

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí



**Využití půdní mikrostruktury pro sledování sukcesních
změn v bioturbační činnosti půdní fauny na výsypkách
po těžbě uhlí**

Using of soil microstructure in study of soil fauna bioturbation
in post-mining sites

Linda Suchá

vedoucí: prof. Mgr. Ing. Jan Frouz, CSc.

srpen 2014

Abstrakt

Práce navazuje na předchozí analýzy změn půdní mikrostruktury při vývoji půd na výsypkách v okolí Sokolova v České republice, využívající metodiku půdních výbrusů. Byla studována struktura půdy ve vrchní vrstvě profilu u dvou chronosekvencí, první byla porostlá spontánní vegetací, druhá rekultivovaná výsadbou olše. Bylo využito porovnání s historickými daty získanými na těchto plochách před 10 lety, proto byla použita stejná metodika (Frouz a kol. 2007b).

Nejvýraznějším trendem v časovém vývoji půd pozorovaným jak na základě porovnání výbrusů z různých ploch chronosekvence, tak na základě změn jednotlivých ploch v čase, byl postupný úbytek čistě minerálních struktur a jejich nahrazování strukturami organického původu opadem a jeho fragmenty, exkrementy členovců, exkrementy žížal a kořeny. To názorně demonstruje vysoký podíl biogenních struktur a tím i zásadní podíl organismů na formování vrchní vrstvy půdy, na který upozorňují i další autoři.

Klíčová slova: Půdní makrofauna; Půdní mikrostruktura; Půdní výbrusy; Rekultivace; Výsypky; Vývoj půdy; Žížaly

Abstract

The paper follows up on previous analyses of changes in soil microstructure in the process of soil development on dumps around Sokolov, Czech Republic, using the soil thin section method. The distribution of structures in the topsoil of the profile was studied in two chronosequences, one overgrown with spontaneous vegetation and one reclaimed by alder planting. A comparison with historical data obtained at these locations 10 years ago was used, and, therefore, the same methods were also applied (Frouz et al., 2007b).

The most distinct trend in the process of soil development over time, as observed through both a comparison of soil thin sections from various areas of chronosequence and changes in particular sites over time, is a gradual reduction of purely mineral structures and their replacement by organic matter – litter and its fragments, faecal pellets of arthropods, earthworms coprolites, and roots. This is illustrative of a high share of biogenic structures and a fundamental contribution of organisms to forming topsoil, a fact also pointed out by other authors.

Keywords: Soil macrofauna; Soil microstructure; Soil thin section; Reclamation; Post-mining sites; Soil development; Earthworms

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pod vedením prof. Mgr. Ing. Jana Frouze, CSc. s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze, srpen 2014

Linda Suchá

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kdo mě v této práci podpořili. Jmenovitě děkuji prof. Mgr. Ing. Janu Frouzovi, CSc. za vedení diplomové práce a cenné rady. Děkuji RNDr. Jolaně Tátosové Ph.D. za možnost vyfotit půdní výbrusy pod mikroskopem.

Obsah

Seznam tabulek a obrázků	7
1 Úvod	9
2 Cíle práce	10
3 Literární přehled	11
3.1 Hnědé uhlí a vliv jeho těžby na životní prostředí	11
3.2 Půda, půdní živočichové a bioturbace	13
3.3 Půdní výbrusy a jejich historie	18
4 Metodika	22
4.1 Popis zájmového území	22
4.2 Odběr a zpracování vzorků	24
4.3 Statistické zpracování dat	26
4.3.1 Porovnání rozdílnosti v rozdělení půdní struktury	26
4.3.2 Konfidenční interval spolehlivosti	27
5 Výsledky	28
5.1 Popis hlavních půdních struktur	28
5.2 Porovnání jednotlivých struktur podle chronosekvence v závislosti na rekultivaci a hloubce	36
5.3 Porovnání jednotlivých komponent ve vzorcích v roce 1998 a 2008.....	43
6 Diskuze	52
7 Závěr	55
8 Literatura	56

Seznam tabulek a obrázků

Tabulka 1: Přehled nerektivovaných a rektivovaných ploch, kde byly odebrány vzorky.

Tabulka 2: Porovnání intervalů spolehlivosti pro 0–5 cm a 5–10 cm pro rok 1998 (Frouz a kol., 2007b) a 2008.

Obrázek 1: Půdní výbrus reprezentující hloubku 5–10 cm z nerektivované plochy z Velké podkrušnohorské výsypky.

Obrázek 2: Půdní výbrus z nerektivované 33 let staré plochy zachycuje podlouhlé minerální části, mezi nimi kořeny.

Obrázek 3: Půdní výbrus z rektivované 25 let staré plochy zachycuje minerální část, vlevo jsou vidět podlouhlé kořeny.

Obrázek 4: Půdní výbrus z rektivované 33 let staré plochy zachycuje tmavé kousky uhlí, různé nepravidelné exkrementy žížal se zakomponovanými kousky opadu a minerálních částí.

Obrázek 5: Půdní výbrus z 25 let staré nerektivované plochy zachycuje minerální část, póry, ve spodní části vpravo najdeme kořen.

Obrázek 6: Půdní výbrus z rektivované 25 let staré plochy zachycuje minerální část.

Obrázek 7: Půdnímu výbrusu dominuje velký opad, dále je na něm drobnější opad, exkrementy členovců, kořeny a póry.

Obrázek 8: Půdní výbrus z rekultivované 50 let staré plochy zachycuje v dolní části exkrement žížaly, vlevo kořen, uprostřed fragment opadu.

Obrázek 9: Půdní výbrus z 25 let staré nerektivované plochy zachycuje kořen s dobře viditelnou buněčnou strukturou.

Obrázek 10: Půdní výbrus zachycuje exkrementy členovců, póry, opad a fragmenty.

Obrázek 11: Půdní výbrus z rekultivované 29 let staré plochy zobrazuje exkrementy žížal, vlevo je zakomponovaný černý kousek uhlí, uprostřed je v něm vidět kousek opadu, dále jsou vidět póry.

Obrázek 12: Půdní výbrus z rekultivované 29 let staré plochy zachycuje exkrementy žížal s vlevo zakomponovanou tmavou minerální částí.

Obrázek 13: Půdní výbrus z rekultivované 33 let staré plochy zobrazuje exkrementy žížal, póry, vpravo rozpadající se minerální část.

Obrázek 14: Půdní výbrus z 50 let staré rekultivované plochy zachycuje exkrementy žížal, vlevo kořen, uprostřed fragment opadu.

1 Úvod

Ve své bakalářské práci jsem se věnovala knize Charlese Darwina *Formation of Vegetable Mould through the Action of Worms, with Observations on their Habits*. Zabývala jsem se jejími ohlasy od doby, kdy kniha roku 1881 vyšla, až do současnosti. Darwinova práce zdůraznila důležitost žížal při rozkladných procesech a při promíchávání půdy. Dříve se předpokládalo, že žížaly rostlinám ubližují (Crossley, 1985). Publikace z oblasti ekologie, pedologie, hydrologie, geomorfologie a dokonce i archeologie dnes Darwinovu knihu citují jako původní zdroj (Meysman a kol., 2006). V poslední době však mezi ohlasy na Darwinovo dílo rostou práce zabývající se vlivem žížal na bioturbaci a formování půdy. Ještě v 70. letech byl význam bioturbace zlehčován, případně zcela ignorován (Grave a Kealhofer, 1999). Christy (1884) vyzdvihuje Darwinovu tezi o významu zdánlivě malých a nedůležitých efektů v dlouhém období. Dle Johnsona (2002) práce Charlese Darwina *Formation of Vegetable Mould* ovlivnila mnoho dřívějších vědců, kteří ukázali, jak půdní biota mechanicky vytváří nové vrstvy a půdní horizont. Vyzdvihla činnost žížal v půdě a při tvorbě humusu, ovlivnění úrodnosti půdy, geologické procesy, pohřbívání archeologických památek (Brown a kol., 2003).

V diplomové práci jsem se více zaměřila na vliv žížal a ostatních půdních živočichů na půdu při jejím vývoji prostřednictvím půdních výbrusů, kde se vyskytují také exkrementy žížal. Pro tuto studii jsem si vybrala chronosekvence rekultivovaných a nerektivovaných ploch v okolí Sokolova, kde dochází k intenzivnímu vývoji půd. Je odtud také k dispozici starší práce Frouz a kol. (2007b) zabývající se půdními výbrusy s možností časového srovnání.

