčastěji užívané rozdělení půdních organismů (edafonu) souvisí s praktickými postupy při jejich pozorování nebo extrakci z půdy, které závisí především na jejich velikosti. Kromě rostlinných kořenů, tvořících specifickou kategorii, rozčleňujeme edafon podle velikosti na

- mikroedafon (velikost přibližně do 0.2 mm), v rámci kterého rozlišujeme mikroflóru a mikrofaunu,
- mesoedafon (velikost přibližně mezi 0.2 až 2 (-10) mm), zastoupený mesofaunou
- makroedafon (velikost nad 2 resp. 10 mm), představovaný makrofaunou

3.1.2.1. Půdní mikroflóra

Z hlediska početnosti, biomasy a významu nejdůležitější skupina půdních organismů. Její zástupci mají v půdním ekosystému různé funkce, nejčastější a nejvýznamnější je schopnost půdní mikroflóry rozkládat organické látky postupně až na minerální látky (dekompozice, mineralizace). Půdní mikroflóra je tvořena zástupci půdních bakterií, aktinomycetů, hub, sinic a řas.

Bakterie jsou vzhledem k své velikosti nejpočetnějšími organismy v půdě. Odhaduje se, že v průměrné půdě je asi 10^8 až 10^9 jedinců v jediném gramu suché půdy. Počet různých druhů či kmenů bakterií se odhaduje celkem asi na 30 000. Biomasa bakterií je ovlivněna jejich velikostí, takže tvoří asi třetinu až polovinu mikrobiální biomasy v půdě. Jsou přítomny ve všech půdách, jejich význam narůstá v zhoršených podmínkách, kde se nemůže uplatnit jiná mikroflóra (např. při zhoršené aeraci půdy). Díky velmi rychlému množení a krátké generační době, se bakterie dokážou velmi rychle přizpůsobovat podmínkám prostředí. Navíc mají některé schopnosti (anaerobní respirace, chemolithotrofní výživa, schopnost poutat vzdušný dusík, využití metanu), díky kterým mají bakterie zásadní význam v koloběhu hlavních živin, ve využití dostupné energie chemických vazeb a v cyklech biogenních prvků (uhlík, dusík, fosfor, síra).

Mezi bakterie patří i aktinomycety, které tvoří vlákna (hyfy) podobně jako houby, ale na rozdíl od nich jsou tato vlákna mnohem tenčí a kratší.

Houby jsou sice v půdě méně početné (okolo 10^4 až 10^6 částic v gramu půdy), ale vzhledem k své stavbě (hyfy) a větší velikosti mohou v půdách dosáhnout až 70% živé půdní biomasy. Mohou být

volně žijící, parazitické nebo žijí v symbióze s kořeny vyšších rostlin (mykorrhiza). Patří k méně prozkoumaným organismům, přitom počet jejich druhů se odhaduje celkem až na 1500000 druhů. Hlavní význam hub spočívá v jejich schopnosti rozkládat některé těžko rozložitelné a komplikované organické látky, např. celulózu a lignin. Tím se uvolňují jednodušší molekuly, zpracovatelné bakteriemi a ostatními půdními organismy. Významná je i schopnost hub uvolňovat ionty minerálních látek do prostředí a vést rozpuštěné anorganické a organické látky pomocí hyf.

Řasy a sinice se v půdě vyskytují většinou jen v nejsvrchnější vrstvě, kde mohou využívat dopadající sluneční světlo. Obsahují chlorofyl a tak jsou pomocí fotosyntézy schopny autotrofní výživy. Jejich význam spočívá v primární produkci organické hmoty, dále se podílejí na tvorbě půdní struktury a ovlivňují erozi půdy. Jejich početnost značně kolísá, od 10 do asi 10^6 jedinců v gramu půdy. Celkový počet druhů se odhaduje na 60000.

3.1.2.2. Půdní mikrofauna

Nejmenší zástupci půdní fauny jsou podobně jako bakterie v případě mikroflóry nejpočetnější skupinou půdní fauny. Zařazují se sem především půdní prvoci, dále hlístice a některé méně početné nebo méně významné skupiny, jako např. vířníci (Rotatoria), želvušky (Tardigrada) apod.

Prvoci (Protozoa) se v početnosti vyrovnají půdním houbám (10^4 až 10^5 jedinců v gramu půdy), jejich biomasa je však podstatně menší. Systematika prvoků je poměrně složitá, významnější půdní prvoci patří mezi nálevníky (Ciliophora) a kořenonožce (Rhizopoda). Celkový počet druhů prvoků se odhaduje na 100000. Jejich význam v půdě spočívá v způsobu výživy. Jsou schopni využívat jednak mrtvé tkáně jiných organismů, jednak volně rozpuštěné organické látky (osmotrofie) a mnozí jsou významnými bakteriofágy nebo predátory, takže umožňují regulaci početnosti ostatních půdních mikroorganismů. Tuto funkci mají především půdní měňavky a krytenky (Testacea) - typická půdní skupina prvoků blízké příbuzných měňavkám, která si vytváří

složité schránky z organických látek a případně i anorganických částic půdy.

Hlístice (Nematoda) patří velikostí na rozhraní mikro- a mesofauny. Vyjma prvoků jsou nejpočetnějšími zástupci půdní fauny, např. v zemědělských půdách se jejich počet pohybuje od 10^4 do 10^7 na čtvereční metr půdy. Taxonomie a tím i určování hlístic jsou velice složité. Hlístice patří mezi organismy s nejširším potravním spektrem v půdě, jsou známy druhy všežravé i velice specializované, např. parazitické, mykofágní, bakteriofágní, detritožravé atd. Odhaduje se, že v půdách může žít až 500000 různých druhů hlístic. Jejich význam, kromě toho že jsou důležitým zdrojem potravy jiných organismů, spočívá v regulaci půdních procesů (ovlivnění početnosti mikroflóry, kořenů apod.). Přímý podíl na rozkladu organické hmoty je malý.

3.1.2.3. Půdní mesofauna

Nejdůležitějšími představiteli půdní mesofauny jsou různé skupiny drobných půdních členovců, pro které se někdy užívá i pojem půdní mikroarthropoda, a drobní kroužkovci roupice (Annelida, Enchytraeidae). Členovci se v půdě vyskytují v překvapivém množství druhů a životních forem, rovněž jejich celková početnost je v některých půdách velmi vysoká (10^2 až 10^7 jedinců na 1 m^2). Řada zástupců této skupiny půdních organismů přesahuje velikostí rozmezí pro mesofaunu a bývá zařazena do makrofauny (např. stonožky, mnohonožky, brouci). Z praktických důvodů budou půdní členovci obecně probráni v rámci této podkapitoly.

Roupice (Enchytraeidae), menší a světle zbarvení příbuzní žížal, mohou za jistých okolností dosahovat rovněž velmi vysokých počtů, takže se početností (v ČR $2 \cdot 10^3$ - $2 \cdot 10^5$ jedinců na 1 m^2) vyrovnají nebo dokonce převýší početnost půdních členovců. Jejich funkce v půdě je obdobná jako funkce žížal, které často úplně nahrazují (např. v některých lesních půdách)

Z půdních členovců (Arthropoda) se v půdách pravidelně vyskytují zástupci všech tří hlavních skupin: koryši jsou

zastoupení stinkami (suchozemští stejnonožci = Isopoda), klepítkatci resp. pavoukovci pavouky, štirky, sekáči a zejména různými skupinami roztočů, mnohonozí vzdušnicovci stonožkami, mnohonožkami, stonoženkami a drobnuškami a šestinozí vzdušnicovci hmyzenkami, vidličnatkami, chvostoskoky a různými zástupci hmyzu. Členovci jsou důležitými články potravních řetězců v půdě, v zásadě je lze rozdělit na druhy dravé (stonožky, pavouci, sekáči, někteří roztoči, některé larvy a dospělci hmyzu, např. brouků, dvoukřídých, blanokřídých apod.) a druhy živící se půdní mikroflórou a organickým detritem (mykofágní, bakteriofágní, detritožravé, saprofágní apod.). Postavení půdních členovců v trofických řetězcích naznačuje jejich funkci jako regulátorů procesů v půdě, prostřednictvím regulování početnosti mikroflóry a ostatních skupin půdních organismů. Složitě potravní sítě v půdě umožňují tuto regulaci systémem velkého počtu zpětných vazeb. Velká část půdních členovců žije na povrchu půdy nebo v její nejsvrchnější části (tzv. epigeická fauna - např. brouci, pavouci, sekáči, stonožky a mnohonožky). V samotné půdě převládají obvykle menší druhy, především roztoči a chvostoskoci, tvořící podstatnou část tzv. hypogeické (podpovrchové) mesofauny.

Rozsáhlá a velice různorodá skupina roztočů (kdysi řád Acarina, dnes považována spíše za soubor řádů) má v půdě nejrozličnější funkce. Dravé druhy se podílejí na přeměně hmoty a energií v potravně-kořistnických potravních řetězcích, detritožravé, saprofágní, mykofágní apod. druhy jsou významnými regulátory velikosti populací mikroflóry a tím i rychlosti rozkladu a mineralizace organických látek, i když samy se aktivně na rozkladu podílejí jenom v malé míře. Nejpočetnější jsou v půdě obvykle zastoupení pancířníci (Oribatida). Jak napovídá český název, jejich tělo je často pokryto silně sklerotizovaným pancířem. Ve srovnání s ostatními skupinami půdních roztočů jsou obvykle výrazněji a tmavěji zbarvení (někteří až černí) a na povrchu těla mají vyvinuty různé povrchové struktury, např. lišty, destičky, hroty apod. Je jich známo několik tisíc druhů (v Čechách kolem 500) a v půdách dosahují početnosti řádově od 10^1 až do 10^5 jedinců na 1 m^2 . Kromě detritu je jejich potravou půdní mikroflóra. Podobně potravně specializovaní, ale obvykle

o řád až dva řády méně početní jsou slabě sklerotizovaní, bělaví nebo žlutaví a často dlouze a řídce ochlupení roztoči ze skupiny Acaridida z příbuzenstva skladokazných roztočů, kteří jsou hojní např. v některých polních půdách. Draví roztoči patří především do řádu čmelíkovců (Gamasida), kde je rovněž celá řada významných ektoparazitických a foretických druhů, známých ze srstí a hnízd půdních savců. Jejich početnost závisí na konkrétních podmínkách, zejména na potravní nabídce a typu společenstva, v půdě je obvykle jejich početnost srovnatelná nebo nižší než početnost zástupců Acaridida. Jejich typickým znakem je oválné tělo a dobře, často velmi mohutně vyvinuté ústní orgány. Jsou obvykle poměrně dost silně sklerotizovaní, nejčastěji oranžově hnědé, červenohnědé nebo žlutohnědé barvy. Jak dravce, tak i detritožravé druhy nalezneme v řádu Actinedida (sametkovci), většinou nevýrazně zbarvených a slabě sklerotizovaných roztočů různé velikosti. Známou výjimkou jsou právě sametky, s nápadným červeným, oranžovým nebo zeleným zbarvením a velmi hustým a jemným ochlupením. Actinedida mohou být v některých půdách nejpočetnějším řádem roztočů (např. některé orné půdy), obvykle ale jejich počet bývá asi o řád nižší než počet pancířníků.

Chvostoskoci (Collembola) jsou nejpočetnějšími šestinohými členovci v půdě. Způsob výživy i význam mají podobný jako pancířníci, vzhledem k měkkému povrchu těla jsou však citlivější na vysychání, takže bývají početnější ve vlhkém prostředí. Početně se řádově obvykle vyrovnají nebo téměř vyrovnají pancířníkům. U chvostoskoků lze poměrně snadno určit, který půdní subhorizont obvykle obývají, protože ve vývoji velmi citlivě reagovali na podmínky prostředí a vytvořili řadu adaptací. Typicky epiedafické druhy žijící na povrchu nebo v jeho blízkosti jsou velké, s dlouhými končetinami i skákací vidlicí, dobře vyvinutým zrakem, často silně ochlupené, s výraznou pigmentací apod., zatímco v hloubce půdy žijící druhy euedafické jsou malé, bílé nebo žlutavé, velmi jemně ochlupené, často bez očí, s krátkými končetinami a často i s úplně redukovanou skákací vidlicí. Přechod mezi těmito typy tvoří druhy mesoedafické.

3.1.2.4. Půdní makrofauna

Tuto skupinu půdních živočichů tvoří především žížaly, velké druhy půdních členovců (stonožky, mnohonožky, pavouci, mravenci, termiti, brouci atd.) a měkkýši.

Význam žížal (Annelida, Lumbricidae) pro půdní ekosystém je znám už od dob Charlese Darwina, který je jako první podrobil podrobnějšímu zkoumání. Pokud vezmeme jako kritérium významnosti biomasy, pak jsou žížaly bezkonkurenčně nejvýznamnějšími půdními živočichy, při počtech od asi 10 do několika set jedinců na metru čtverečním půdy mohou dosahovat biomasy od 1 - 2 až po více než 300 g na m², což v přepočtu na hektar znamená 3 t biomasy (průměrné hodnoty se pohybují kolem necelé tuny)! Žížaly zapracovávají organickou hmotu do půdního horizontu, zatahují ji z povrchu do hloubky a po invazi mikroorganismů ji požírají spolu se zemínou. Ve střevě se organická hmota s pomocí střevní mikroflóry zčásti rozkládá a váže se s pevnými částicemi půdy do formy velmi stabilních hrudkovitých útvarů, vylučovaných ve formě zvláštního trusu, tzv. výmětů. Tyto výměty velmi významnou měrou přispívají k tvorbě půdní struktury a tak přímo ovlivňují všechny procesy, které v ní probíhají. Aktivní prorývání a "prokousávání" se půdou navíc výrazně snižuje zhutnění půdy a zlepšuje její provzdušnění. Druhové bohatství žížal není tak velké jako u ostatních půdních živočichů, na našem území jich žije několik desítek druhů.

Většina ostatních zástupců půdní makrofauny je tvořena druhy s povrchovou aktivitou, které v půdě prožívají jenom část svého života, anebo se do určité hloubky dostanou při lovu kořisti.

Zvláštním případem s velkým významem pro ekosystémy jsou mravenci (v tropech také termiti), sociální hmyz s převážně dravým způsobem života. Některé druhy urychlují svou činností rozklad složitých organických látek, např. z dřeva a kořenů. Mezi dravce patří rovněž stonožky (Chilopoda), které žijí převážně v hrabance na povrchu půdy nebo v trouchnivějícím dřevu. Pohybují se poměrně rychle a na velkém prostoru a tak se spolu s některými dravými druhy brouků (střevlíci, drabčáci), pavouky apod. často dostávají do zemních pastí.