2 Cíle práce a hypotézy

- 1) Posoudit dynamiku vývoje zkoumaných ploch metodou chronosekvence. Porovnat rozdělení půdních komponent v závislosti na hloubce u rekultivovaných ploch a u ploch ponechaných spontánní sukcesi zcela bez rekultivace.
- 2) Porovnat podíl struktur ve vrchních vrstvách půdního profilu u stejných ploch s o 10 let staršími daty (Frouz a kol., 2007b).

Hypotézy: Předpokládáme, že se v hlubších vrstvách mladších ploch bude nacházet nejvíce minerálních částí. U starších ploch bude vyšší množství organických komponent v půdě, nejdříve v opadu, později v exkrementech. Předpokládáme, že vyšší množství exkrementů žížal bude u starších ploch, kde jejich působením bude půda více promíchaná.

3 Literární přehled

3.1 Hnědé uhlí a vliv jeho těžby na životní prostředí

Hnědé uhlí je obrovským bohatstvím a zároveň prokletím (Vavroušek, 1994). Existence lidí je závislá na přírodních zdrojích a hnědé uhlí je nyní využíváno především jako zdroj tepla a elektrické energie. Převaha využívání domácích fosilních paliv poskytuje jistou míru energetické bezpečnosti a nezávislosti. Jeho těžba a zpracování jsou však provázeny negativními vlivy na životní prostředí (Mertl a kol., 2013; Starý a kol., 2013; Štýs a kol., 1981).

Těžbou uhlí je deformována krajina, zpracovatelská část zatěžuje životní prostředí emisemi znečišťujících látek vypouštěných do ovzduší a do vody (Frouz a kol., 2007c). V Sokolovské pánvi je vysoké riziko kontaminace povrchových vod důlními vodami, infiltráty z hald a úpravami, riziko kontaminace podzemních vod, riziko změn režimu podzemních vod, riziko ohrožení zdrojů minerálních vod. Došlo zde také ke změnám reliéfu těžbou a haldami, v důsledku toho se změnila říční síť. Bylo ohroženo biocentrum ekologické stability krajiny (Reichmann a kol., 1992). Povrchová těžba ovlivňuje biosféru znehodnocením stanoviště, či přímo destrukcí společenstev rostlin, živočichů a mikroorganismů (Štýs, 1981).

Na Sokolovsku je mimořádné ohrožení hlukem. Také hrozí nebezpečí z poddolování. Těžbou, dopravou a úpravou dochází k zatížení prachovými emisemi (Reichmann a kol., 1992). Od šedesátých let jsou v provozu zařízení zpracovatelské části: sušárna, briketárna, úprava uhlí, tlakové zplyňování uhlí včetně čištění vyrobeného surového plynu (Frouz a kol., 2007c). Velká část vytěženého uhlí se spotřebovávala na místě, především v elektrárnách, které

nebyly vybaveny účinným zařízením na zachycování sloučenin síry, dusíku, arzenu, těžkých kovů a radioaktivních prvků obsažených ve spalinách a popelu (Vavroušek, 1994). Od osmdesátých let bylo provedeno několik opatření ke snížení vypouštěných emisí do ovzduší a vody, např. byla vybudována čistírna odpadních vod, úpravna důlních vod, odsíření komínů (Frouz a kol., 2007c).

V minulosti bylo dobývání uhlí a zakládání skrývky v Sokolovské pánvi rozptýleno do velkého počtu menších povrchových a hlubinných dolů a do převážně vnějších výsypek (Pešek a kol., 2010). Hlubinné dobývání umožňovalo využít jen část zásob, asi 45 % (Vavroušek, 1994).

Těžba uhlí si vynutila mnohé přeložky silnic, železničních tratí a likvidaci sídel. Současné soustředění těžby do dvou velkolomů Jiří a Družba v centrální části pánve má pozitivní vliv na stupeň využití zásob uhlí, na ekonomiku těžby a na rozlohu devastované krajiny i dobu její expozice. Nejsou potřeba další přeložky komunikací. Dobývání při současných podmínkách nevyvolává spory o těžební limity vytěžitelných zásob (Pešek a kol., 2010).

Plocha, která má být rekultivována do doby plánovaného vytěžení zásob, tj. do roku 2036, je 6 039 ha. Z toho největší část zabírá plánovaná lesnická rekultivace 4 538 ha. Takovýto velký rozsah rekultivací je finančně náročný (Frouz a kol., 2007c).

Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s., je podle zákona č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství, ve znění pozdějších předpisů povinna platit úhradu z vydobytých nerostů na vyhrazených ložiskách nebo vyhrazených nerostů. Horní zákon dělí nerosty na vyhrazené a nevyhrazené. Vyhrazené nerosty jsou vyjmenovány v § 3 horního zákona, jejich ložiska jsou ve vlastnictví státu

bez ohledu na to, kdo je vlastníkem pozemku, pod nímž se nacházejí. Uhlí patří mezi vyhrazené nerosty. Úhrada je maximálně 10 % z tržní ceny vydobytých nerostů. Cena vychází z průměrné tržní ceny daného roku. Ze zaplacených peněz se 25 % převede do státního rozpočtu České republiky, ze kterého budou peníze použity k nápravě škod na životním prostředí, které byly způsobeny dobýváním výhradních i nevyhrazených ložisek (zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství /horní zákon/ ve znění pozdějších předpisů).

Rekultivace zahrnuje soubor opatření k aktivní ochraně a tvorbě území postižených těžbou nerostných surovin (Štýs, 1981). Podle Bielecké a Król-Korzakové (2010) je mnoho faktorů, které jsou při rekultivaci třeba zohlednit např. směr rekultivace a jeho ekonomické náklady, potřeby lidí, původní rostliny a živočichové, zda se jedná o povinnost rekultivaci provést.

V poslední době se stále více začínají prosazovat přírodě blízké způsoby obnovy na úkor donedávna převládajících technických rekultivací. Téměř každá ekologická obnova souvisí se sukcesí. Spoléhá se více na zcela spontánní, nebo jen mírně usměrněnou sukcesí. Snaží se ji urychlit, zpomalit či vrátit zpět (Prach, 2009a). Výsypky po těžbě hnědého uhlí jsou pokládány za velmi vhodné objekty pro studium sukcese, především kvůli jejich velkým rozměrům, přesnému datování stáří a relativně homogennímu substrátu (Prach, 1987).

3.2 Půda, půdní živočichové a bioturbace

Povrchovou těžbou dochází k degradaci a destrukci půdy (Štýs, 1981). Půdu považujeme za základní ekologický činitel pro zemědělství, lesnictví, průmysl, prostor pro rekreaci a jako místo na stavění domů (Brussaard, 1997).

Půdní struktura poukazuje na uspořádání půdních částic a spleť pórů. Záleží na kvalitě půdy, která ovlivňuje většinu fyzikálních, chemických a biologických procesů. Tyto procesy se odehrávají v přírodní i člověkem ovlivněné půdě, například přenos a uskladnění vody, plynů, živin a dalších látek, šíření tepla, růst kořenů, život mikroorganismů, rozklad a skladování organické hmoty. Záleží na celkových vlastnostech půdy. Jednotlivé části jsou různé ve velikosti, tvaru i v chemické povaze. Toto všechno ovlivňuje dynamické vlastnosti půdy, které odpovídají na mnoho vnitřních i vnějších podnětů, např. na vlhkost, teplotu, fluktuaci, biologickou aktivitu i na činnost člověka (Huang a kol., 2011).

Velké množství zemské biosféry žije v půdě. Půdní organismy nejsou jen jejími obyvateli, jsou její součástí. Mají velký vliv na vlastnosti půdy jako hydrologické poměry, provzdušnění, složení půdních plynů, jsou důležité pro rozklad organických zbytků a opadu. Jakkoliv rozsáhle byly půdy studovány pro jejich klasifikaci, fyzikální a chemické podmínky, tak naše znalost půdních živočichů značně zaostává (Brussaard, 1997).

Exkrementy půdních živočichů mají důležité mikromorfologické funkce. Ukazují na dřívější či současnou aktivitu půdní fauny a stav prostředí. Jsou různě velké, tvarované a mohou se lišit v drsnosti povrchu. Liší se také v barvě a ve vnitřním uspořádání. Mohou být oddělené, neporušené či v různých fázích rozpadu. Hlavní kritérium pro jejich určení je tvar. Může být rozlišováno mnoho typů

a v kombinaci s velikostí charakterizují určitou skupinu živočichů. Exkrementy jsou obvykle organické či organo-minerální, mohou být ale i minerální povahy (Bullock a kol., 1985). Exkrementy žížal jsou organo-minerální povahy. Žížaly jsou spolu s mravenci a termity pokládány za jedny z nejdůležitějších půdních inženýrů (Lavelle a kol., 1997).