Z větších detritožravých druhů mají často poměrně velkou biomasu mnohonožky (Diplopoda) a zástupci plžů (Gastropoda), rovněž převážně žijících v nejsvrchnějších vrstvách půdy s vysokým obsahem mrtvé organické hmoty. Hojněji žijou zejména na půdách s vyšším obsahem vápníku, který potřebují pro inkrustaci kutikuly resp. ulit. V některých vápnatých půdách vzniká činností mnohonožek velké množství jemného, drobného trusu, který tvoří hlavní makroskopickou součást humusu v těchto půdách.

Zvláštní postavení mezi půdními živočichy mají koprofilní a nekrofilní druhy brouků (listorozi brouci, hrobařici, mrchožrouti). Za půdní obyvatele lze označit jenom jejich larvální stadia, žijící na předem připravené zásobě trusu býložravců (koprofágové) nebo na mrtvých tělech živočichů (nekrofágové) často v značné hloubce v půdě. K půdní makrofauně řadíme i řadu býložravých a detritofágních larev brouků, např. známých ponrav chroustů, larev nosatců, částečně dravých drátovců (larev kovaříků) apod. a zejména larvy dvoukřídlých (Diptera), které jsou v půdě obvykle nejpočetnějším zástupcem hmyzích larev. Na mokřích biotopech mohou např. velké larvy tiplic svou biomasou patřit mezi dominantní zástupce půdní makrofauny.

Hlavní funkcí většiny zmíněných zástupců půdní makrofauny je prvotní zpracování mrtvé organické hmoty, její rozdrobení a částečný rozklad a tvorba drobného trusu, přispívajícího k tvorbě půdní struktury (koprogenní humus). Mnozí jsou rovněž významným zdrojem potravy pro půdní predátory.

Vzhledem k způsobu života musíme mezi půdní makrofaunu počítat i velké živočichy, žijící část nebo celý život pod povrchem půdy, jako jsou různí drobní půdní hmyzožravci (krtek, rejsci) a hlodavci (hraboši, myšice, myši, norníci atd.). Někteří autoři pro tuto skupinu živočichů používají termín půdní megafauna. Půda je po určité době života domovem i některých dalších živočichů, kteří si v zemi hloubí nory. Tyto živočichy neřadíme mezi půdní živočichy, ale jejich činnost, podobně jako činnost megafauny, může mít pro půdní ekosystém velký význam (např. hromadění zásob nebo vystýlka nor přispívá k obohacování půdy organickou hmotou a je prostředím pro život mnoha druhů edafických živočichů).

3.1.3. Kořeny vyšších rostlin

Kořeny vyšších rostlin se v půdním prostředí mohou vyskytovat v obrovské biomase. U některých porostů může dosahovat stejnou hmotnost, jako biomasa nadzemních částí rostliny. V lesních porostech se jedná často až o desítky tun živé hmotnosti na jeden hektar půdy. Z hlediska půdního ekosystému jsou kořeny zcela specifickým prvkem - na jedné straně se samy podílejí nebo ovlivňují půdní procesy, na druhé straně vlastně propojují půdu a nadzemní ekosystémy. Z tohoto hlediska je nezbytné pro pochopení jejich podílu v půdních procesech znát jednak anatomii rostlinných kořenů a jednak jejich funkce spojené jak s půdním prostředím, tak i se samotnou rostlinou. Z důvodů komplexnosti budou v této kapitole stručně zmíněny i některé procesy a funkce, které jsou podrobněji probrány v následujících kapitolách.

3.1.3.1. Význam kořenů pro půdní prostředí

Ovlivnění půdního prostředí kořeny se projevuje jak na neživých, tak i na živých složkách půdního ekosystému.

Kořeny vyšších rostlin fyzikálně i chemicky rozrušují matečnou horninu, tím zvětšují její povrch a umožňují větší kontakt matečné horniny s prostředím, co může urychlit zvětrávání vlivem chemických a fyzikálních podmínek prostředí, tedy tvorbu půdy (pedogenezi).

Kromě toho kořeny zachycují drobné částice půdy a zpomalují nebo úplně zastavují jejich další pohyb ve směru působení vody nebo větru, takže zabraňují erozi. Podobně zadržují kořeny (i nadzemní části rostlin) vodu. Čím hustější a členitější je spleť kořenů, tím větší je množství zachycené vody i doba, po kterou zůstává na místě, bez pohybu.

Kromě fyzikálního ovlivnění půdy kořeny působí i na chemické složení půdy. Aktivní působení spočívá v uvolňování chemických látek (např. kořenových exsudátů, allelopatických látek jako

např. u akátu nebo kyslíku u mokřadních rostlin apod.) nebo jejich selektivním příjmem (viz také následující podkapitulu).

Pasivní ovlivnění spočívá v uvolňování chemických látek z odumřelých kořenů v průběhu jejich rozkladu. Podobně jako nadzemní části rostlin mohou obsahovat látky chránící před vlivy prostředí a herbivory (např. taniny a třísloviny), látky měnící pH prostředí, soli (u halofytů) apod. Některé důležité živiny, např. vápník či fosfor, získané z větší hloubky půdy se při rozkladu kořenů dostávají do svrchní vrstvy půdy. Kořeny rovněž působí na živé složky půdy. Mohou být potravou půdních organismů, současně mohou výrazně ovlivňovat prostorové a chemické složení jejich prostředí. Kromě toho jsou známy specifické druhy symbiózy s půdní mikroflórou. S houbami vytvářejí tzv. mykorhizu, kdy houby usnadňují kořenům příjem látek z půdy a využívají části organických látek produkovaných rostlinou. Mykorhiza je známá u velkého množství vyšších rostlin (až 93%). Podobně interagují kořeny vyšších rostlin s některými bakteriemi, které využívají živiny a chráněné prostředí uvnitř kořenů a umožňují rostlině přijímat dusík v plynné formě přímo ze vzduchu. Tím zvýhodňují svého hostitele hlavně v prostředí s nedostatkem dusíku. Protože v místech infekce kořenů těmito bakteriemi vznikají zvláštní hlízovité útvary, nazývají se tyto bakterie souhrnně hlízkové bakterie. Tento typ symbiózy se vyskytuje např. u bobovitých, u olší i u jiných rostlin.

Symbiotické vztahy rostlin budou blíže diskutovány v kapitole o interakcích půdních organismů.

3.1.3.2. Význam kořenů pro rostliny

Kořeny zásobují rostliny minerálními látkami a vodou z půdy. Dostatek vody v pletivech je jedním ze základních předpokladů života rostliny. Podobně jako v půdě, voda slouží jako transportní médium (všechny potřebné látky se pohybují tělem rostliny rozpuštěny ve vodě), jako rozpouštědlo i jako zásobárna molekul vodíku a kyslíku pro chemické reakce. Pohyb vody cévami rostlin je řízen kořenovým vztlakem a transpirací (vypařováním).

Kompaktnost celého vodního sloupce je udržována kohezí (vzájemnou soudržností molekul vody). Kořeny musí být k dostatečnému zásobování rostliny vodou dobře přizpůsobeny. Jejich architektura (tvarové a prostorové vlastnosti) závisí na genetické výbavě rostliny a na podmínkách prostředí. Genetické vlastnosti určují základní stavební typ kořenového systému - budou-li vytvářeny kořeny hlavní a vedlejší, nebo svazčité, budou-li se vytvářet oddenky, hlízy, výběžky atd. Geneticky mohou být zakódována i některá ekofyziologická přizpůsobení, např. schopnost tvorby tzv. dýchacích kořenů, což jsou pórovité kořeny vyrůstající nad povrch půdy a zásobující rostlinu vzdušným kyslíkem. Dědičná je i specifická metabolická přizpůsobení některých rostlin - selektivní příjem látek, vylučování látek apod.

Další tvarovou variabilitu kořenového systému ovlivňují podmínky prostředí. Obecně platí, že při dostatku vody je kořenový systém méně rozvinutý, než při jejím nedostatku.

V travinných (hlavně stepních) ekosystémech, které jsou přizpůsobeny hlavně zásobování vodou ze srážek, dochází při nedostatku vody k zahušťování kořenů i nadzemních částí, aby mohla být co největší část srážkové vody zachycena a hlavně udržena po celou následující dobu bez srážek.

Lesní druhy rostlin (hl. dřeviny), většinou přizpůsobené příjmu podzemní vody vytvářejí při její trvale nízké hladině hluboký kořenový systém, často jsou dlouhověké, pomalu rostoucí, protože nedostatek vody nedovoluje rychlý růst. Bylinné druhy mohou vytvářet mělký podpovrchový kořenový systém, který zachycuje vodu z případných srážek.

Přebytek vody (zamokření) vyžaduje jinou strategii. Některé mokřadní druhy vytvářejí sice hlubší kořeny, ty ale většinou slouží hlavně k uchycení v nepříliš kompaktní podmačené půdě (s výjimkou některých druhů schopných selektivního příjmu iontů nebo vylučování kyslíku - viz níže). Většinou je kořenový systém mokřadních druhů mělký, velmi rozvětvený a zaujímající velkou plochu jako např. u kopřivy, smrku apod. Některé dřeviny vytvářejí dýchací kořeny. Často se u mokřadních rostlin vytvářejí oddenky, hlízy a podobné orgány sloužící nejen k ukládání zásobních látek, ale i jako orgány vegetativního rozmnožování,

protože podmačené anaerobní prostředí je nepříznivé pro zachování semen a plodů a mladé klíčící rostlinky jsou náchylné na působení extrémních podmínek prostředí.

Je nutno říci, že obecné vlastnosti kořenového systému ve vztahu k vodě lze určit jen velmi přibližně a nepřesně, protože na konečnou stavbu kořenového systému má vliv velké množství různých faktorů prostředí (množství živin, kvalita půdy, konkurence ostatních rostlin a mnohé další), takže jednotlivé konkrétní případy se mohou od zobecnění velmi lišit. Proto jsme uváděli jen některé základní rysy vztahu kořenového systému a půdní vody. Výčet modifikací kořenového systému vlivem množství vody v půdě není úplný a je sestaven hlavně s důrazem na účel této příručky.

Kořeny mají určité mechanismy, které jim umožňují přijímat z prostředí přednostně ty látky, jichž má rostlina nedostatek, příp. jiné látky uvolňovat.

Základními mechanismy příjmu látek kořeny jsou difúze, osmóza, usnadněná difúze, aktivní transport (transport proti koncentračnímu spádu za spotřeby energie) a hydratace (bobtnání). Všechny tyto mechanismy využívají molekuly látek rozpuštěné ve vodě, takže úzce souvisí s pohybem vody v rostlině (viz předchozí kapitola).

Rostliny mohou dosáhnout potřebného složení prostředí uvnitř kořenů nejen přijímáním, ale i uvolňováním látek kořeny. Příkladem může být vylučování kyslíku kořeny některých mokřadních rostlin (např. rákosu obecného). Uvolňování látek kořeny může mít i jiné účely. V případě allelopatie (např. u akátu), jde o aktivní změnu prostředí tak, aby bylo nevhodné pro růst jiných rostlin (jiných druhů nebo jiných jedinců téhož druhu) a omezilo tudíž konkurenci. Produkce kořenových výlučků (exsudátů) může významně ovlivnit minerální výživu rostlin ovlivněním společenstev půdní mikroflóry.

Velkým problémem mokřadních rostlin je nedostatek kyslíku pro dýchání kořenů v půdě. Tento problém rostliny řeší vytvářením vzdušného pletiva - aerenchymu, které obsahuje velké množství mezibuněčných prostor zásobovaných vzduchem z prostředí nad hladinou vody, příp. nad povrchem půdy. Často prochází středem

stonků i listových řapíků souvislá dutina o velkém průsvitu. Některé rostliny mají schopnost vytvářet dýchací kořeny.

Složitějším problémem je vysoká koncentrace solí dvojmocného železa (Fe^{2+}) v redukčním (bezokyslíkatém) prostředí podmáčené půdy. Tyto soli jsou ve vodě rozpustnější než soli trojmocného železa (Fe^{3+}). Proniknou-li kořenem do cév rostliny, postupují vzhůru, až se dostanou do prostředí bohatšího kyslíkem. Ionty Fe^{2+} se okamžitě oxidují na Fe^{3+} , jejichž soli jsou ve vodě méně rozpustné, dochází k jejich vysrážení a k ucpání cév. Rostliny se brání přijímání přebytku iontů Fe^{2+} buď selektivní propustností (resp. nepropustností) obalových struktur kořene a buněčných stěn a membrán jeho buněk pro ionty Fe^{2+} nebo vylučováním kyslíku kořeny. Tím se vytváří v okolí kořenů kyslíkaté prostředí a přebytečné ionty Fe^{3+} se vysráží vně kořenů, mimo cévy.

Kořeny mají pro rostliny mnoho dalších významů (ukotvení rostliny v substrátu, zásobní orgány, orgány vegetativního rozmnožování, místo interakce se symbionty, parazity i konkurenty atd.). Vzhledem k účelu této publikace byly probrány jenom ty funkce, které blíže souvisí s problematikou biologie půdy.

3.2. Fungování půdního ekosystému

Všechny složky půdního ekosystému jsou navzájem v neustálém kontaktu, vzájemně se různým způsobem ovlivňují. Nejdůležitější v půdě probíhající procesy lze shrnout do zjednodušeného schématu (viz obr.1). I když se půdní procesy vzájemně prolínají a vzájemně na sobě závisí, přesto je lze rámcově rozdělit na procesy nezávislé přímo na živých organismech (procesy fyzikální a chemické) a procesy biologické, zprostředkované nebo způsobené přítomností živých organismů.

3.2.1. Fyzikální a chemické procesy

Fyzikální a chemické procesy v půdě souvisí zejména s ionty minerálních látek, tvořících vstup do koloběhu živin (látek) v půdním ekosystému. Nejdůležitější z těchto procesů jsou zvětrávání horninotvorného substrátu, transport iontů, vyplavování minerálních látek a jejich adsorbce resp. uvolňování ze sorpčních složek půdy.

V procesech zvětrávání hraje klíčovou roli půdní voda. Rozpouští se v ní oxid uhličitý, za vzniku poměrně velmi agresivní kyseliny uhličité, dále se do ní uvolňují různé anorganické i organické kyseliny a další sloučeniny vznikající v půdě. Výsledkem je obrovská rozpouštěcí schopnost půdního roztoku, ústící do rozrušování pevné horniny. Nemalou roli může hrát mrazové zvětrávání, kdy změna objemu vody při zamrzání a rozmrazání velmi účinně rozrušuje i velmi pevný materiál. Přítomnost vody pochopitelně mění chemické podmínky prostředí (redukční prostředí apod.). Pochopitelně, na procesech zvětrávání se podílí také živé organismy produkcí nejrozumnějších metabolitů, prorůstáním atd. Zvětrávání je ovlivněno množstvím srážek, teplotou, chemickými vlastnostmi substrátu a činností půdních organismů.

Transport rozpuštěných látek v půdě je rovněž závislý především na půdní vodě, která tvoří pohyblivou půdní fázi. Pohyb vody a transport živin může probíhat jak ve směru gravitace, tak i proti němu (kapilární voda). Kapilární pohyb může převládnout např. v období sucha a vysokých teplot u těžkých půd s převahou kapilárních pórů, kdy je vysoké vypařování z povrchu půdy. Za těchto podmínek se mohou rozpuštěné minerální látky dostat až na povrch a tam vykrystalizovat ve formě solného povlaku (zasolování půd). Významným procesem souvisejícím s transportem živin půdním roztokem je eluvie a iluvie půdních horizontů, t.j. vyplavování živin z jednoho horizontu (resp. subhorizontu) a jejich ukládání do druhého. V případě, že je v půdě nadbytek gravitační vody a živiny se žádným způsobem nezachytí nebo nezdrží v půdním profilu, dochází k tzv. vyplavování živin, procesu který je z hlediska daného půdního ekosystému ztrátou.

Navíc může dojít ke kontaminaci podzemní vody (eutrofizace, kontaminace reziduy různých látek apod.).

Snad nejdůležitějším fyzikálně-chemickým procesem v půdě, ovlivňujícím celý koloběh látek a podmiňujícím některé zásadní půdní vlastnosti, je půdní sorpce na tzv. sorpční komplex půdy, t.j. schopnost nejrozličnějších částí půdy vázat a zase uvolňovat ionty živin a tím je na jednu stranu chránit před vyplavováním a na druhou stranu poskytovat pro využití např. kořenům rostlin. Půdní sorpční komplex je tvořen celou řadou půdních součástí (včetně organismů), nejvýznamnější jsou půdní koloidy, povrch prachových částic, vnitřní povrch kapilár, půdní oxidy a zeolity. Chemické procesy probíhající na povrchu těchto struktur jsou poměrně velmi složité, jen velmi zjednodušeně lze říci, že se jedná o adsorpci, výměnné procesy, rozpouštění a srážení. Ionty, adsorbované na povrchu organominerálních částic půdy mohou být kořeny rostlin postupně přímo odebírány mechanismem tzv. výměnné adsorpcí (kation za jiný kation, resp. ion za jiný ion).

V této souvislosti je nutno připomenout význam půdní struktury pro fungování půdního ekosystému, kdy zejména tvorba půdních agregátů výrazně zvyšuje aktivní povrch půdních částic a umožňuje adsorpci většího množství minerálních látek, čím se minimalizují ztráty a zvyšuje výživná schopnost (úrodnost) půdy.

3.2.2. Biologické procesy

Půdní biologické procesy mají zásadní význam pro koloběh látek ve všech ekosystémech. Jejich konečným důsledkem je totiž opětovné uvolňování živin z vázané formy do formy rostlinám volně přístupných iontů minerálních látek a současně regulace tohoto procesu tak, aby docházelo k co nejefektivnějšímu fungování celého systému. Nejdůležitějším a nejtypičtějším půdním procesem, závislým na živých organismech, jsou proměny látek v rozkladných (dekompozičních, detritových) potravních řetězcích, nebo přesněji řečeno potravních sítích (vzhledem k vzájemné propojenosti

potravních řetězců). Ostatní typy potravních vztahů jsou v půdě rovněž přítomny a mohou mít význam v nepřímém ovlivňování rozkladu mrtvé organické hmoty v půdě. Některé konkrétní interakce živých organismů v půdě budou probrány v dalších odstavcích.

3.2.2.1. Dekompoziční řetězce

Fungování pastevně-kořistnických potravních řetězců, typických pro většinu ekosystémů v nadzemní části biosféry má za následek postupnou proměnu asimilovaného oxidu uhličitého a minerálních živin na složité organické molekuly, počínaje primárními producenty přes býložravce až po predátory všech úrovní. Vzniklé organické látky jsou různě dlouho součástí živých těl organismů, dříve nebo později však tyto organismy odumírají a organické látky se hromadí ve formě mrtvé organické hmoty (dále MOH) buď na dně vodních ekosystémů nebo na povrchu půdy a v půdě. Teoreticky by neexistence zpracování této hmoty vedla ke zcela slepé uličce, kdy by postupně veškerá dostupná asimilovatelná hmota byla přeměněna na MOH, jakýsi "odpad" ekosystémů. MOH však obsahuje příliš mnoho využitelné energie a proto se vyplatí celé řadě organismů tento "odpad" recyklovat a využít jako energetický zdroj. Potravní vztahy, vycházející z MOH a související s její postupnou přeměnou až na původní formu minerálních iontů jsou zahrnuty do dekompozičních neboli také detritových potravních řetězců a sítí. Při určitém zjednodušení lze v rámci těchto řetězců rozlišit následující základní biologické procesy: rozdrobování organické hmoty (destrukci) a rozklad složitých organických látek na jednodušší a jejich proměny (dekompozicí a transformací). Pokud konečným produktem rozkladu jsou ionty anorganických látek, nebo jednoduché anorganické sloučeniny, hovoříme o mineralizaci. Paralelně probíhajícím procesem je humifikace (tvorba humusu).

MOH jako výchozí produkt je tvořena mrtvými těly nebo částmi těl producentů a nejrozličnějších konzumentů (včetně mrtvých rozkladačů, detritožravců apod.). Vzhledem k celkově nejvyšší

biomase primárních producentů jsou dominantní složkou MOH právě jejich mrtvé tkáně, t.j. jednak odumřelé kořeny a jednak nadzemní části, tvořící ve většině suchozemských ekosystémů na povrchu půdy tzv. organický opad (např. listnatý opad, jehličnatý opad lesních ekosystémů, tzv. stařina travních ekosystémů apod.). MOH opadu má ještě velmi dobře rozpoznatelnou strukturu, jsou rozlišitelné nejen jednotlivé typy tkání, ale i morfologické charakteristiky (tvar listu, stonku apod.). Postupný rozklad opadu je obvykle zahájen jeho promáčením a rozdrobením na menší části. Rozdrobování může být mechanické, ale ve většině případů je důsledkem aktivního působení nejružnějších detritožravých zástupců půdní fauny. Jednodušší, ve vodě dobře rozpustné organické látky, obvykle energeticky bohaté, jsou z tkání vylouhovány vodou resp. půdním roztokem a takřka okamžitě využity půdní mikroflórou jako zdroj energie. Zbylá část MOH je využívána pomaleji. Mikroflóra nasedá na povrch úlomků opadu a s využitím své enzymatické výbavy aktivně rozkládá MOH, aby získala organické látky či molekuly, nezbytné pro vlastní životní pochody. Část organické hmoty je hned zabudována do těl mikroflóry (případně jiných půdních organismů), část je použita jako zdroj energie a postupně "prodýchána", většinou až do formy minerálních látek (uvolňování CO_2 při aerobním metabolismu). Zbytek, tvořený různě transformovanými kousky organické hmoty a jednoduššími organickými molekulami je uvolněn do prostředí a může být využit buď jako substrát pro jiný druh mikroflóry, nebo je transformován do některé formy humusu.

Procesy rozdrobování organického opadu a ostatní MOH na menší fragmenty nazýváme destrukcí organické hmoty. Její význam je zřejmý - rozdrobení má za následek výrazné zvětšení povrchu MOH, čím se zvyšuje její přístupnost pro půdní mikroflóru a tím i rychlost rozkladu MOH. Destrukce může být mechanická, např. při prorůstání mrtvých pletiv rostlin vlákniny hub se tato pletiva stávají mnohem křehčími a k jejich rozdrobování pak často stačí pohyb způsobený větrem nebo prohrabáváním substrátu jinými organismy. Aktivní destrukce MOH je důsledkem různého okusování a odrolování MOH detritofágními druhy, případně je rozměňována v jejich trávicím traktu. Organismy, podílející se na destrukci

MOH nazýváme destruenti (tento pojem je někdy použit v širším slova smyslu pro veškeré rozkladače). Jako příklad funkce destruentů můžeme uvést činnost půdní mesofauny (roztoků pancířníků a chvostoskoků), která rozdrobováním MOH při detritofágní výživě může zvyšovat její povrch až 10000 násobně.

Dekompozice organické hmoty zahrnuje proměny složitějších organických látek na jednodušší, které se uvolňují do půdního prostředí. Tyto látky jsou vždy fragmenty složitějších makromolekul, které daný organismus (dekompozitor) nepotřebuje nebo nedokáže využít. Mohou však být využitelné pro jiné druhy organismů, a tak může vzniknout při rozkladu celá kaskáda druhů, vzájemně závislých na sobě resp. na organických látkách uvolňovaných v procesech dekompozice. Nejvýkonnějšími dekompozitory jsou zástupci půdní mikroflóry, značný význam v tomto směru mají zejména půdní houby.

Organické látky, uvolňované při dekompozici do prostředí mohou být dvojího druhu. První skupinu tvoří látky, které se lépe rozkládají a poskytují buď důležité stavební prvky těla nebo slouží jako zdroj energie. Jsou rozloženy až na jednotlivé anorganické ionty a oxid uhlíčitý v procesu, zvaném mineralizace. Nejznámějšími mineralizátory jsou půdní bakterie, i když tato schopnost nechybí ani ostatním zástupcům mikroflóry, např. houbám a aktinomycetům. V tomto místě se tedy koloběh hmoty v ekosystémech uzavírá a minerální látky, původně vázané do tkání živých organismů jsou opět k dispozici pro další asimilaci producenty. Část organických látek vznikajících v průběhu rozkladu je však buď velmi těžko rozložitelná, nebo je činností mikroorganismů pozměněna do stabilnější formy, případně v prostředí půdního roztoku sama reaguje s jinými látkami za vzniku stabilnějších sloučenin, které mohou být následně vázány do organominerálních komplexů v půdě. Za určitých okolností mohou být dokonce tyto látky i nově syntetizovány. Společným znakem takto vzniklé organické hmoty - humusu (humusových látek) - je pomalý nebo velmi pomalý rozklad, obvykle vyžadující zcela specifickou enzymovou výbavu. Organická hmota je tak v půdě dlouhodobě vázána a tím jednak chráněna před ztrátou ze systému a jednak sloužící jako dlouhodobá zásoba. Procesy, vedoucí

k syntéze a transformacím humusu jsou součástí humifikace.

3.2.2.2. Predační a parazitické řetězce

Dekompoziční řetězce umožňují rozvoj velkého množství půdních organismů, jejichž těla obsahují mnoho energeticky bohatých látek. Jsou tedy výborným a velice bohatým zdrojem potravy. Navíc půdní prostředí se svými vlastnostmi (menší kolísání teplot a vlhkosti, dostatek úkrytů apod.) je přímo ideálním prostředím pro život menších organismů. Není proto nic překvapivého na tom, že v půdě žije neuvěřitelné množství druhů, forem i jedinců půdních konzumentů. Struktura a fungování potravních vztahů těchto organismů, počínaje konzumenty prvního řádu, připomíná v mnohém nadzemní terestrické řetězce, začínající u primárních producentů, t.j. zelených rostlin. Zásadní rozdíl je v tom, že zdrojem energie pro konzumenty nejsou většinou primární producenti, ale obvykle "trávník" houbových a bakteriálních nárostů. Přesto však v půdě lze najít i primární producenty - ve vrchních vrstvách půdy, kam se dostane sluneční světlo, žijí půdní druhy řas, sinic a rozsivek. Rovněž vyšší rostliny vstupují do klasických pastevně - kořistnických (predačních) řetězců v půdě svými kořeny.

Konzumenti prvního řádu mohou být potravně specializováni (houbožravé neboli mykofágní druhy, bakteriemi se živící bakteriofágové, druhy pollinivorní - požírající pyl, algofágní - požírající řasy), většinou ale přijímají různou potravu. Nejčastěji jsou současně začleněni i do dekompozičních řetězců jako detritofágové, protože je mnohdy problematické oddělit od sebe porosty mikroflóry a detrit, na kterém vyrůstají. Velmi mnoho druhů je ve výběru potravy oportunistických, t.j. v případě možnosti volby si vybírají určitý druh potravy. v podstatě všech nedostatků konzumují tu potravu, která je k dispozici. Nejvýznamnější konzumenti prvního řádu v půdě jsou především chvostoskoci, dále některé skupiny roztočů (pancířníci - Oribatida, dále Acaridida, Uropodina atd.), hmyzí larvy (larvy dvoukřídých, ponravy a jiné larvy brouků atd.), různé

specializované hlístice (Nematoda), celá řada prvoků. U některých z těchto skupin najdeme taky významné parazitické druhy (hlístice - háďátka).

Vyšší řády konzumentů - tedy predátoři různých úrovní - jsou rovněž druhově početní. Jejich abundance je však v souladu s ekologickými pravidly (viz potravní pyramidy) nižší. Zajímavé je, že ani predátoři nemusí být specializováni pouze na dravý způsob života, mnozí z nich mohou být současně bakteriofágní nebo mykofágní. Důvodem může zřejmě být stejně jako v případě konzumentů prvního řádu problém, jak v masě mrtvé organické hmoty rozlišit detrit, mikroflóru a živočichy. K nejvýznamnějším predátorům patří měňavky (predátoři ostatních prvoků), ploštěnky, některé druhy hlístic (požírají jiné hlístice, nedospělá stádia půdních členovců apod.), specializované skupiny roztočů, zejména čmelíkovci (Gamasida) a velká část sametkovců (Actinedida) (predátoři chvostoskoků, hlístic, drobných hmyzích larev, nedospělých stádií roztočů atd.) a řada větších predátorů, žijících spíše na povrchu půdy (pavouci, sekáči, stonožky, brouci atd.). I tady se vyskytují některé druhy přizpůsobené parazitickému způsobu života (čmelíkovci - Gamasida, známí ektoparaziti drobných půdních savců).

Význam predáčních a parazitických potravních řetězců v půdě nespočívá pouze ve využití dostupné energie, ale má vztah i k fungování dekompozičních řetězců. Dá se říci, že tyto potravní řetězce fungují jako jeden z mimořádně účinných regulátorů dekompozičních řetězců: konzumenti prvního řádu, konzumující současně mikroflóru i její substrát regulují jak množství mikroflóry v půdě, tak její aktivitu (viz destrukční činnost - zvětšování povrchu!), navíc mohou selektivně snižovat početnost určité skupiny mikroflóry na úkor jiné. Predátoři zase regulují početnost těchto konzumentů, takže výsledkem je ustálení početnosti mikroflóry, konzumentů i predátorů na úrovni, která zabezpečuje rovnoměrný rozklad dodávané organické hmoty bez toho, aby se dramaticky měnila početnost jednotlivých skupin (např. aby nedošlo k takovému přemnožení mikroflóry, které by znamenalo rychlý pokles množství potravních zdrojů, tedy MOH, což by v důsledcích znamenalo ohrožení celého společenstva půdních

organismů).