Hlavně díky aktivitě žížal a některých dalších skupin půdních bezobratlých se vytvářejí strukturovanější a hlubší organické horizonty. Jejich činnost je podmíněna přísunem dobře rozložitelného, příznivého opadu, hlavně listí jívky. Mají tak k dispozici více živin. Z hlediska tvorby půdy jsou příznivé olšové a lipové výsadby, nejméně vhodné jsou výsadby jehličnanů, zvláště exotických (Řehounek a kol., 2010).

Při bioturbaci dochází k biologickému přepracování půdy a sedimentů, dochází k jejich promíchávání a přemísťování. Bioturbace zahrnuje aktivitu kořenících rostlin, vliv mikrobiální sféry a vliv hrabajících živočichů (Meysman a kol., 2006). Bioturbaci ovlivňují např. mravenci, žížaly, termiti, rypoši, syslové, jezevci, vlci, pytlonošové, tukotukové, taboni, vombati, hrabáči, pásovci, mravenečníci či sloni (Johnson, 2002). Více než pedologové rozvinuli myšlenku bioturbace půdní zoologové. Zabývali se zejména úlohou různých půdních organismů v bioturbaci a také detailněji úlohou žížal (Lavelle a kol., 1997). Rozlišujeme několik ekologických skupin žížal. Žížaly epigeické žijí v opadu, nebo ve vrchní vrstvě půdy. Využívají buď stávajících mezer, nebo budují chodby. Druhy žijící v opadu se na bioturbaci prakticky nepodílejí. Druhy žijící ve vrchní vrstvě půdy mohou hrát úlohu v zapracovávání opadu do vrchní vrstvy půdy. Druhy endogeické žijí v hlubších vrstvách půdy, budují zde síť chodeb a živí se částečně rozloženou organickou hmotou, mohou se podílet

na promíchávání půdy uvnitř nebo mezi minerálními horizonty. Nejvýznamnější pro bioturbaci pak jsou druhy anetické. Tyto druhy žijí v hlubších vrstvách půdy, zároveň však budují hluboké chodby. Živí se rostlinným opadem, který sbírají na povrchu půdy a zatahují jej do hlubších vrstev. V současnosti je koncept bioturbace zapracován do konceptu tzv. forem humusu, který je často používán půdními zoology, ekology a některými pedology (Lavelle a kol., 1997). Tento koncept popisuje formování vrchních vrstev půdy v temperátních ekosystémech v závislosti na kvalitě opadu a s tím související míře bioturbace. Rozlišujeme tři základní formy nadložního humusu: mor, moder a mull. Mor je charakteristický pro půdy s přísunem těžko rozložitelného opadu, typickým příkladem jsou jehličnaté lesy. Tyto půdy hostí jen malé množství půdní makrofauny, která se prakticky nepodílí na bioturbaci. Dekompozice se tak odehrává zejména za účasti půdních hub a půdní makrofauny a organická hmota se hromadí na povrchu půdy. Naopak mull je charakteristický pro půdy zásobené dobře se rozkládajícím opadem, typicky se jedná o stepní ekosystémy. Tyto půdy hostí velké množství makrofauny, zejména endogeických druhů žížal, které zamíchávají takřka veškerý opad do půdy, takže většina půdní organické hmoty se nachází v organominerálním A horizontu. Vynikají tak hluboké půdy s velkou zásobou uhlíku. Mezistupněm mezi těmito extrémy je moder typický pro listnaté lesy. Zde se na bioturbaci podílejí kromě žížal další zástupci půdní makrofauny, zejména mnohonožky, larvy dipter a někteří další členovci (Lavelle a kol., 1997). Na významnějším rozmachu studia bioturbace se nemalou měrou podílelo rozšíření metodiky půdních výbrusů pro sledování distribuce biogenních struktur v půdním profilu (Frouz a kol., 2007b). Některé recentní práce poukazují na spojitost mezi bioturbací a akumulací půdní organické hmoty v půdě, zdá se, že vyšší intenzita

bioturbace je pozitivně korelována s větším hromaděním uhlíku v půdě (Frouz a kol., 2009).

Podle Wilkinsona a Humpreyho (2005) přinesl nový impuls při studiu bioturbace výzkum pedogeneze pomocí metod *terrestrial in situ cosmogenic nuclides* (TCN) a opticky stimulované luminiscence (OSL). TCN a OSL jsou datovací techniky, vhodné k otestování základních hypotéz pedologie. Pomocí metody TCN zkoumající změnu atomárních struktur je možné stanovit, jak dlouho byl minerál vystaven vesmírnému záření. Metoda TCN umožňuje odvození rychlosti tvorby půdy ze skalního podkladu (bedrock) a zvětralinové pokrývky (saprolit). OSL datování zase umožňuje určit dobu, která uplynula od okamžiku, kdy byla zrnka nerostů například křemenu a živce, naposledy vystavena slunečnímu záření. Pokud je mocnost půdy v čase stálá, rychlost tvorby půdy se rovná rychlosti, jakou eroze půdu odnáší. Rychlost tvorby půdy je tedy důležitá pro stanovení udržitelné míry eroze. Metoda TCN umožňuje srovnání skutečné rychlosti tvorby půdy se stávajícími modely. Vliv bioturbátorů na erozi může být různý, někteří ji napomáhají, někteří ji snižují (Blanchart a kol., 2004). Konverze skalního podkladu a saprolitu na půdu závisí na mocnosti pokrývky, která je nad ním. Zatím nebylo jednoznačně prokázáno, zda je tvorba půdy maximalizována při určité půdní pokrývce či při její absenci. Obecně se předpokládá, že tvorba půdy je ze saprolitu, s růstem hloubky exponenciálně klesá. V případě tvorby půdy ze skalního podkladu je rychlost nejvyšší při určité nenulové půdní pokrývce. Odhad vlivu flóry, fauny a procesů jako mrznutí-tání, které promíchávají půdní překryv do hloubky, byly dříve omezené. Pomáhá ho kvantifikovat metoda datování pomocí opticky stimulované luminiscence (OSL). Vypadá to, že bioturbace je převažující pedogenický proces, ale výjimkou jsou oblasti, kde převažuje vliv

mrznutí a tání. Přestože bioturbace převažuje nad produkcí půdy, nemusí vždy vést k homogenizaci. Přetváření saprolitu na půdu a jeho kvantifikace jsou důležité pro stanovení udržitelné míry eroze, kde je odnos půdy urychlován nadměrným spásáním a odlesňováním a ohrožuje produktivitu. Když je eroze rychlejší než tvorba půdy, tak se tloušťka zmenšuje a výsledkem může být odhalení skalního podkladu. Již v roce 1877 byla vyslovena hypotéza, podle které je tvorba půdy největší pod tenkou vrstvou pokrývky. Anderson (2002) zkoumal, jak led napomáhá rozrušování matečné horniny na alpinských svazích na západě USA. Rozrušování ledem má malý efekt, když je podklad holý. Ale postupně se zvyšuje s růstem tloušťky půdního pokryvu nad ním. Maxima dosahuje při dvaceti centimetrech půdního pokryvu. Pokud vrstva dále narůstá, pak vliv exponenciálně klesá. Při dvoumetrové tloušťce půdy už je efekt téměř nulový. Vliv bioturbace je obtížné kvantifikovat, ale podle předběžných odhadů je její role velice důležitá. Pomocí metody OSL můžeme kvantifikovat dlouhodobé vertikální promíchávání. TCN testovali v oblastech, kde je konstantní tloušťka půdy a rychlost/míra přeměny horniny v půdu stejná jako míra denudace (Wilkinson a Humpreys, 2005). Denudace je souhrn pochodů vedoucích k celkovému snížení zemského povrchu (tj. zvětrávání, eroze a odnos) (Petránek, 1993). Wilkinson a Humpreys (2005) došli k závěru, že za milion let se vytvoří 1–250 metrů půdy, kdy většina oblastí ze vzorku byla v intervalu 10–100 metrů za milion let. Tyto nové studie potvrzují Darwinovu původní myšlenku, že bioturbace půdy může být významnou silou, která ovlivňuje formování půd a řadu dalších souvisejících procesů (koloběh živin, erozi) na různých velikostních škálách.