Navíc se živočichové všech trofických úrovní v těchto potravních sítích podílejí na tvorbě půdního humusu, a to ve formě velmi strukturního trusu, složeného ze zbytků nestrávených těl mikroflóry nebo různě natrávenými nebo pozměněnými částicemi mrtvé organické hmoty a z živé mikroflory. Pokud jsou půdní konzumenti a predátoři v půdě hojně zastoupeni (např. v některých typech listnatých lesů nebo v primárních půdách vznikajících na skalním podloží), mohou vytvářet zřetelnou vrstvu tzv. koprogenního humusu. Samotný trus je navíc ohniskem mikrobiální aktivity v půdě, vzhledem k vysokému obsahu mikroorganismů.

3.2.3. Interakce mezi živou a neživou složkou půdy

Jak už bylo řečeno, všechny složky půdního prostředí jsou v neustálém kontaktu a vzájemné interakci. Půdní interakce mohou být nejrozličnějšího druhu, jejich souhrn je základem funkcí půdního ekosystému. Podle toho, které součásti půdního ekosystému vzájemně interagují, lze interakce rozdělit na interakce živý organismus - živý organismus a interakce živý organismus - neživé složky půdy. Tyto interakce byly částečně už uvedeny v souvislosti s fungováním půdního ekosystému, přesto je dobré je ještě souhrnně probrat.

Interakce mezi živou a neživou složkou půdy (pokud nebereme do úvahy přímé přeměny molekul, např. v procesech dekompozice) se projevuje především v procesech zvětrávání, imobilizace a tvorby půdní struktury.

Procesy zvětrávání jsou primárně ovlivňovány chemickým složením substrátu, půdního roztoku a klimatickým režimem. Pro zvětrávání je velmi důležitý obsah agresivních látek v půdním roztoku, mezi nejdůležitější se vzhledem k vysoké koncentraci v půdním prostředí řadí CO_2 , rozpuštěný ve formě kyseliny uhličitě a dále některé organické kyseliny. Tyto látky však v půdě ve značné míře vznikají činností organismů (CO_2 jako

produkt dýchání, organické kyseliny jsou buď produkty rozkladu organické hmoty nebo jsou přímo produkovány živými organismy, např. kořený rostlin). Význam organismů pro zvětrávání umocňuje ještě produkce extracelulárních enzymů, které ovlivňují půdní reakce a mohou spolu s ostatními metabolity i samotnými anorganickými ionty také ovlivňovat, zda prostředí v zóně zvětrávání má oxidační nebo redukční charakter.

Imobilizace anorganických iontů je proces, který byl dlouhou dobu pedology opomíjen. Jedná se o absorpci volných iontů z půdního roztoku nebo iontů vázaných na organominerálních komplexech a dalších sorpčních složkách půdy živými organismy (mikroflórou) a jejich spotřeba v metabolismu nebo zabudování do tkání. Mikrobiální imobilizace může být vážným konkurentem pro zásobení kořenů vyšších rostlin životně důležitými kationty, na druhou stranu je to však jeden z procesů, který zabraňuje ztrátám iontů vymýváním z půdního profilu. Imobilizace tedy ovlivňuje složení půdního roztoku i množství dostupných kationtů v půdním prostředí.

Význam živých půdních organismů pro půdní strukturu byl již zmíněn v kapitole o neživých částech půdy a tvorbě agregátů. Činnost organismů (produkce slizů, tvorba různých forem trusu, rozklad mrtvých tkání), stejně tak jako jejich samotná přítomnost v půdě (vlákna hub, kolonie mikrobů) přímo ovlivňuje strukturu půdy, tento vztah je však reciproční - dobrá půdní struktura je podmínkou pro život rozmanitých forem půdních organismů. Podobná reciprocita ovšem platí pro všechny půdní procesy, ve kterých jsou začleněny půdní organismy. Vyplývá to z faktu, že činnost organismů je účelově řízená jejich potřebami, a tak aktivní ovlivňování jejich okolí samozřejmě souvisí s těmito potřebami a přežíváním v prostředí.

3.2.4. Interakce mezi živými organismy v půdě

Vzájemné interakce živých organismů svou složitostí odpovídají

složitosti struktury živých populací v půdě. Většina interakcí souvisí se zabezpečením výživy, tedy s trofickými vazbami jednotlivých organismů, někdy však produkty metabolismu nebo činnost organismů pomáhají organismům i v prostorové kompetici nebo jako obrana proti predátorům apod. Vzhledem k zásadnímu významu půdy pro existenci primárních producentů lze půdní interakce posuzovat z hlediska vyšších rostlin, resp. jejich rhizosféry a z hlediska dekompozice MOH, t.j. vazeb mezi jednotlivými skupinami organismů zapojených do rozkladných procesů.

3.2.4.1. Interakce rhizosféry

Jako rhizosféra se definuje ta část půdního prostoru, která bezprostředně souvisí s povrchem živých nebo odumírajících kořenů vyšších rostlin. Obrovský význam rhizosféry dokumentuje fakt, že v rhizosférní části půdy (podle odhadů tvoří kolem 3 % celkového objemu půdy) žije často více než polovina biomasy živých půdních mikroorganismů. Interakce půdních organismů a kořenů lze rozčlenit podle jejich důsledků na asociativní (sdružovací), škodlivé a prospěšné kořenům.

Asociativní interakce souvisí s funkcí kořenů. Při absorpci minerálních živin z půdy mohou vznikat nejrůznější problémy, které rostlina řeší několika způsoby. Jedním ze způsobů je produkce kořenových výlučků, tzv. exsudátů, které obsahují velké množství energeticky bohatých látek (cukrů apod.). Jsou tedy výborným zdrojem energie a výrazně přitahují půdní mikroflóru, která je může využívat jako zdroj. Výsledkem je nahromadění populací různých druhů mikroflóry v rhizosféře. Činnost mikroorganismů může být pro rostlinu výhodná, protože mnohdy vylučují látky, které rostlina potřebuje (např. rostlinné hormony). Navíc mikrobiální populace pomáhají při získávání některých látek, zejména sloučenin dusíku z půdního prostředí. Nahromadění půdní mikroflory v rhizosféře má pochopitelně za následek i vzrůst počtů půdních konzumentů a predátorů, takže vyšší intenzita rozkladu organické hmoty se soustřeďuje

právě do blízkosti rostlinných kořenů.

Interakce škodlivé z hlediska vyšších rostlin jsou interakce kořenů a mikrobiálních populací, působících jako kořenové patogeny. Mnoho druhů hub a bakterií produkuje látky toxické pro rostliny nebo přímo parazituje, buď na odumírajících, nebo živých kořenech. Výsledkem je zhoršení kondice kořenů a tím i celé rostliny. Význam kořenových patogenů se zkoumá zejména v souvislosti se zemědělstvím, kde některé rostlinné nemoci tohoto druhu mohou velmi významně ovlivňovat výnosy. Pro eliminaci patogenů má velký význam dobré fungování půdních procesů. Ve zdravé půdě jsou totiž patogenní druhy mikroflóry vytlačovány z rhizosféry kompeticí jiných skupin půdní mikroflóry a požíráním konzumenty, v případě jejich absence nebo výrazného snížení stavu např. po aplikaci některých chemických látek nebo při použití některých agrotechnických praktik se musí jejich početnost regulovat zásahem zvenčí.

Pozitivní neboli pro kořeny prospěšné interakce jsou založeny na vzájemně výhodném spojení rostlinných kořenů a populací půdních mikroorganismů, tedy na mutualistických (symbiotických) vztazích. Jsou známy dva hlavní typy těchto interakcí - soužití kořenů a hlízkových bakterií a různé druhy mykorrhizy (soužití kořenů a houbových vláken). Hlízkové bakterie (rod *Rhizobium*) ve velmi složitém procesu pronikají do kořenů rostlin, kde získávají rostlinné metabolity a v rostlinou vytvořených pouzdrech (hlízkách) fixují vzdušný dusík.

Mykorrhiza pomáhá rostlinám získávat jiné ionty, zejména je její význam prokázán u zabezpečení fosforu. Původně byla mykorrhiza považována za určitý typ parazitismu, ukázalo se však, že rostliny s mykorrhizou rostou a prospívají lépe, než rostliny neinfikované. Navíc se čím dál tím víc ukazuje velký význam mykorrhizy pro celkové koloběhy minerálních látek. Principem mykorrhizy je obrůstání kořínků hyfami (ektomykorrhiza) nebo vrůstání hyf dovnitř kořenových pletív (endomykorrhiza), čím se výrazně zvětšuje resorpční plocha kořenů. Houbová vlákna díky své stavbě mohou velmi efektivně transportovat minerální živiny (zejména fosfáty) do rostliny, navíc mají houby jinou enzymovou výbavu a tak dokážou z půdního prostředí získávat i ty minerální

látky, které jsou jinak pro rostliny nedostupné. Rostlina zase poskytuje houbám své metabolity jako zdroj energie (u ektomykorhiz až do 40% své produkce, u endomykorhizy kolem 10%). Mykorhiz je známo několik různých druhů. Ektomykorhizy jsou typické pro dřeviny a většinou stopkovýtusné houby, z endomykorhiz jsou nejrozšířenější tzv. měchýřkovité a keříčkovité mykorhizy (vesikulární - arbuskulární, tzv. VAM mykorhizy), typické pro většinu bylin.

3.2.4.2. Interakce půdní fauny a mikroflóry

Nejvýznamnější interakce půdní fauny a mikroflóry souvisí s dekompozičními procesy v půdě (viz kap. 3.2.2.). Závisí na vzájemné regulaci početnosti a kvalitativního složení populací. Kromě těchto interakcí však existují některé další, speciální případy interakcí.

Interakce mezi půdní faunou a mikrobiálními půdními patogeny umožňuje regulaci početnosti těchto patogenů v rhizosféře. Mechanizmem je neselektivní nebo selektivní požíráání patogenních druhů mikroflóry nebo mikrofauny. Nejvýznamnější druhy živočichů, požírajících patogenní druhy mikroflóry jsou mezi měňavkami, hlísticemi a konzumenty z řad roztočů a chvostoskoků, kteří zejména regulují růst patogenních druhů hub. Jiné druhy naopak mohou ulehčovat vnikání patogenních druhů do tkání kořenů, příkladem mohou být parazitické druhy hlístic. Pohyblivější formy, jako např. roztoči, chvostoskoci nebo žížaly, mohou přenášet patogenní druhy z místa na místo a tím umožňovat jejich šíření.

Podobným způsobem může půdní fauna ovlivňovat i mykorhizní houby. Zejména hlístice mohou výrazně redukovat celkový povrch houbových vláken a tím negativně ovlivnit účinnost mykorhizy. Podobně půdní mesofauna využívá mykorhizní houby jako zdroj potravy, ale velmi často taky přispívá k jejich šíření, protože spóry a části vláken ulpívají na povrchu jejich těla.

Velký význam pro schopnost živočichů využívat energii vázanou v MOH mají symbiotické interakce půdní mesofauny (některé druhy

roztočů, chvostoskoků) a makrofauny (zejména žížaly, v tropech termitů) a mikroorganismů, schopných rozkládat těžko rozložitelné organické látky jako lignin a celulózu. Těmito organismy jsou obvykle půdní bakterie a některé druhy prvoků, žijící v různých částech střeva svých hostitelů. Zvláštním případem jsou tzv. externí symbiózy u některých termitů, kteří předpřipraví rostlinnou mrtvou tkáň, na kterou "naočkují" celulólytické nebo ligninolýtické houby. Takovéto "houbové zahrádky" jsou potom bohatým zdrojem velmi výživné potravy.

3.2.5. Regulace procesů v půdě, koloběh živin

Hlavním smyslem půdních procesů je zabezpečení výživy pro primární producenty. V přirozených ekosystémech je minerální výživa rostlin zabezpečována v podstatě jen dvojím možným způsobem: zvětráváním horninového podloží a recyklací MOH. V člověkem ovlivněných ekosystémech přibývá aplikace hnojiv a depozice látek z ovzduší, případně znečištěné vody. Jak je z předchozího textu jasné, recyklace živin je pro udržení produktivity systému zcela zásadním procesem. Proto jsou koloběhy minerálních živin velmi podrobně sledovány. Vzhledem k významu a obsahu v organické hmotě jsou pochopitelně nejdůležitějšími cykly živin koloběhy uhlíku, dusíku a fosforu. Všechny živinové cykly jsou regulovány činností edafonu, vyplývá to z jeho úlohy při rozkladu mrtvé organické hmoty. Mezi primární regulátory dekompozice považujeme půdní mikroflóru, tedy bakterie a houby, které vyprodukují podstatnou část oxidu uhličitého vznikajícího v půdě, t.j. rozloží největší část organických látek. Jak se prokázalo mnoha experimenty, rychlost rozkladu však závisí silně na poměru uhlíku a dusíku v MOH. Nedostatek uhlíku má za následek zpomalení rozkladu. Půdní fauna se na samotné dekompozici a recyklaci uhlíku podílí podstatně menší měrou, to však neplatí pro dusík. Prokázalo se, že přispívá 10 až 50% k celkové mineralizaci dusíku. Z toho je rovněž jasný její nepřímý vliv na

primární rozkladače, tedy půdní mikroflóru. Podle přepočtů půdní konzumenti zkonzumují až 60% mikrobiální populace v půdě. Tím pochopitelně ovlivňují rychlost rozkladu (sekundární regulátoři), a to dvojím způsobem. Jednak udržují populace mikrobů v exponenciální fázi růstu, což rozklad urychluje, jednak neustálým požíráním regulují velikost populací, což brání nadměrně rychlé mineralizaci. Když k tomu připočteme zvětšování povrchu MOH, role půdních živočichů dostává mnohem větší rozměr, než by se dalo usuzovat ze zanedbatelného podílu na produkci CO₂ (pouze kolem 1 - 5%), který je produktem mineralizace organické hmoty.

Kromě regulací zprostředkovaných organismy v rámci dekompozičních a ostatních potravních řetězců v půdě je recyklace živin pochopitelně ovlivněna abiotickými faktory, zejména teplotou, vlhkostí, pH, obsahem solí a některými dalšími. Nepřímo závisí i na intenzitě fotosyntézy, která ovlivňuje rychlost odběru minerálních iontů z půdy a samozřejmě na složení půdy, zejména její schopnosti vázat ionty na sorpční složky.