3.3 Půdní výbrusy a jejich historie

Vědci dlouho přemýšleli, jak pozorovat a studovat jemnější strukturu půdy. Zkoumání organických složek půdy pod mikroskopem vedlo Kubiěnu (používal i tvar příjmení Kubiena) k vytvoření vlastní metody k vytváření půdních výbrusů. Koncem 30. let 20. století se podařilo Kubiěnovi použít ke studiu půdní mikrostruktury podobnou techniku, jakou měli geologové při studiu hornin. Půdní výbrusy jsou obdobou výbrusů hornin. Půda je proti horninám málo soudržná, nedá se řezat diamantovými nástroji ani brousit do tenkých průhledných výbrusů. Tento problém se podařilo vyřešit Kubiěnovi tím, že napojil vysušenou půdu zředěným kanadským balzámem a vzorek v laboratorních píckách vysoušel, až ztvrdl do tuhé pryskyřice (Rusek, 2006; Rusek, 2008; Stoops, 2009).

V roce 1938 vydal Kubiěna knihu *Micropedology*. Byla první příručkou pro mikroskopické studium půdy. Lze ji pokládat za počátek nové vědecké disciplíny. Do té doby vyšlo několik studií o půdních výbrusech, včetně několika od Kubiěny, jež zatím byly pokládány za izolované pokusy. Inovativní přístup knihy *Micropedology* byl v jejích myšlenkách. Přístup ke studiu půdy jako celku byl nový (Mückenhausen, 1967; Stoops, 2009).

Knihy *Micropedology* se skládá ze čtyř částí. První část pojednává o principech mikropedologie, využití a vývoji mikroskopických technik v dalších přírodních vědách. Druhá část pojednává o technikách mikropedologie. Dozvíme se o mikroskopování, o mikrochemických metodách, odběru půdy pro přípravu vzorků, o přípravě půdních výbrusů. Pojednává se tu také o historii, Kubiěna nebyl jediný, kdo se o přípravu pokoušel. První pokusy uskutečnili v Paříži v roce 1904 Delage a Lagatu. Jejich výbrusy však neměly zachovanou původní strukturu.

Rozdrcenou půdu smíchali s vytvrzovací látkou a směs potom vyschla. Ross z Washingtonu v roce 1923 popsal metodu pro úspěšné vytvoření výbrusu z drobného materiálu bez porušení struktury. Časopisy píšící o této metodě nebyly ve Vídni k dispozici a proto Rossem popsanou metodu Kubiěna neznal. Při samostatné práci Kubiěna vymyslel metodu podobnou Rossově. Ross zkoušel výbrus z písku, tufů, arkóz, půdy, jílu a břidlice. Zkoušel různé zpevňující substance. Například bakelit a kanadský balzám se zdál nejslibnější, ale později byl objeven kollolith, který byl snadněji aplikovatelný (Kubiěna, 1938) a podle Shorta (1931) podobný kanadskému balzámu. Kollolith vyráběla firma Voigt & Hochgesang z německého Göttingenu. Svou přesnou metodu výroby půdního výbrusu Kubiěna popisuje na několika stranách. Ve třetí části knihy se věnuje látkám obsaženým v půdě. Čtvrtá část se věnuje biologickým aspektům, např. půdní mikroflóře a mikrofauně pozorované přímo pod mikroskopem, mikrohabitatů a mikroklimatu (Kubiěna 1938).

Pro půdní výbrusy lze využít stereologický přístup. Stereologie pojednává o třídimenzionální interpretaci dvojdimenzionálního průřezu. Vertikální výbrus je kolmý výbrus k dané horizontální rovině, kde horizontální je myšlena pouze poloha vůči řezu. Plocha na jednotku objemu zakřivené plochy v prostoru může být statisticky odhadnuta umístěním lineární sondy náhodně v prostoru a spočítáním počtu průsečíků mezi povrchem a vedením sondy. Základní stereologický vztah je $S_v=2I_L$, kde S_v je plocha na jednotku objemu, I_L je průměrný počet průsečíků na jednotku délky zkušební linky (Baddeley a kol., 1986).

Půdní výbrusy se v poslední době využívají ve více studiích, např. při studiu pórů, které ovlivňují hydrologické vlastnosti půdy (Elyeznasni a kol., 2012; Fener a Yesiller, 2013; Felde a kol., 2014; Gerke a kol., 2012). Při studiu pórů je možné využít snímání půdních výbrusů pomocí počítačové tomografie (Elyeznasni a kol., 2012). Srivastava a Sauer (2014) využili půdní výbrusy pro studium mikromorfologie půdy v podhůří Himálají. Castellanos-Navarrete a kol. (2012) využili půdní výbrusy pro porovnání vlivu dvou zemědělských postupů na kvalitu půdy ve středním Mexiku. Zaměřili se na vliv žízále na půdní strukturu. Počáteční vývoj půdy prostřednictvím půdních výbrusů na alkalických půdách po těžbě kovů ve Španělsku zkoumali Arocena a kol. (2010).

4 Metodika

4.1 Popis zájmového území

Vzorky byly odebrány v říjnu roku 2008 na Sokolovsku na Velké podkrušnohorské výsypce, která se nachází mezi obcemi Sokolov a Vintířov.

Sokolovská pánev je terestrická terciérní pánev s vrásově zlomovou stavbou. Je to příčně asymetrický příkop, který je oboustranně tektonicky ohraničený, stupňovitý, protažený směrem ZJZ–VSV. Pánev má délku 36 km, šířku 9 km a rozlohu 312 km². Tradičně se zde těží hnědé uhlí, kaolín a jíl. Rozsáhlá povrchová těžba hnědé uhlí a zakládání výsypek zásadně změnila území o rozloze asi 115 km². V Sokolovské pánvi je vidět mimořádný antropogenní vliv na krajinu. Významným krajinotvorným fenoménem jsou zde výsypky. Reliéf pánve se změnil z ploché až členité pahorkatiny na plochou až členitou vrchovinu. Těžba postihla všechny komponenty a funkce krajiny. Ovlivnila hydrosféru, atmosféru, litosféru, pedosféru a v neposlední řadě společenstva rostlin a živočichů (Mertl a kol., 2013; Pešek a kol., 2010; Reichmann a kol., 1992; Rojík, 2004; Řehounek a kol., 2010; Skaloš a kol., 2014; Štýs, 1981).

Velká podkrušnohorská výsypka je rozsáhlá výsypka tvořená dílčími výsypkami s průměrnou roční teplotou 6,5 °C. Vegetace na této lokalitě je tvořena mosaikovým uspořádáním rekultivovaných a nerektivovaných ploch různého stáří. Studované výsypky se skládají z neogenních jílu cyprisové série (Abakumov, Frouz 2009; Frouz a kol., 2008). Cyprisové souvrství kryje uhelné sloje, jeho název je podle korýše *Cypris angusta*. Petrograficky ho lze charakterizovat jako materiál s převahou kaolinitu, slídy, uhličitanů

a montmorillonitu (Aldorf, 1995). Cyprisové formace odrážejí epochu miocénu (Rojík, 2004).

Díky složení substrátu lze provádět některé rekultivace přímo. Rekultivované plochy byly srovnané a zalesněné kombinací stromů olše lepkavá (*Alnus glutinosa*) a olše šedá (*Alnus incana*) zhruba po 5 letech od nasypání. Na nejmladších místech byly početné trávy, především plevel třtina křovištní (*Calamagrostis epigeios*). Na starší ploše s výsadbou stromů jejich zápoj způsobil omezení výskytu bylinného pokryvu. Na rekultivované plochy nebyla přidána žádná další semena ani půda (Frouz a kol., 2007a).

Při metodě chronosekvence se sledují různě stará sukcesní stadia ve stejné době na jedné lokalitě. Předpokládá se, že zachytíme zhruba stejný vývoj jako při studiu vývoje daného území v čase. Studium stavu humusu různě starých výsypek je zajímavé z pohledu genetické a evoluční půdní vědy. Velmi zajímavé je studium pedogeneze dvou chronosekvencí na různě starých výsypkách se stejným substrátem. Pokud je jedna z těchto chronosekvencí rekultivovaná a druhá nerekulivovaná, umožňuje to odhalit roli rekultivace při urychlení akumulace humusu (Abakumov, Frouz, 2009).