Když sumarizujeme všechny v půdě probíhající procesy a jejich ekologický význam, lze v procesu recyklace živin rozlišit dvě klíčová místa, na která se soustřeďují regulační procesy: za prvé rozklad mrtvé organické hmoty, t.j. rychlost destrukce, dekompozice a mineralizace, kde se více projevují regulace biologické a na druhé straně absorpce či jiné procesy spojené s využitím minerálních živin ve formě iontů, t.j. zvětrávání horniny, rozpouštění iontů do půdního roztoku, imobilizace, vyplavování a vazba na sorpční složky půdy, kde se velmi významně kromě biologických regulací projevují i regulace chemické, biochemické a fyzikální.

Cykly hlavních minerálních živin jsou součástí většiny učebnic ekologie, proto tady nebudou probírány. Pro ilustraci jsou přiloženy obrázky cyklů uhlíku a dusíku, ve kterých hrají půdní organismy dominantní úlohu. Zvláště názorným příkladem je řada funkčních skupin bakterií, zapojených do cyklu dusíku v ekosystémech.

3.2.6. Některé vlivy člověka

Jak již bylo v úvodu celého textu řečeno, člověk se svou činností se stal jedním z důležitých půdotvorných činitelů. Bohužel, činnost člověka, zaměřená často pouze na krátkodobé zvýšení výnosnosti půd, má různé negativní důsledky, z nichž některé se staly v posledních desítkách let světovým ekologickým problémem. Řešení je mnohdy závislé na znalosti a pochopení fungování půdního ekosystému. Jak je již zřejmé, půdní procesy jsou natolik složité, že jejich narušení nelze nějakým jednoduchým a laciným způsobem napravit. Proto bývá často jediným spolehlivým řešením snaha o návrat k přirozené funkci půdních systémů, což je dlouhodobý a nákladný proces.

Protože problematika je velmi složitá, můžeme si některé vlivy člověka demonstrovat jenom ve zjednodušené formě. Nejznámějšími problémy přímo souvisejícími s půdou jsou eroze, okyselování a celková degradace půd.

Půdní eroze může být dvojího druhu - vodní a větrná. Vždy se jedná o ztrátu zejména drobných částic půdy, obvykle bohatých na organickou hmotu a živiny. Je způsobena celkovým narušením ekosystémů, zejména destrukcí vegetace s protierozním účinkem. V rámci procesů probíhajících v půdě přispívá k zvýšení nebezpečí eroze zhoršování půdní struktury, jako důsledek celkové degradace půdy.

Okyselování půdy je problémem, který silně souvisí se spalováním fosilních paliv člověkem a tím s uvolňováním některých látek, zejména oxidů síry a dusíku do ovzduší. Srážkovou vodou vytvořené kyseliny dopadají na povrch půdy a při určité koncentraci a neustálém opakování postupně překonají schopnost půdy pufrovat půdní reakci a dochází k poklesu pH. To má za následek změny v chemických a fyzikálních vlastnostech půdy a v konečném důsledku vede rovněž k vyplavování živin a degradaci půdy.

Mechanismus degradace půdy lze (velmi zjednodušeně) vysvětlit na příkladě zemědělských půd pomocí stejného schématu, jaké sme použili pro vysvětlení půdních procesů (obr. 1). Správně

fungování půdního ekosystému závisí na správné regulaci procesů v půdě. Ionty minerálních živin, uvolňované mineralizací v dekompozičních řetězcích, mohou mít nejrůznější osud. Jsou přijímány kořeny rostlin, což je nezbytnou podmínkou fungování rostlin jako primárních producentů. Ta část iontů, která není bezprostředně rostlinou absorbována, může být uložena ve formě určitých "zásob" - buď je imobilizována v tělech půdních mikroorganismů, nebo zůstává vázána v půdním humusu, nebo se váže na sorpční složky půdy (vazba do půdních koloidů apod.). Pokud tyto procesy nefungují, nebo probíhají pomalu, ionty se ztrácí ze systému vyplavováním, obvykle do spodních vod. Zdržení iontů v půdě je tedy přímo závislé na přítomnosti a množství půdních mikroorganismů a na schopnosti půdní sorpce, která je přímo závislá na půdní struktuře. Vzhledem k tomu, že i půdní struktura silně závisí na činnosti půdních organismů, celý systém závisí na dodávkách mrtvé organické hmoty do půdy. Pokud je většina mrtvé organické hmoty ze systému odstraněna (jak tomu obvykle je na polích), brzdí se rozvoj půdní mikroflóry a následně i půdní fauny. Ta je navíc decimována zhutněním půdy při pojíždění zemědělských mechanismů a neustálým zasahováním do půdního prostředí (orba, použití pesticidů atd.). Výsledkem je zhoršování půdní struktury. V důsledku těchto procesů dochází k výraznému snížení schopnosti půdy udržet ionty živin, zvyšuje se jejich vyplavování. Jednorázovým přidáním průmyslových hnojiv se sice zvýší mikrobiální aktivita, jejím důsledkem je však i rozklad organické hmoty vázané ve formě dlouhodobých humusových zásob. Důsledkem je další rozpad struktury půdy, kde hrají složité molekuly humusu velmi velkou roli a protože nepřítomnost detritu neumožní řádný rozvoj detritofágů a tudíž ani zlepšení struktury půdy, velmi často dochází k ještě výraznějšímu vyplavování živin (zejména dusíku a fosforu, které jsou normálně poutány v tělech mikroflóry a půdní fauny nebo v koloidech) z půdy, s následnou eutrofizací vody. Dlouhodobým důsledkem tohoto způsobu hospodaření je tedy ztráta půdní struktury, snížení zásob organické hmoty a deficit hlavních živin v půdě, souborně degradace půdy. Jak se ukazuje, jediná možnost jak tento proces zvrátit nebo alespoň zastavit je obnovení přirozených funkcí

půdních ekosystémů, t.j. vlastně obnovení pravidelné dodávky mrtvé organické hmoty v dostatečném množství do půdy a zmírnění negativních důsledků obhospodařování na půdní faunu. Existuje několik alternativ tohoto postupu, nejčastější je opětovné zavedení systémů s úhorem (umožní alespoň částečný rozvoj společenstev půdní fauny), anebo tzv. biologické hospodaření, kde se používají systémy hospodaření bez hluboké orby, případně se střídají bezorebné a klasické postupy při obdělávání půdy.

4. NĚKTERÉ METODY STUDIA PŮDNÍCH EKOSYSTÉMŮ

Studium půdních ekosystémů je velmi složité a vyžaduje účast odborníků v nejrůznějších oborech. Ani velké pracovní týmy přitom obvykle nemohou měřit všechny parametry půdního prostředí. Některá stanovení, např. enzymatická aktivita půdy, stanovení biomasy půdních organismů, stanovení přítomnosti některých látek nebo prvků atd. jsou navíc velice časově náročná a vyžadují dobré vybavení laboratoře. Přesto existují některé půdní parametry, které je možno měřit i na úrovni školní laboratoře. V následujícím stručném přehledu jsou uvedeny některé z nich. Obvykle jsou uvedeny v nejjednodušší formě, ve vědeckých laboratořích bývají dnes už nahrazeny metodami přesnějšími a modernějšími.

Do výběru metod jsme zařadili metody stanovení parametrů půdního prostředí (stanovení vlhkosti, obsahu organické hmoty, půdní reakce) a metody stanovení biologické aktivity půdy (produkce CO₂, celulólytická aktivita, aktivita půdní fauny).

Při použití většiny uvedených metod je nutné každý postup několikrát (obvykle aspoň 3 - 5 x) opakovat, vzhledem k velké variabilitě hodnot. Výsledná hodnota se potom stanoví jako průměr hodnot naměřených.

4.1. Odběr půdních vzorků

Postup při odběru vzorků půdy se liší v závislosti na tom, pro jaké účely je vzorek odebírán. Pro účely chemické nebo fyzikální analýzy se odebírají vzorky půdy po odstranění nadložního humusu. Obvykle se odebírají z více míst na vymezené vzorkovací ploše pomocí zahradnické lopatky nebo speciální sondovací tyče. Odebrané vzorky se přepravují v skleněných uzavíratelných nádobách nebo (častěji) v polyetylenových sáčcích, které zabrání jejich rychlému vysychání.

Pokud mají být analýzy přesné, je nejlépe pracovat se vzorky ihned po odběru. Když to není možné, ukládáme vzorky buď v lednici, anebo je nutné je vysušit na vzduchu a uložit na suchém větraném místě. Hodnoty některých půdních parametrů se však tímto postupem mohou výrazně ovlivnit. Pro většinu analýz se ještě vysušená půda zbavuje zbytků organické hmoty (např. kořínků apod.) a proseje sítem s oky kolem 2 mm (tzv. jemnozem).

4.2. Stanovení vlhkosti

Momentální relativní vlhkost půdy (w) se stanovuje vážením čerstvých vzorků a vzorků po vysušení. Do vysoušečky (hliníková miska s víkem, lze použít i jiných nádobek) se přesně odváží množství půdy odpovídající přibližně 10 g. Potom se vzorek vysušuje v sušičce při teplotě 105°C do konstantní hmotnosti (3 hodiny). Z rozdílu hmotnosti vzorku se vypočte vlhkost v hmotnostních procentech:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \%$$

(w - momentální vlhkost půdy, m_w - hmotnost vody ve vzorku (rozíl hmotnosti vzorku před vysušením a po něm), m_s - hmotnost

vysušeného půdního vzorku). Pokud v školních podmínkách není k dispozici sušička, lze dobře využít i mírně vyhřátou troubu. Stanovení se opakuje 3-5x.

Pokud by jsme chtěli vypočítat absolutní vlhkost (nikoli relativní), potom se v uvedeném vzorku nahradí hmotnost vysušeného vzorku hmotností čerstvého vzorku.

Množství sušiny stanovíme analogicky jako procentuální podíl hmotnosti suché půdy na čerstvé hmotnosti vzorku.

U vzorků, využívaných pro extrakci půdní fauny (viz níže) nelze tento postup použít, protože by mohlo dojít k úhynu extrahovaných živočichů. Vlhkost se proto může stanovit jen orientačně na paralelně odebraném vzorku nebo srovnáním hmotnosti vzorku před extrakcí a po extrakci, kdy je vzorek co nejdokonaleji prosušen.

4.3. Stanovení půdní reakce

Půdní pH závisí od přítomnosti vodíkových kationtů v půdním roztoku (tzv. aktivní kyselost) nebo vázaných v půdních koloidech, odkud mohou být za určitých okolností uvolněny výměnou za jiný kationt (výměnná kyselost).

Aktivní kyselost se stanovuje ve vodním výluhu půdy, který se připraví protřepáváním asi 10 g jemnozemě v 25 ml destilované vody, zbavené předem varem oxidu uhličitého. Po protřepání (asi 15 min.) se stanovuje pH výluhu pomocí potenciometrického stanovení pH-metrem za použití skleněné a kalomelové elektrody. V podmínkách školní laboratoře možno použít pro orientační stanovení indikátorových papírků. V tomto případě je lepší vodní suspenzi před stanovením přefiltrovat.

Výměnná acidita se stanoví stejným postupem jako acidita aktivní, pouze místo destilované vody se použije 1M roztok KCl. V důsledku výměnné adsorpce kationtů K^+ se uvolní vodíkové ionty vázané na sorpční komplex půdy, takže výměnná acidita je vždy o něco vyšší než acidita aktivní. Vysoký rozdíl mezi těmito

hodnotami svědčí o nízké nasycenosti sorpčního komplexu půdy kationty.

Při stanovení pH se postup opakuje alespoň 3x.

4.4. Přibližné stanovení obsahu organického uhlíku

Obsah organické hmoty se stanoví na základě úbytku hmotnosti vzorku po oxidaci organické hmoty za vysoké teploty. Do porcelánového kelímku se naváží vzorek půdy. Ten se nejdříve zbaví vody po zahřátí nad plamenem. Zchlazený vzorek (pokud možno v exsikátoru) zvážíme co nejpřesněji. Potom se vzorek 15 minut žihá v ostrém plameni. Přitom by se měl vzorek míchat magnéziovou tyčinkou. Organická hmota se spálí. Po opětovném vychlazení vzorku se vážením stanoví úbytek hmotnosti a z rozdílu hmotností se stanoví obsah organické hmoty v %. Obsah organického uhlíku tvoří přibližně polovinu hmotnosti organické hmoty. Podobně jako v předchozím případě pokus provádíme v několika opakováních.

4.5. Stanovení celulolytické aktivity

Jednoduchou a velmi účinnou metodou stanovení celulolytické aktivity půdy je stanovení váhového úbytku celulózy po expozici v půdním prostředí.

Jako celulózu můžeme použít malé čtverečky jemného filtračního papíru nebo čtverečky celofánu. Pokus se provádí ve větším počtu opakování (5-10). Kousky papíru nebo celofánu se umístí do "taštičky" vyrobené z plastického mušího pletiva nebo podobného materiálu. Každý kus se označí a přesně zváží. Potom se vzorky papíru pomocí lopatky vloží do štěrbin v půdě. Přitom je nutno dbát na to, aby byla půda vkládáním vzorku co nejméně narušena a aby celá plocha papírku byla alespoň několik centimetrů pod povrchem půdy. Po určité době (v závislosti na ročním období,

obvykle kolem 14- 30 dnů) se papírky z půdy vyberou a důkladně očistí. Potom se vysuší a přesně zváží. Z rozdílu hmotnosti se dá stanovit množství rozložené celulózy za 1 den. Pokus nemusí probíhat přímo v přírodě, vzorky celulózy mohou být vloženy i do vzorků půdy umístěných v sklenicích v laboratorních podmínkách.

4.6. Stanovení produkce CO₂

Produkce oxidu uhličitého je souhrnný parametr biologické aktivity půdy, vzhledem k tomu, že vzniká v důsledku životních procesů (dýchání) půdních organismů. Jeho stanovení je proto základem při sledování biologické aktivity půdy.

Měření produkce CO₂ může probíhat za standardních laboratorních podmínek nebo v polních podmínkách.

V laboratoři se produkce oxidu uhličitého měří v nádobovém pokusu. Na dno hermeticky uzavíratelných sklenic (např. patentní zavařovací lahve) se přesně naváží kolem 50 - 100 g půdního vzorku. Před tím se musí změřit množství sušiny v půdě (viz stanovení vlhkosti). Použije se buď čerstvá půda, nebo se vzorek předinkubuje po dobu 6 týdnů v lednici při teplotě 4°C. Na půdní vzorek ve sklenici se pak postaví malá nádobka (kádinka) obsahující 5 ml 2M hydroxidu sodného. Sklenice se uzavře a inkubuje při pokojové teplotě po dobu 24 hodin, 7 nebo 14 dnů. Oxid uhličitý, produkovaný půdou, reaguje s hydroxidem sodným za vzniku uhličitanu. Po inkubaci se zbylý hydroxid sodný stanoví titrací kyselinou. Do vzorku se nejdříve přidají 2 ml roztoku chloridu barnatého (uhličitan sodný s ním zreaguje za vzniku bílé sraženiny uhličitanu barnatého) a 3 kapky fenolftaleinu. Potom se roztok titruje 0.5M roztokem kyseliny chlorovodíkové se známým faktorem až do vymizení růžového zabarvení (bílá sraženina zůstává). Celý postup se paralelně provádí v několika (3) opakováních a současně se zakládá tzv. slepý vzorek (bez vzorku zeminy). Ze spotřeby kyseliny při titraci se pak vypočte množství vyprodukovaného CO₂ za hodinu (den) podle vzorce:

$$R = \frac{(S - A) \cdot 0,5 \cdot f \cdot 11,2}{m \cdot s \cdot h}$$

kde R - ml oxidu uhličitého vytvořeného v 1 g suché půdy za 1 hodinu (den)

- S - spotřeba HCl při titraci slepého vzorku (v ml)
- A - spotřeba HCl při titraci měřeného vzorku
- f - faktor HCl
- m - hmotnost navážky půdy
- s - sušina půdy v %
- h - doba inkubace vzorku v hodinách (dnech)
- 0,5 - molarita HCl
- 11,2 - přepočtový faktor na ml oxidu uhličitého

Měření produkce CO₂ v polních podmínkách se provádí na principu chemické vazby oxidu uhličitého natrikalcitem. Přesná navážka natrikalcitu se umístí do Petriho misky nad povrch půdy a vzduchotěsně zakryje kovovým cylindrem osazeným do půdy. Po týdenní expozici se množství vyprodukovaného CO₂ vypočte z přírůstku hmotnosti natrikalcitu v přepočtu na 1 m² a den.

4.7. Aktivita půdní fauny

Aktivita půdní fauny se obvykle vyjadřuje zprostředkovaně pomocí velikosti populací živočichů. Metod pro jejich zjišťování je celá řada, obvykle je pro každou systematickou nebo funkční skupinu vypracována jedna nebo i několik speciálních metod. Vzhledem k možnostem zpracování materiálu a podmínkám školní laboratoře tu uvádíme pouze některé, obvykle zjednodušené nebo modifikované metody. Úvodem je potřebné poznamenat, že půdní fauna se extrahuje z půdních vzorků jiného typu, než se odebírají pro stanovení fyzikálních a chemických vlastností půdy. Obvykle

se odebírá vzorek včetně všech organických horizontů (t.j. i nadložního humusu), z přesně stanovené plochy (obvykle 5 x 5 cm nebo 100 cm²). Půdní fauna se extrahuje buď z celého horizontu (obvykle do hloubky 10 cm), nebo se vzorek před extrakcí rozdělí podle subhorizontů.

4.7.1. Extrakční metody a mikroskopické zpracování

Nejjednodušší je extrakce žížal, představujících nejvýznamnější skupinu půdní makrofauny. Na vymezené vzorkovací ploše se postupně vykope několik (2-4) jámy o rozměrech 25 x 25 cm do hloubky 25 cm. Půda se při kopání odkládá na hromadu na igelit nebo papír a nalezené žížaly se vybírají do prázdné uzavírací lahvičky (např. od dětské výživy). Při zasypávání jámy se půda důkladně rozdružuje a probírá mezi prsty, aby se zachytili i nejmenší jedinci. Získané žížaly se nakonec usmrtí zalitím 4% roztokem formalínu, který je rovněž fixuje.

Tato metoda však nemusí zachytit složení celého společenstva. Proto se při průzkumech půdní fauny používají ještě další metody (např. zalití vykopané jámy 0.25-0.55 roztokem formalinů; tepelná extrakce podobně jako u půdní mesofauny).

Epigeická půdní fauna se získává pomocí metody tzv. zemních pastí, t.j. skleněných lahví nebo plastikových kelímků zakopaných do linie ve vzdálenosti asi 1 m od sebe do půdy tak, aby okraj lahvi (kelímků) byl přesně na úrovni terénu (neměl by být níže a v žádném případě nesmí přechýlávat nahoru!). Přitom se musí dbát na to, aby se co nejméně porušilo bezprostřední okolí pastí. Každá lahvička se naplní asi 1 - 2 cm silnou vrstvou 4% formalínu. Pasti se mají chránit před deštěm buď vhodným umístěním pod hustější porost, nebo přikrytím kouskem kůry či kamenem - vždy ale tak, aby půdní živočichové mohli pod tento kryt vlézt. Lze také vyrobít "stříšky" z plechu nebo plastu, které se umístí 2 - 3 cm nad zemní past pomocí kousku silnějšího drátu, nebo hřebíků. Pasti zůstávají exponované různě dlouho (alespoň týden až 10 dní, ale i několik měsíců). Místo formalínu se někdy používá různých návnad (např. pivo, sýr, kousky masa apod.),

v tom případě se pasti musí kontrolovat a vybírat častěji, tedy i v průběhu jejich expozice. Chycené organismy se usmrcují buď v denaturovaném lihu, nebo - pokud se jedná o entomologické objekty - v smrtičce s octanem etylnatým.

Půdní mesofauna (zejména půdní členovci) se z půdy nejčastěji extrahuje pomocí modifikovaných extraktorů podle Berleseho a Tullgrena. Principem extrakce je reakce mesofauny na vysychání půdního substrátu a jeho prohřívání snahou o únik ve směru zemské tíže, t.j. do větší hloubky půdního profilu. Zjednodušený extraktor podle Berleseho a Tullgrena lze sestavit uchycením obyčejné nálevky (trychtýře) tak, aby její ústí bylo asi 5 cm nad podkladem. Do nálevky se vloží cedník s oky velikosti alespoň 1 x 1 mm a pod ní sběrná nádoba se 70 % denaturovaným alkoholem. Nad cedník se umístí stolní lampa, ve vzdálenosti asi 10 - 25 cm (podle síly žárovky). Celý půdní vzorek nebo jeho část se jemně rozvolní a naloží do cedníku tak, aby půda z cedníku nikde nepřechýla. Samotná extrakce probíhá postupným vysušováním vzorku, přitom je lepší nejdříve půdu vysušovat pozvolna a teprve po 1 - 2 dnech přisvítit a přehřát stolní lampou. Zástupci mesofauny postupně pronikají do hloubky a propadávají cedníkem do připravené nádoby. Vzorek se má extrahovat alespoň 3 - 4 dny (měl by úplně proschnout). Extrakce by měla probíhat na místě bez otřesů, aby cedníkem propadlo co nejméně půdních částic. Aby bylo možno zachytit většinu druhového spektra na dané lokalitě a v daném typu biotopu, musíme extrahovat větší počet vzorků.

Na podobném principu je založena extrakce půdních hlístic nebo roupic. Rozdíl je pouze v tom, že se nálevky uzavřou gumovou hadičkou s tlačkou a naplní vodou tak, aby spodní část půdního vzorku byla už pod její hladinou. Hlístice i roupice podobně jako mesofauna unikají před teplem a suchem a postupně se přemísťují do vodního sloupce pod cedníkem. Extrahované živočichy potom jednoduše vypustíme do Petriho misky a můžeme je mikroskopicky zpracovat.

Drobné půdní živočichy pozorujeme v mikroskopických preparátech buď přímo nebo po obarvení. Většinu drobných půdních členovců není možno pozorovat bez předchozí úpravy, protože jsou špatně nebo vůbec neprůsvitní. Navíc jejich těla jsou už poměrně

velká, takže se na normálním podložním sklíčku mohou tlakem krycího skla rozmačkat. Proto se pro mikroskopické pozorování půdní mesofauny používá podložní sklo s jamkou, které se přikryje jenom zpoloviny krycím sklem. Jako médium se používá nejčastěji kyselina mléčná. Do takto připraveného preparátu se vloží zástupce mesofauny pomocí preparační jehly nebo jemné pinzety a zasune pod krycí sklíčko. Jemným zahřátím (např. nad lihovým plamenem) se objekt v kyselině mléčné projasní, takže se stane průsvitným a je možno ho pozorovat v procházejícím světle mikroskopu.

4.7.2. Determinace půdní fauny

Při analýzách společenstva půdní fauny je důležitá informace o potravních vazbách jednotlivých druhů a o poměru jednotlivých trofických úrovní v daném vzorku půdy. Tato charakteristika je významným parametrem půdního společenstva, který lze využít zejména při studiu vztahů v dekompozičních a ostatních potravních řetězcích v půdě.

Proto je vhodné analyzovanou půdní faunu determinovat nejméně do té taxonomické úrovně, která nám umožní alespoň rozlišit detritofágní a dravé druhy (pochopitelně, čím podrobnější je determinace, tím více informací o půdním ekosystému získáme).

U mnoha skupin půdní fauny nečiní toto rozlišení potíže. To platí pro skupiny, které jsou celé stejně potravně specializované, např. prakticky pouze predátoři jsou pavouci, stonožky, sekáči a štírci, mnohonožky a chvostokoci jsou zase prakticky výlučně detritožravé nebo fytofágní (resp. mikrofytofágní, živící se půdní mikroflórou). Problémy nastávají u skupin, které mají různý typ potravy (např. roztoči, hmyz). Pro determinaci hmyzu existuje celá řada populárních i odborných publikací, publikace zabývající se určováním roztočů jsou mnohem méně dostupné a často velmi komplikované. Proto uvádíme v příloze stručný a zjednodušený klíč, který účastníkům biologické olympiády může pomoci aspoň při hrubé orientaci během determinace půdních členovců. Podrobnější klíč k determinaci jednotlivých

skupin hmyzu neuvádíme, doporučujeme využít dostupnou literaturu. Přibližné roztrídění podle potravní specializace je pro půdní druhy uvedeno v tabulce připojené ke klíči.

KLÍČ K URČOVÁNÍ PŮDNÍCH ČLENOVCŮ (ARTHROPODA):

- 1 Na hlavě dva páry tykadel¹⁾. Všechny články těla nesou končetiny.....
.....podkmen Branchiata (Žabernatí)
třída Crustacea (Korýši)
(v půdě se vyskytují pouze zástupci suchozemských
stejnonožců - Isopoda, Oniscoidea - stínky)
- Na hlavě jeden pár tykadel nebo tykadla chybí 2
- 2(1) Tykadla chybí, dospělci a nymfy se 4 páry nohou (larvy se 3 páry), hlava splývá s hrudí do velké hlavohruď, která navíc někdy může splývat se zadečkem. Ústní orgány tvoří klepítka (chelicery) a pedipalpy
podkmen Chelicerata (Klepítkatci), třída Arachnoidea (Pavoukovci) 3
- Hlava s jedním párem tykadel, pokud výjimečně chybí, potom jsou vyvinuty 3 páry nohou
podkmen Tracheata (Vzdušnicovci)..... 8

¹⁾ U půdních zástupců korýšů lze tento znak jen stěží pozorovat. Vzhledem k charakteristickému vzhledu však určení stínek nečiní potíže (viz vyobrazení v dostupných publikacích).

- 3(2) Pedipalpy velké, na konci s nápadnými klepítky 4
- Pedipalpy nejsou nápadně klepetovité 5
- 4(3) Zadeček dlouhý, rozdělený na široký 7-členný preabdomen a 6-členný štíhlý postabdomen, který je zakončen zduřelým článkem s jedovou žlázou a bodcem. Na břišní straně za 4 párem noh dva hřebínkovité útvary, druhy větší (dospělci několik centimetrů)
..... řád štíři (Scorpionida)
- Zadeček krátký, vejčitý, nerozdělený na dvě rozdílné části. Jedový bodec není vyvinut, hřebínkovité útvary chybí. Velikost těla jen několik mm
..... řád štírci (Pseudoscorpionida)
- 5(3) Zadeček nečlánkovaný, připojený k hlavohruď tenkou krátkou stopkou. Na břišní straně na konci zadečku je několik párů snovacích bradavek. U dospělých samců poslední článek makadel zduřelý, přeměněný na pářicí ústroj řád pavouci (Araneida)
- Zadeček bez stopky, připojen k hlavohruď celou šíří 6
- 6(5) Tělo rozčleněno na hlavohruď a krátký článkovaný zadeček. Nohy obvykle dlouhé a tenké, bez zřetelného chloupkování. Oči zpravidla umístěny na zvláštním výstupku na hlavohruď řád sekáči (Opilionida)
- Tělo členěno jiným způsobem nebo nečleněno, celistvé, zadní část jen zřídka s náznakem článkování. Ústní orgány tvoří zvláštní část těla (gnathosoma). Nohy obvykle kratší nebo krátké, zřetelně chloupkované
..... (skupina řádů) roztoči (Acarina) 7

- 7(6) Tělo kromě gnathosomy rozčleněno zřetelnou brázdou (sejugální linií) na přední a zadní oddíl. Kyčle nohou jsou vrostlé do břišní strany těla a vytváří destičkovité epimery. Chlupy obsahují opticky aktivní látku (aktinochitin), takže v polarizovaném světle svítí nadřád Actinotrichida

Skupina obsahuje 4 v půdě se vyskytující řády roztočů, a to pancířníky (Oribatida), sametkovce (Actinedida), a řády Acaridida a Tarsonemida. Pancířníci jsou v půdě nejhojnější, jejich tělo je často velmi silně sklerotizováno, zbarvení od černého, hnědého, hnědočerveného až po žluté a oranžové odstíny, jen zřídka bělavé. Hřbetní část těla nese prakticky vždy 1 pár výrazně vyvinutých smyslových štětín (sensily), často velmi odlišných od ostatních chlupů těla, vyrůstajících z pohárkovitých útvarů (bothridií). Na břišní straně těla jsou vyvinuty typické dva páry sklerotizovaných destiček, kryjících genitální a anální otvor. Ústní orgány pancířníků zpravidla nejsou shora viditelné, jejich pedipalpy jsou vždy více než 3-členné. Sametkovci se liší především nesklerotizovaným kožovitým tělem, obvykle bělavého nebo žlutavého zbarvení. Může se však vyskytnout i pestré pastelové zbarvení (červené, sytě zelené, u vodních forem různě skvrnité). Ústní orgány jsou shora viditelné, sensily a bothridie mohou být vyvinuty, někdy i ve dvou párech. Anální a genitální destičky nejsou vyvinuty, nebo jsou jiné než u pancířníků (nepárové, sdružené do malého ohraničeného políčka apod.) Povrch těla může být pokryt velmi hustým chloupkováním (sametky).

Acaridida připomínají nedospělá stádia pancířníků. Nejsou však nikdy sklerotizováni, tělo je žlutavé nebo bělavé, často s nápadnými, naježenými a dlouhými chlupy. Nikdy nemají vyvinuté bothridie

a jejich makadla jsou pouze dvoučlenná. U některých forem mohou být vyvinuta na břišní straně políčka s přísavkami, potom může být tělo šupinkovité, lesklé a ústní orgány redukovány.