4.2 Odběr a zpracování vzorků

Odběr půdy na půdní výbrusy byl proveden z rekultivovaných a nerektivovaných ploch různého stáří (tabulka 1). Rekultivované plochy jsou v této práci označeny R1, R2, R3, R4. Nerektivované N1, N2.

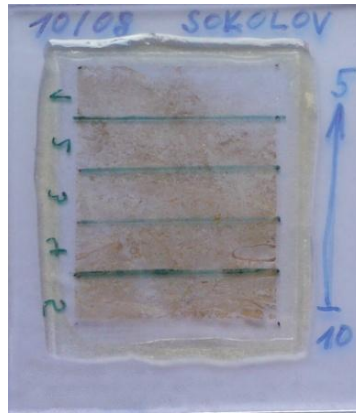
Tabulka 1: Přehled nerektivovaných a rekultivovaných ploch, kde byly odebrány vzorky.

název plochy	rok nasypání	management území
N1	1983	plocha byla ponechána zcela bez rekultivace, zarostla spontánní vegetací
N2	1975	plocha byla ponechána zcela bez rekultivace, zarostla spontánní vegetací
R1	1983	plocha byla zalesněna výsadbou olše
R2	1979	plocha byla zalesněna výsadbou olše
R3	1975	plocha byla zalesněna výsadbou olše
R4	1958	plocha byla zalesněna výsadbou olše

Metodika byla stejná jako v práci Frouze a kol. (2007b). Byl proveden odběr monolitů neboli vzorků půdy ve tvaru hranolu 5 x 5 cm z hloubky 0–10 cm odebraných z půdního profilu tak, aby si zachovaly celistvost a všechny význačné a neporušené znaky dané půdy. Vzorky půdy se k výbrusům pro studium půdního profilu odebírají do kovových rámečků s oboustrannými víčky. V laboratoři se odvíčkované nechají pomalu vyschnout. Asi po měsíci se přenesou suchý vzorek do nádobek ze silnější hliníkové fólie a ve vakuu se zalije zředěným monomerním polyesterové pryskyřice bez přísady tvrdidla a urychlovače. Při laboratorní teplotě probíhá pomalá polymerace, která trvá přibližně měsíc. Vzorek je poté ztvrdlý jako hornina, a je dále zpracováván na diamantové pile na menší bločky. Brousí se na přesné kotoučové brusce na 15–25 μm (Rusek, 2006; Rusek, 2008). Byly tak vytvořeny vertikálně orientované půdní výbrusy o velikosti 5 cm (reprezentující hloubku) x 3,8 cm. Následně byl vytvořen půdní výbrus

umožňující studium půdního profilu pod mikroskopem. Ze spodní strany byly výbrusy umístěny na podložní sklo a překryty tenkým krycím sklem. Půdní výbrusy byly pod mikroskopem pozorovány pod různým zvětšením.

Ze šesti lokalit bylo vytvořeno dvanáct půdních výbrusů (obr. 1). Z každé lokality byly dva vzorky, jeden reprezentující hloubku 0–5 cm a druhý 5–10 cm. Každý půdní výbrus byl rozdělen na pět pruhů o šířce jeden centimetr, který reprezentuje jeden centimetr hloubky půdy, tedy od povrchu půdy do hloubky 1 cm, od hloubky 1 cm do hloubky 2 cm, ..., až do hloubky 10 cm. Pro každý centimetr bylo náhodně pomocí vertikálního a horizontálního pohybu mikroskopu určeno 500 bodů. Byl použit okulár s křížkem uprostřed optického pole. Při každém posunu byl zaznamenán průsečík jednotlivých struktur při zvětšení 240x na mikroskopu Carl Zeiss Jena. Podíl jednotlivých zachycených struktur předpokládá, že je úměrný oblasti těchto struktur ve vzorku, v konkrétní půdní vrstvě. Byly rozlišovány následující půdní struktury: póry, opad, kořeny, minerální část, exkrementy žížal, exkrementy členovců. Mezi exkrementy členovců patřily např. exkrementy mnohonožek (*Diplopoda*), chvostoskoků (*Collembola*) či larev dvoukřídlých (*Diptera*). Mezi kořeny patřily kořeny živých i odumřelých rostlin, v případě, že byl kořen již více rozpadlý, byl řazen do kategorie fragmenty. Do kategorie opadu a fragmentů patří např. listy, jehličí, větvičky, kůra, semena, šišky, trávy, houby, květy, pupeny, živočišné zbytky.



Obrázek 1: Půdní výbrus reprezentující hloubku 5–10 cm z nerektivované plochy z Velké podkrušnohorské výsypky, výbrus je rozdělen na 5 pruhů o šířce 1 cm, každý z nich reprezentuje 1 cm hloubky půdy.

4.3 Statistické zpracování dat

4.3.1 Porovnání rozdílnosti v rozdělení půdní struktury

Pro testování rozdílnosti v rozdělení půdní struktury (minerální část, kořeny, opad a fragmenty, exkrementy členovců, exkrementy žížal, póry) byl použit chí-kvadrát test v kontingenční tabulce. Metoda testuje nulovou hypotézu, že mezi řádky (hloubka 0–5 cm a 5–10 cm) a sloupce (stáří, přítomnost rekultivace) není významná závislost, oproti alternativní hypotéze, že řádky a sloupce jsou závislé. Je-li hodnota signifikance p menší než 0,05, hovoříme o statisticky významné závislosti. Půdní struktura v závislosti na hloubce a stáří se tedy z hlediska rozdělení do skupin statisticky významně liší. Výpočty byly provedeny ve statistickém programu R. V textu uvádím vypočítanou p -hodnotu. Pokud byla hodnota nižší než $2,2 \cdot 10^{-16}$, program R uvádí p -hodnotu $< 2,2e^{-16}$. Porovnání pomocí chí-kvadrát testu bylo použito také v práci Frouze a kol. (2007b).

4.3.2 Konfidenční interval spolehlivosti

Pro intervalový odhad četnosti zastoupení jednotlivých struktur ve vzorcích byly použity 95% intervaly spolehlivosti pro Poissonovo rozdělení, které byly vypočteny podle vzorce

$$\left(p - 1,96\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}; p + 1,96\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \right), \text{ kde}$$

p = procentuální zastoupení dané struktury, n = počet měření, 1,96 = tabulková hodnota 95% kvantilu normálního rozdělení. Pokud se intervaly spolehlivosti u obou srovnávaných vzorků navzájem liší, považujeme oba vzorky z hlediska výskytu dané struktury za odlišné.

Spočítala jsem intervaly spolehlivosti pro mé výsledky z roku 2008 a také pro výsledky z roku 1998 (Frouz a kol., 2007b).

1) Intervaly spolehlivosti jsem spočítala pro všechna porovnávaná data, pro každý komponent v každém centimetru. Překrývající se intervaly spolehlivosti jsem vyznačila pomocí šrafování do porovnávaných grafů.

2) Spočítala jsem intervaly spolehlivosti po 5 centimetrech, tedy pro každý půdní výbrus 0–5 cm a 5–10 cm. Intervaly jsem spočítala pro každý komponent, pro všechna porovnávaná data. Vypočtené intervaly spolehlivosti jsem uvedla v tabulce 2.

5 Výsledky

5.1 Popis hlavních půdních struktur

Z minerálních částí jsem pozorovala především u mladších ploch ve větší hloubce jíl s lamelární strukturou. Nacházela jsem minerální části, které měly dobře ohraničený tvar (obr. 2). U všech ploch jsem pozorovala rozpadající se minerální části (obr. 3). U mladších ploch se nacházely blíže u povrchu, u starších rekultivovaných ploch jsem je ve větším množství pozorovala až do hloubky 10 cm. Ve vzorcích jsem nacházela kousky uhlí a zrnka pyritu, pozorovala jsem minerální části v různých barvách např. černé (obr. 4) a nahnědlé (obr. 5, 6).

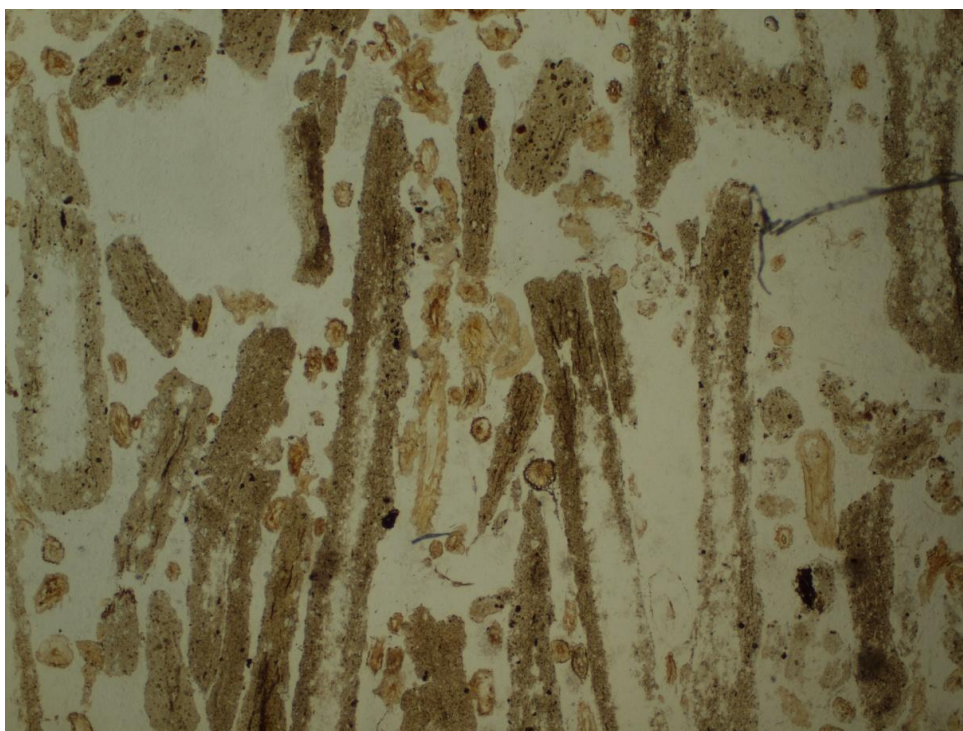
Z opadu a fragmentů jsem nejčastěji pozorovala listový opad a u starších ploch také dřevnatý opad. Příklad dobře viditelného nezpracovaného opadu je na obrázku 7, příklad fragmentu je na obrázku 8. Velké množství nezpracovaného opadu se nacházelo na starší nerekultivované ploše.

Kořeny jsem pozorovala v různé velikosti a tvaru, např. podlouhlé (obr. 3), kulaté, oválné a také různě nepravidelné (obr. 2). Na obrázku 9 se nachází největší kořen, který ve vzorcích byl. Obvykle se ve vzorcích nacházely kořeny mnohem menších rozměrů (obr. 2, 7).

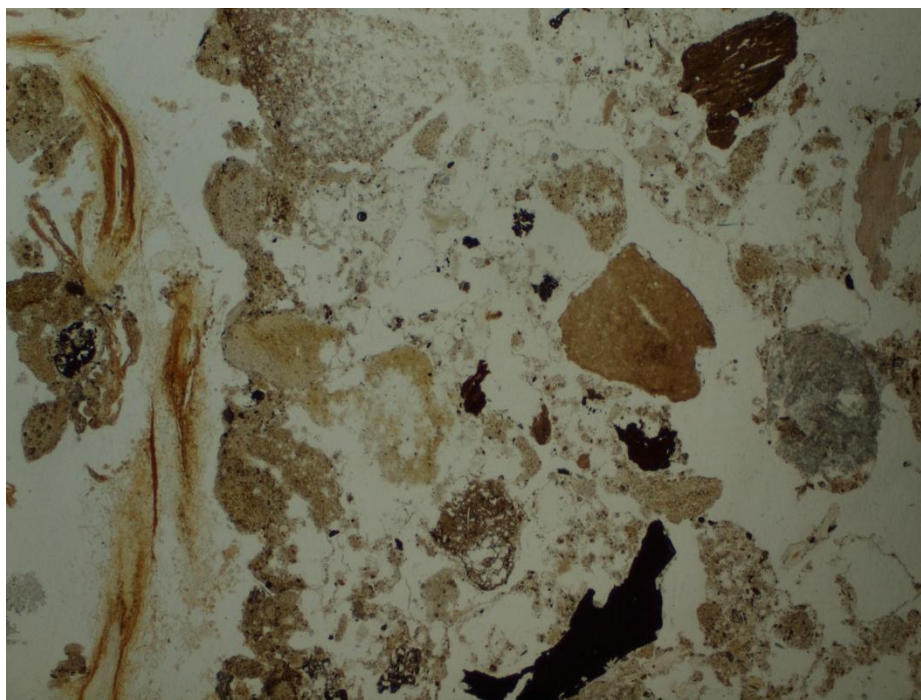
Exkrementy členovců se ve vzorcích nacházely v různých tvarech a velikostech (obr. 10), např. mezi listovým opadem jako drobné útvary nepravidelného tvaru. Především ve vzorku na starší nerekultivované ploše N2 se jich často nacházelo větší množství na jednom místě, v tomto vzorku jsem zároveň pozorovala celkově nejvyšší podíl exkrementů členovců.

Exkrementy žížal jsem pozorovala v různé velikosti. Nacházela jsem v nich zakomponované kousky minerálních částí a opadu (obr. 11, 12, 13, 14), který byl více či méně zpracovaný. Exkrementy žížal jsem nacházela dobře ohraničené, ale především ve starších rekultivovaných vzorcích se některé rozpadaly.

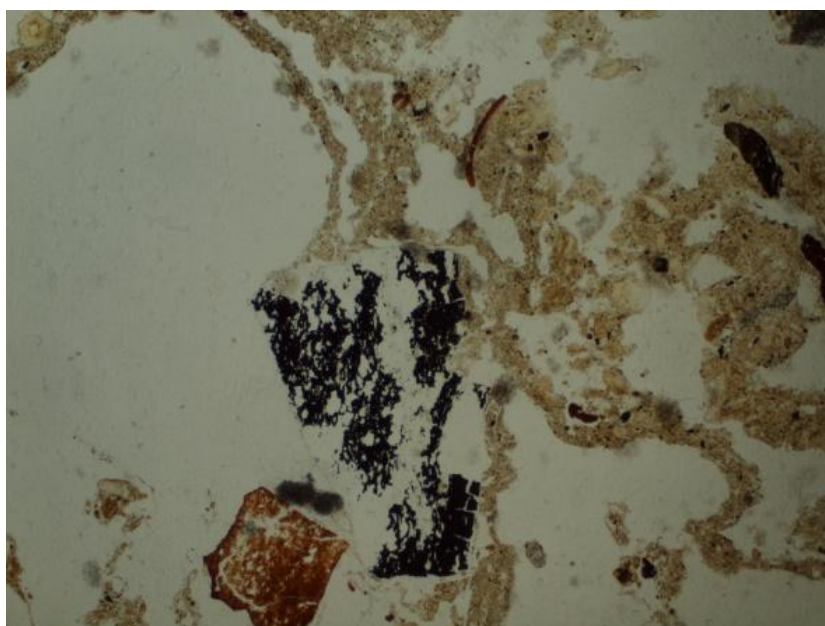
Póry se jako jediné nacházely v každém centimetrovém pruhu všech vzorků. Jejich tvar je dán tvarem ostatních částí. U mladých ploch nebo ve větších hloubkách, kde převládalo lamelovité uspořádání materiálu, mění i póry tvar výrazně prostorově orientovaných listovitých struktur (obr. 6). U starších ploch převládají sférické agregáty a i póry mají tvar spojených prostor s konkávními či konvexními stěnami orientovanými víceméně náhodně v prostoru (obr. 11 a 12).