Tarsonemida se vyznačují redukcí ústních orgánů (pedipalpy nečláňkované, ústní orgány obtížně viditelné). Jejich tělo je ve srovnání s ostatními skupinami roztočů malé, šupinkovité nebo štítkovité, často téměř průhledné, lesklé. Nikdy ale nemají vyvinutá políčka s přísavkami na břišní straně těla.

- Tělo kromě ústních orgánů (gnathosomy) nečleněno na přední a zadní oddíl. Kyčle nohou jsou více-méně volné, oválné nebo oblé, mezi nimi je zachován sternální štít. Chlupy neobsahují opticky aktivní světloolomnou látku (aktinochitin) nadřád Anactinotrichida

Tato skupina obsahuje dva řády, klišťata (Ixodida) a čmelíkovce (Gamasida). Klišťata, která lze dobře odlišit podle ústních orgánů proměněných v hypostom se zpětnými háčky, nepatří mezi pravé půdní obyvatele. Čmelíkovci mají obvykle poměrně robustní tělo, dobře sklerotizované, zbarvené žlutě, oranžově nebo hnědooranžově. Ústní orgány bývají shora viditelné, nejsou však vyzbrojeny zpětnými háčky. Skupina Uropodina se liší štítovitým tělem oválného nebo hruškovitého tvaru, krátkýma nohama zapadajícíma do prohlubní na břišní straně těla a tím, že ústní orgány nejsou shora viditelné. Tato skupina je na rozdíl od všech ostatních zástupců čmelíkovců detritožravá.

- 8(2) Tělo je složeno z hlavy a stejnorodě členěného trupu, jehož články nesou článkované nohy nadřáda Myriapoda 9

- Tělo členěno na hlavu, tříčlennou hrud a zadeček. Hrud nese tři páry nohou a často dva páry křidel nadtrída Hexapoda (šestinozí, hmyz v širším smyslu) 10

- 9(8) Každý článek trupu počínaje pátým nese dva páry obvykle jemných nožek třída mnohonožky (Diplopoda)

- Články trupu nesou po jednom páru noh, první pár je přeměněn na silné, ztlustlé a obloukovitě zahnuté čelistní nožky, zaostřené na koncích třída stonožky (Chilopoda)

Do příbuzenstva stonožek a mnohonožek patří ještě dvě další třídy, žijící v půdě. Stonoženky (Symphyla) připomínají stonožky, mají ale v dospělosti jen 12 párů nohou (stonožky 15 a více než 15) a jejich tělo je bělavé, zakončené dvěma plochými štěty. Drobnušky (Pauropoda) mají pouze 9 nebo 10 párů nohou a jejich tykadla jsou velmi jemná a dvojnásobně větvená.

- 10(8) Oči a tykadla chybí. Přední pár nohou silně vyvinut a namířen dopředu. Zadeček 12-členný, na břišní straně prvních tří zadečkových článků vyvinuty kónické přívěsky třída hmyzenky (Protura)

- Tykadla jsou vyvinuta 11

- 11(10) Na některých zadečkových člancích a často i na konci zadečku jsou vyvinuty přívěsky. Pokud chybí, je alespoň v zadní části nebo na konci zadečku vyvinuta skákací vidlice. Ústní orgány zvenčí neviditelné, ukryté ve zvláštní dutině v hlavě 12

- Přívěsky jsou pouze na konci zadečku, nebo vůbec chybějí. Ústní orgány zvenčí viditelné třída hmyz (Insecta)

- 12(11) Zadeček nejvýše 6-členný. Na břišní straně vyvinut na prvním zadečkovém článku vyčnívající přívěsek (ventrální tubus) a na 4. nebo 5. článku skákací vidlice (furka, může druhotně chybět). Tělo cylindrické se zřetelným článkováním nebo skoro kulaté, s článkováním nezřetelným třída chvostoskoci (Collembola)

- Zadeček 10 - 11 členný, vzadu s přívěsky ve formě dvou dlouhých, jemně článkovaných štětů nebo krátkých nečlánkovaných kleštiček třída vidličnatky (Diplura)

Tabulka:
Orientační přehled potravní specializace podle skupin, uvedených
v klíči (uvažováno pouze pro materiál získaný extrakcí z půdy!).

Skupina	býložravé a detritofágní druhy	dravé a parazitické druhy
Isopoda	*	
Scorpionida		*
Pseudoscorpionida		*
Araneida		*
Opilionida		*
Oribatida	*	
Actinedida	* 1	* 1
Acaridida	* 2	
Tarsonemida	*	
Gamasida	* 3	* 3
Ixodida		*
Diplopoda	*	
Chilopoda		*
Paupoda	*	
Symphyla	*	
Insecta	* 4	* 4
Collembola	*	
Protura	*	
Diplura	*	

- 1/ býložravé a dravé formy přibližně v poměru 1:1
2/ parazitické druhy se v půdě prakticky nevyskytnou
3/ detritožravé jsou pouze formy ze skupiny Uropodina, jinak dravé
nebo parazitické, často foretické druhy
4/ podíl obou skupin lze stanovit až po podrobnější determinaci

5. DOPORUČENÁ LITERATURA

Problematika půdní biologie zatím není v naší literatuře zastoupena v rozsahu, který by odpovídal jejímu významu. Je to dáno velkou složitostí i opožděným začátkem studia půdního ekosystému. Jednotlivé poznatky jsou proto rozděleny do většího množství učebnic a dalších knih, kde se musí obvykle pracně vyhledávat. V následujícím přehledu jsou uvedeny pouze některé z nich, které se problematice půd a půdní biologie věnují podrobněji a uvádí i řadu ilustrací k tomuto tématu. Uvádíme rovněž publikace, ve kterých možno nalézt podrobnější popis metod ke studiu půdních ekosystémů nebo jejich obyvatelů.

Skripta a podobné vysokoškolské učebnice v přehledu až na výjimky nejsou uvedena, lze však doporučit všechny texty, dotýkající se pedologie a pedobiologie (zejména na lesnických a zemědělských školách).

Největší část poznatků, využitých při zpracování tohoto textu, byla čerpána z původních prací, publikovaných v odborných časopisech v cizím jazyce. Proto je od jejich citace upuštěno, i když pro zpracování příručky měly zásadní význam.

- Odum, E.P., 1977: Základy ekologie. Academia Praha.
Losos, B. a kol., 1984: Ekologie živočichů. SPN Praha
Rychnovská M. a kol., 1985: Ekologie lučních porostů. Academia Praha
Němeček J. a kol., 1990: Pedologie a paleopedologie. Academia Praha
Duvigneaud P., 1988: Ekologická syntéza. Academia Praha
Dykyjová D. a kol., 1989: Metody studia ekosystémů. Academia Praha
Králová M. a kol., 1991: Vybrané metody chemické analýzy půd a rostlin. Studie ČSAV 12/90. Academia Praha
Boháč I., 1983: Cvičení z biologie pro I.ročník gymnázia (nepovinný předmět). SPN Praha
Buchar J., 1992: Stručný přehled zoologie bezobratlých. Univerzita Karlova Praha (skriptum)

6. Obrázková příloha (popisy k obrázkům)

Obr. 1

Schéma fungování půdního ekosystému

Obr. 2

Koloběh uhlíku v biosféře (převzato z Duvigneaud, 1988), hodnoty v 10^9 tun.

Obr. 3

Koloběh dusíku v biosféře (převzato z Duvigneaud, 1988, doplněno), hodnoty v 10^6 tun. Funkční skupiny půdních bakterií: F - fixující dusík (hlízkové a další), A - amonizační, N - nitrifikační (nitritační a nitratační), D - denitrifikační

Tabule k určovacímu klíči:

Obr. 4

1 - hlístice (Nematoda), 2 - žížaly (Oligochaeta, Lumbricidae), 3 - suchozemští stejnonožci (stínky, Isopoda), 4 - štírci (Pseudoscorpionida), 5 - sekáči (Opilionida)

Obr. 5

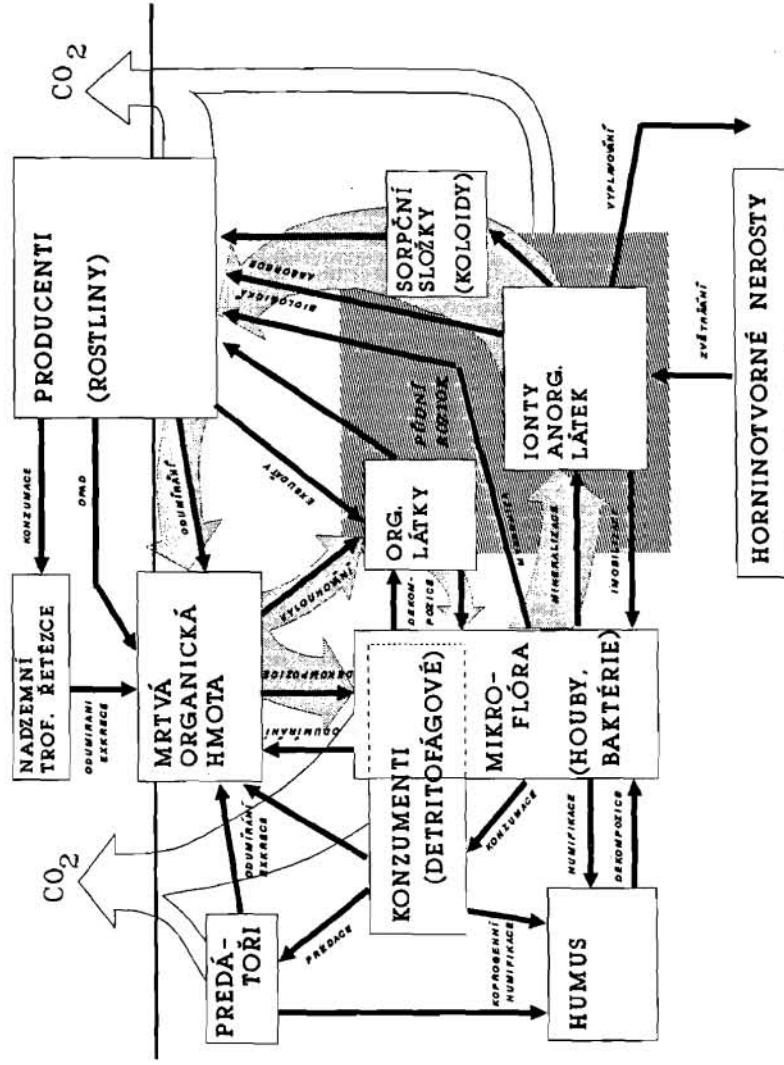
1 - pavouci (Araneida), skupiny roztočů (Acarina): 2 - klíšťata (Ixodida), 3 - čmelíkovci (Gamasida), 4 - roztočící (Tarsonemida), 5 - sametkovci (Actinedida)

Obr. 6

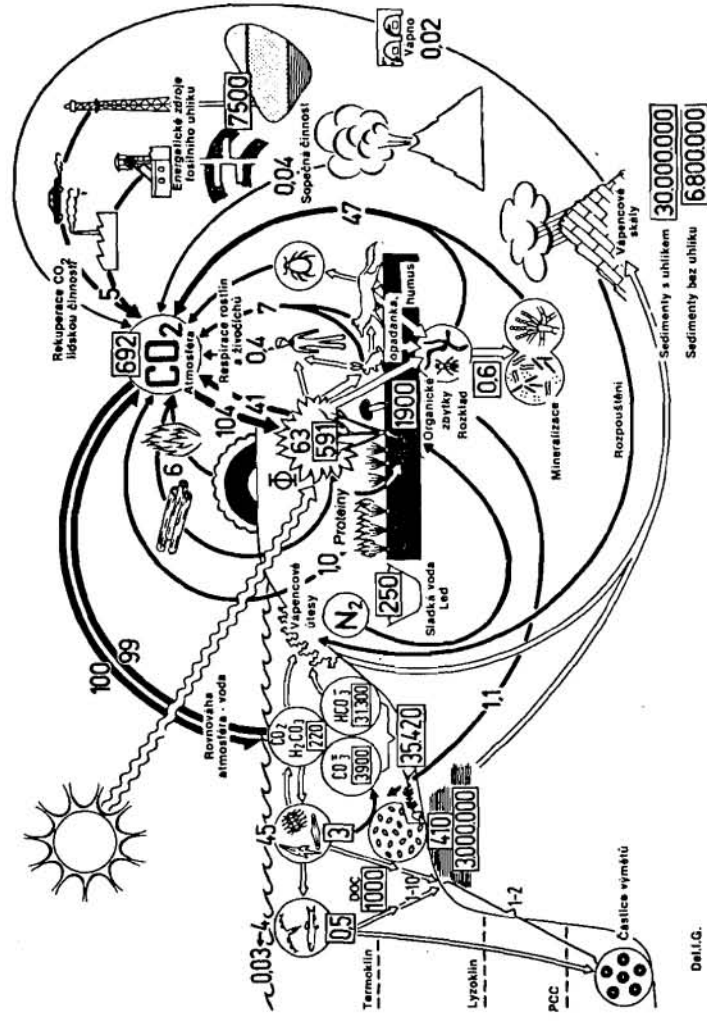
skupiny roztočů (Acarina): 1 - roztoči (Acaridida), 4 - pancířníci (Oribatida, vyobrazení bez nohou); 2 - stonožky (Symphyla), 3 - drobnělky (Paupoda)