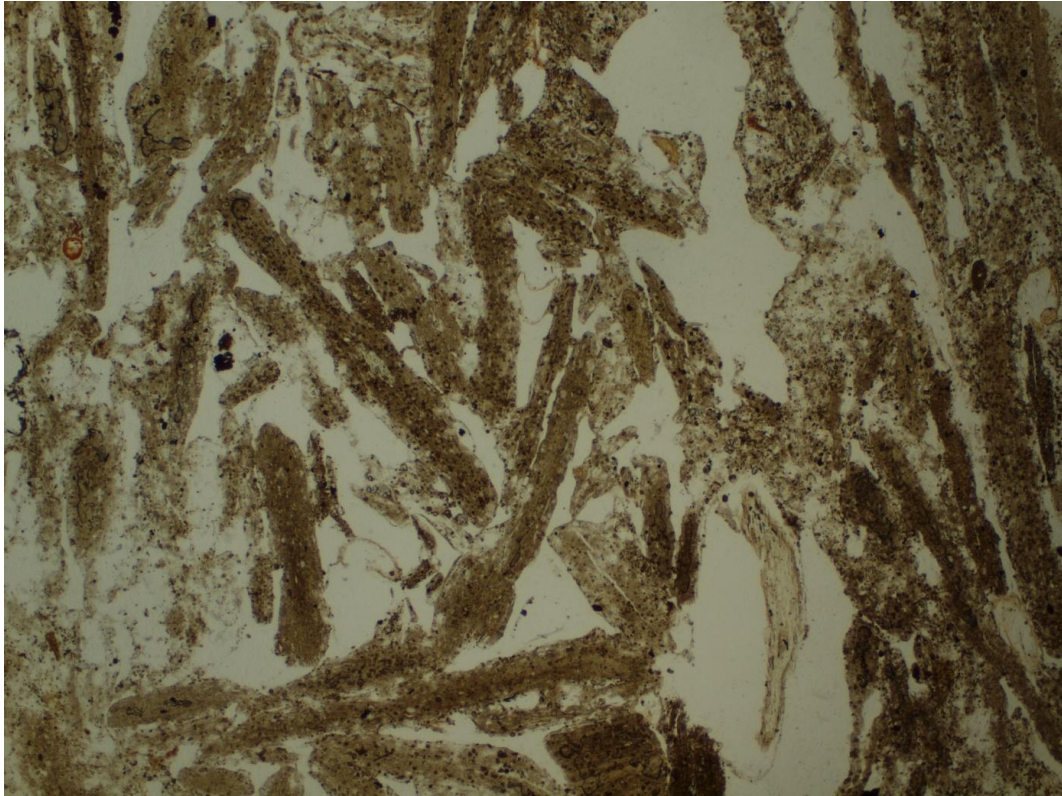
Obrázek 2: Půdní výbrus z nerektivované 33 let staré plochy zachycuje podlouhlé minerální části, mezi nimi kořeny.



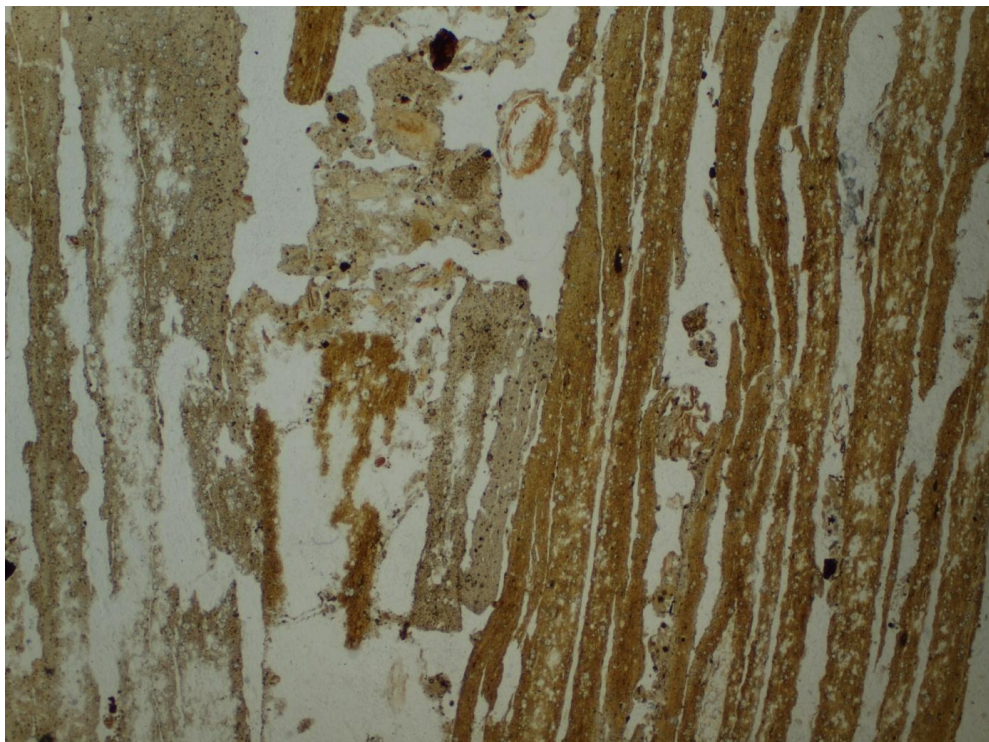
Obrázek 3: Půdní výbrus z rekultivované 25 let staré plochy zachycuje minerální část, vlevo jsou vidět podlouhlé kořeny.



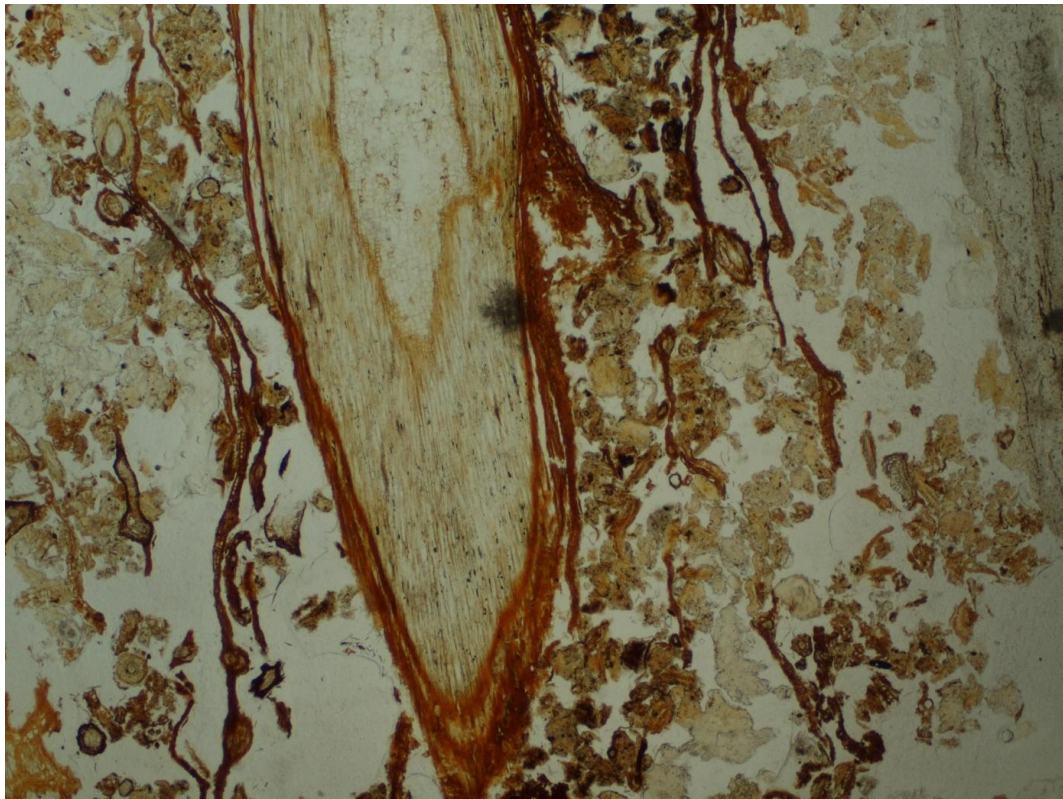
Obrázek 4: Půdní výbrus z rekultivované 33 let staré plochy zachycuje tmavé kousky uhlí, různé nepravidelné exkrementy žížal se zakomponovanými kousky opadu a minerálních částí.