Obr. 7

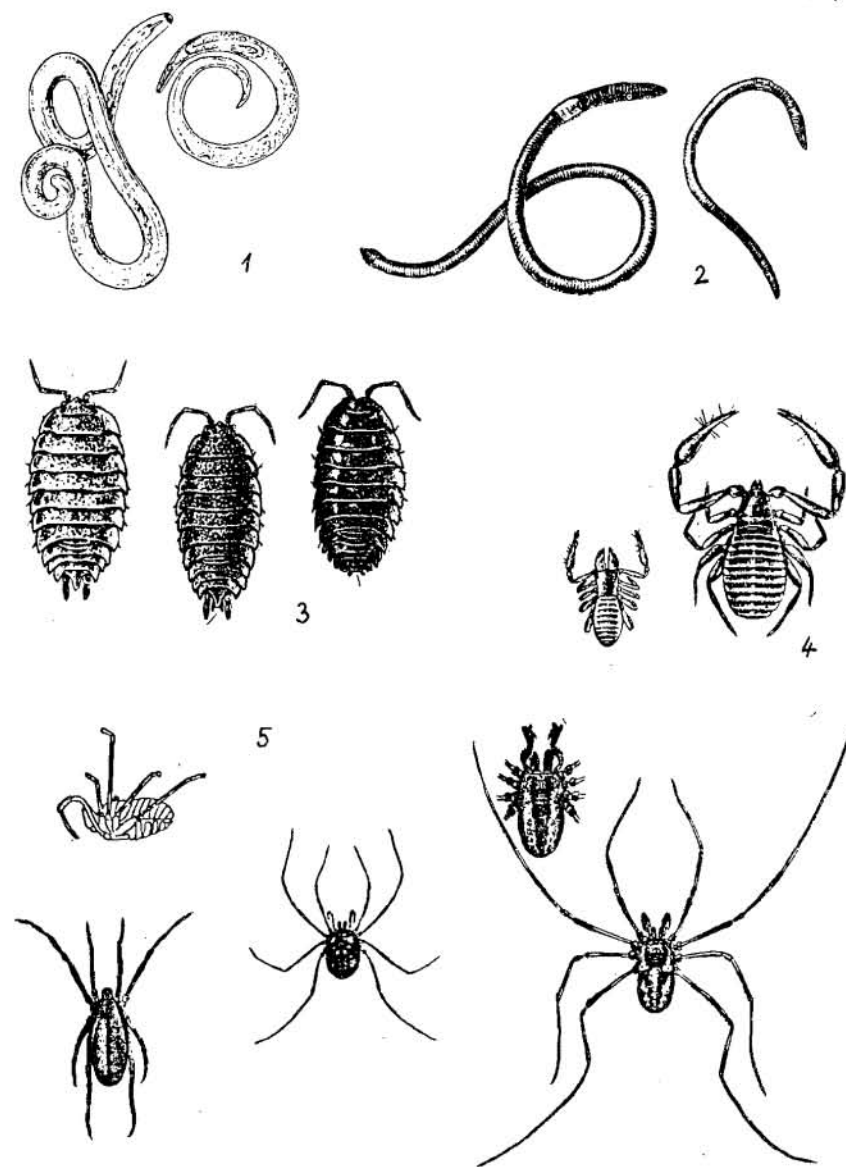
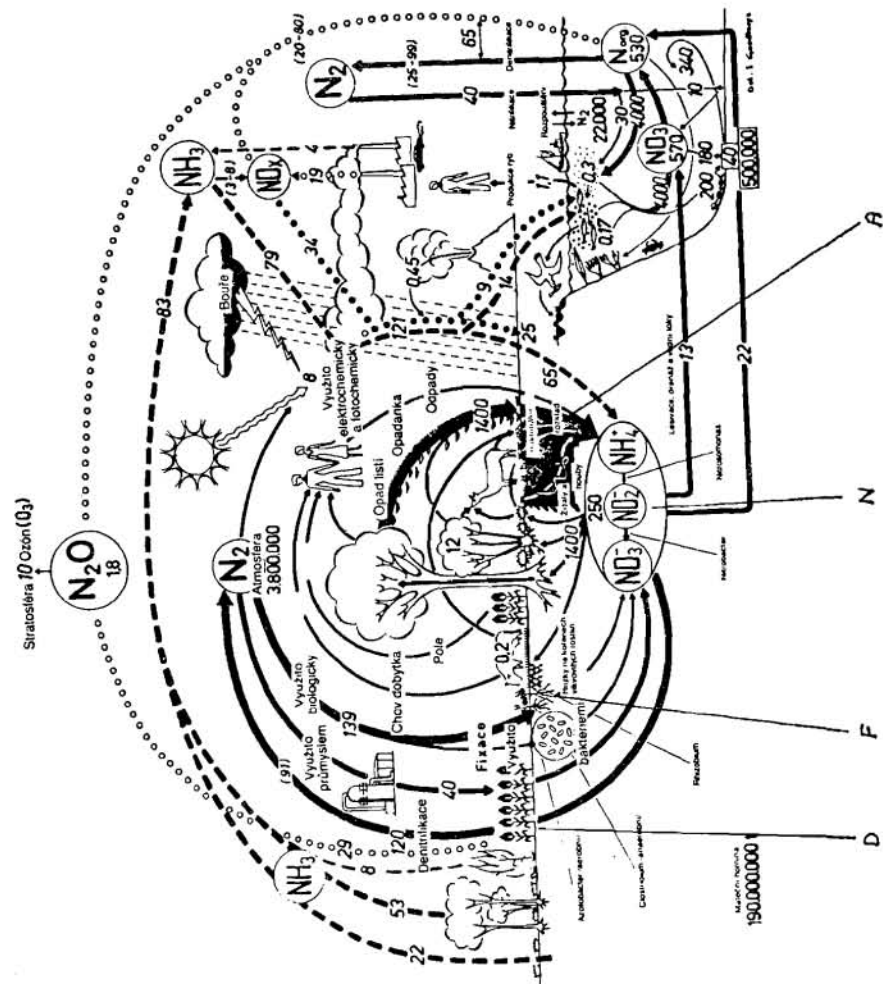
1 - stonožky (Symphyla), 2 - mnohonožky (Diplopoda), 3 - hmyzenky (Protura), 4 - vidličnatky (Diplura), 5 - chvostoskoky (Collembola)



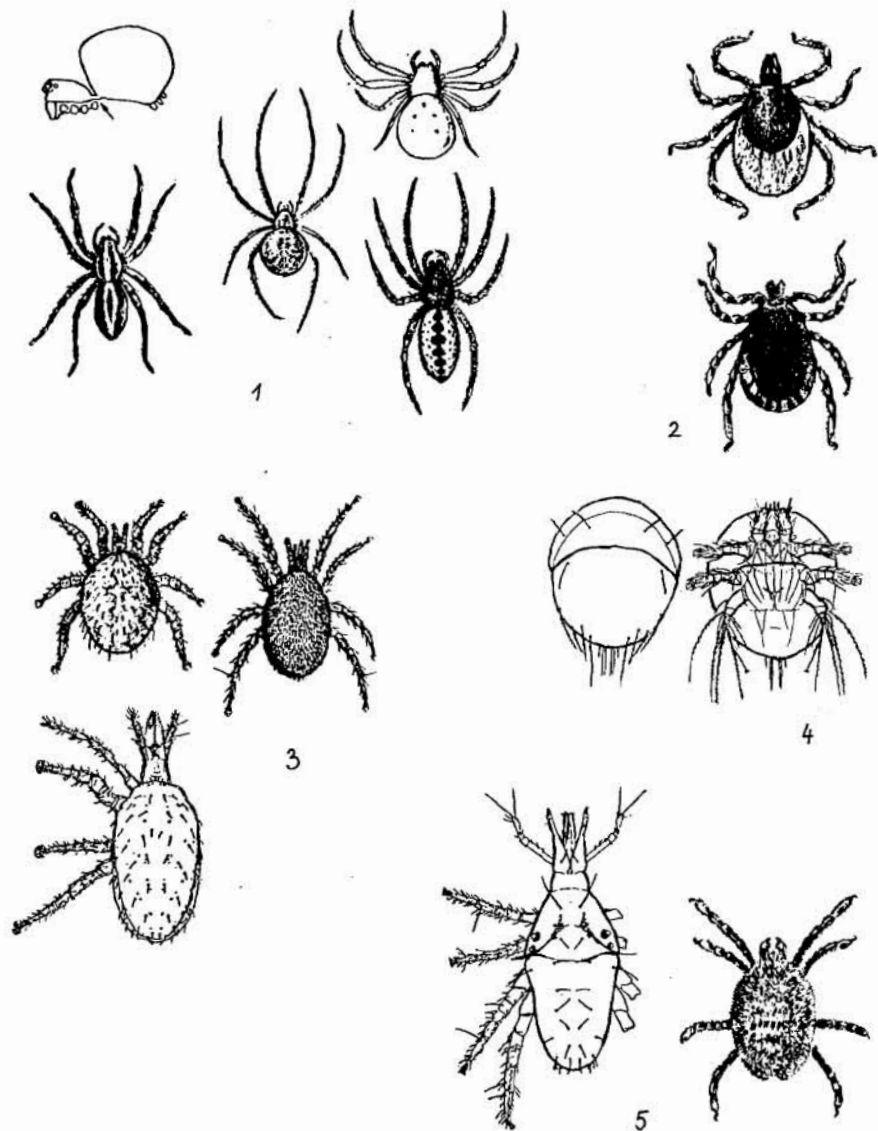
OBR. 1



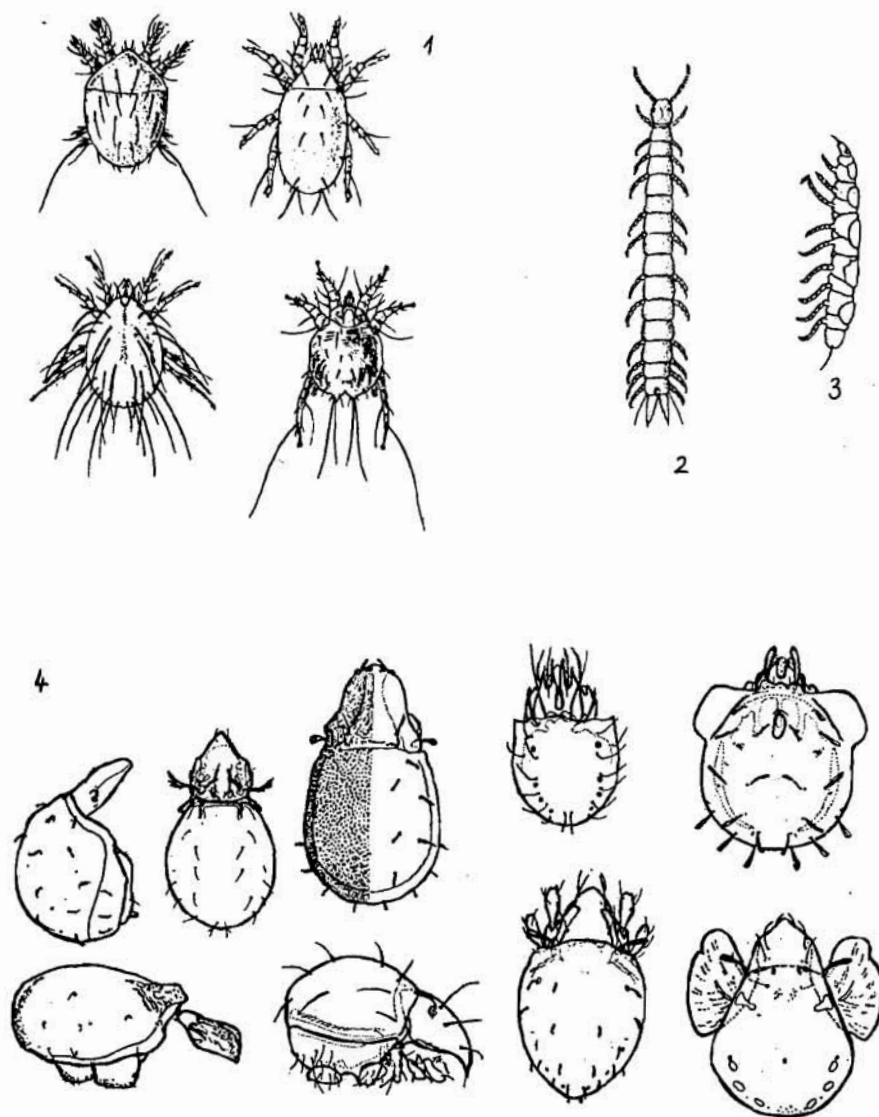
OBR. 2

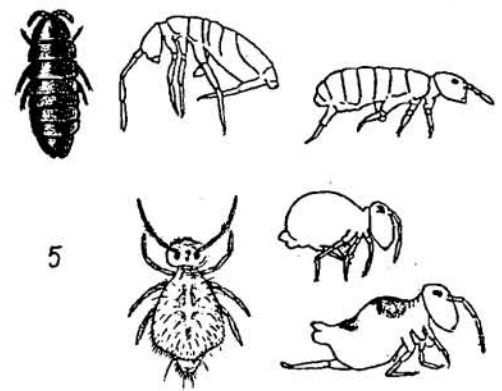
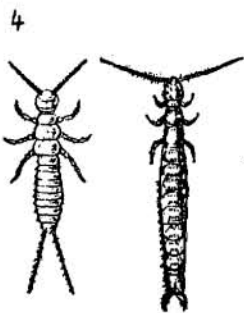
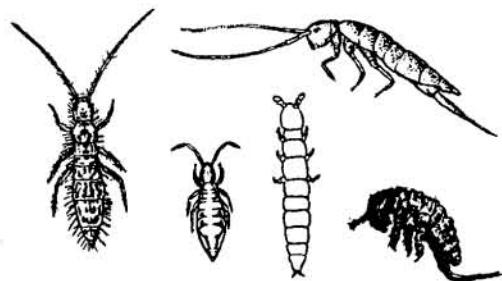
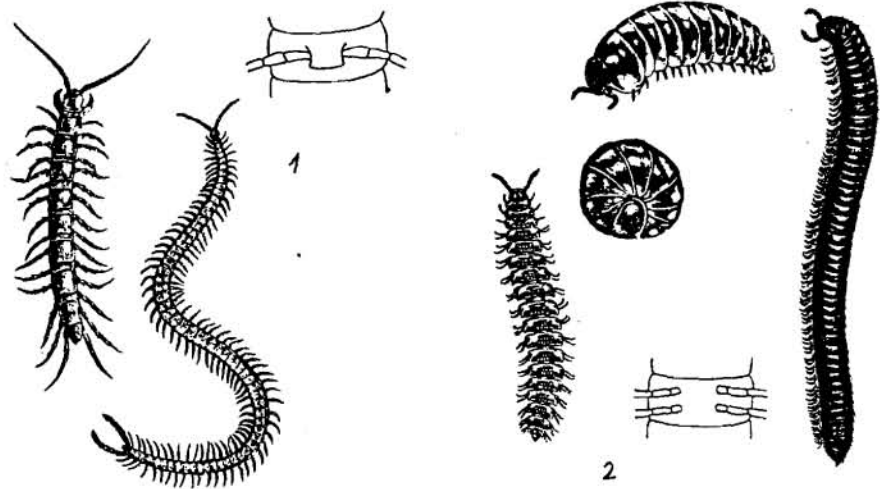


OBR. 5



OBR. 6





ÚVOD DO PŮDNÍ BIOLOGIE
Biologická olympiáda 1993-1994
přípravný text pro kategorie A,B

Autor: RNDr.L. Miko
Spoluautoři: ing.K. Rejšek,CSc.- kapitola 3.1.1., 3.1.2.
L. Chvátalová - kapitola 3.1.3.
Recenze: ing.H. Šantrůčková,CSc.
RNDr.J. Chalupský,CSc.
Redakce: ing.H. Nábělková
Vydal: Institut dětí a mládeže MŠMT ČR v Praze 1993
1 000 výtisků
Vytiskl: MISTRAL, tiskárna skript a brožur, Praha 1, Bílkova 17
Bez jazykové úpravy
ISBN: 80-85105-67-5

Pro potřeby biologické olympiády.