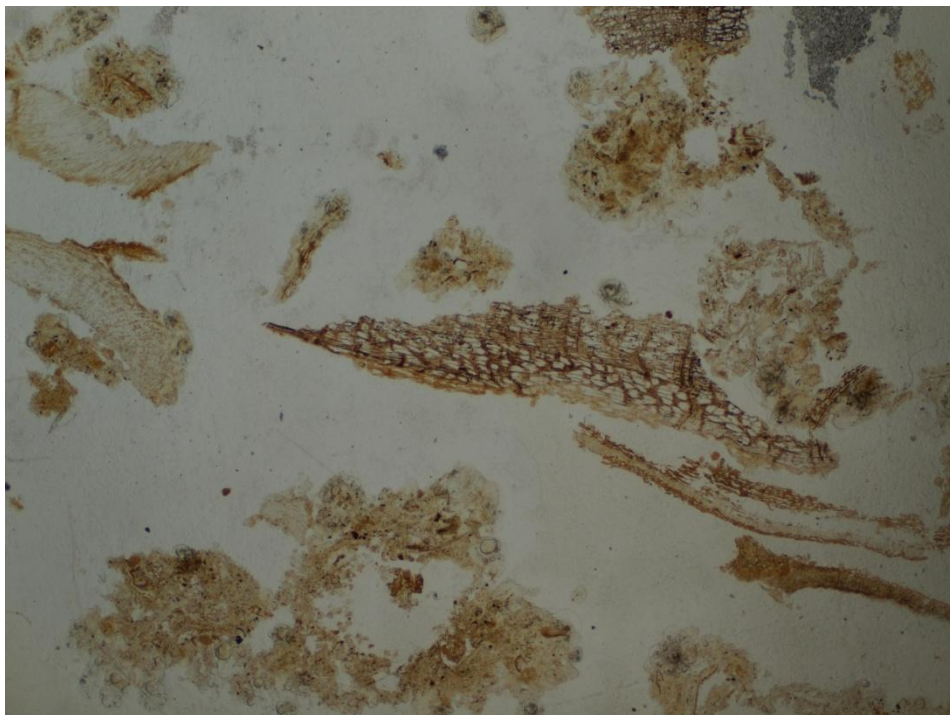
Obrázek 5: Půdní výbrus z 25 let staré nerektivované plochy zachycuje minerální část, póry, ve spodní části vpravo najdeme kořen.



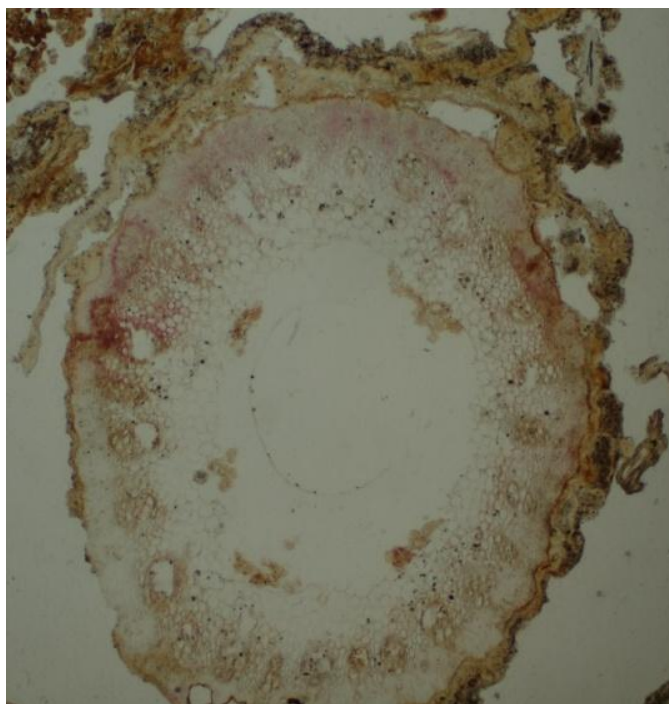
Obrázek 6: Půdní výbrus z rektivované 25 let staré plochy zachycuje minerální část. Uspořádání vpravo a vlevo ve vzorku jsou typická pro tuto plochu i pro stejně starou nerektivovanou plochu.



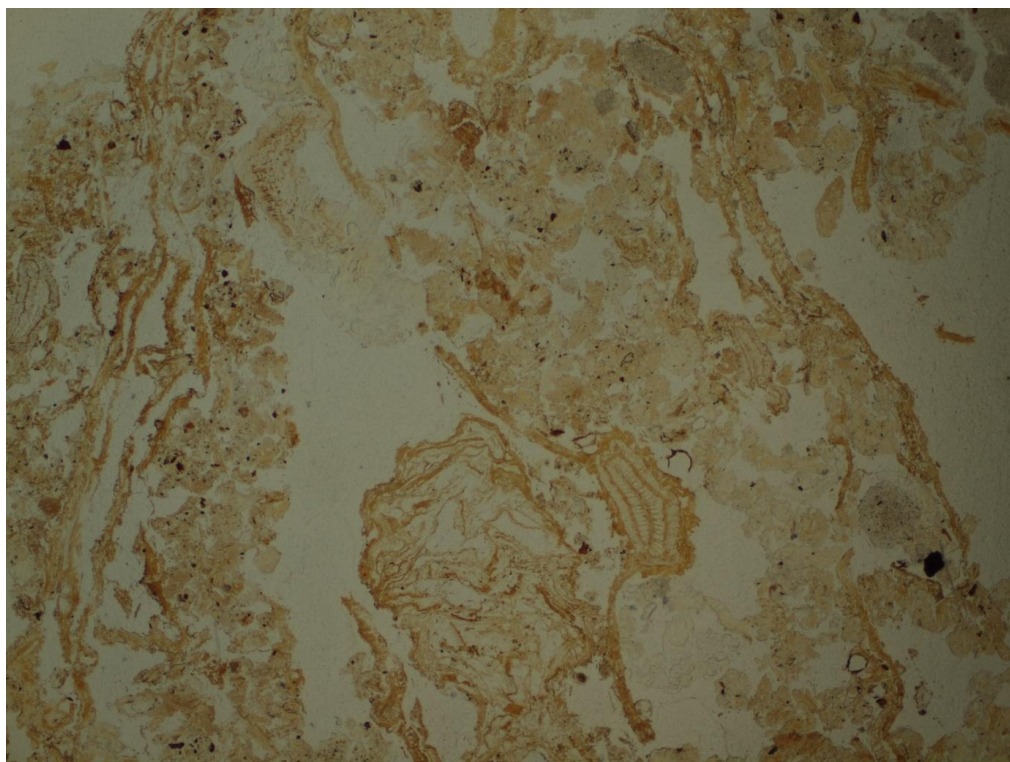
Obrázek 7: Půdnímu výbrusu dominuje velký opad, dále je na něm drobnější opad, exkrementy členovců, kořeny a póry.



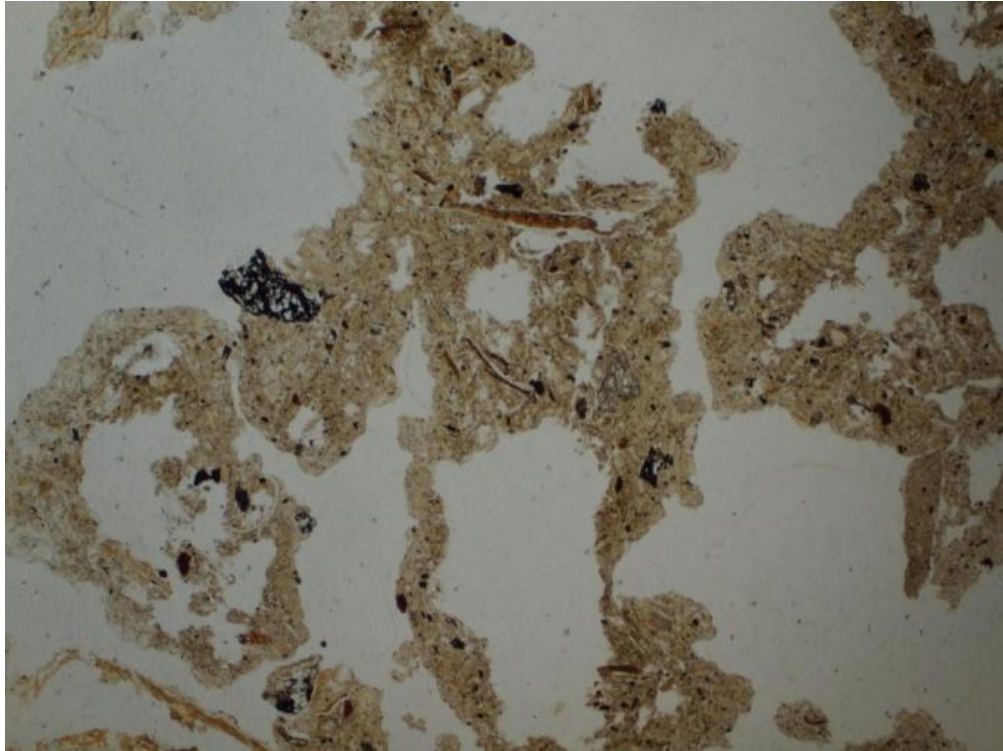
Obrázek 8: Půdní výbrus z rekultivované 50 let staré plochy zachycuje v dolní části exkrement žížaly, vlevo kořen, uprostřed fragment opadu.



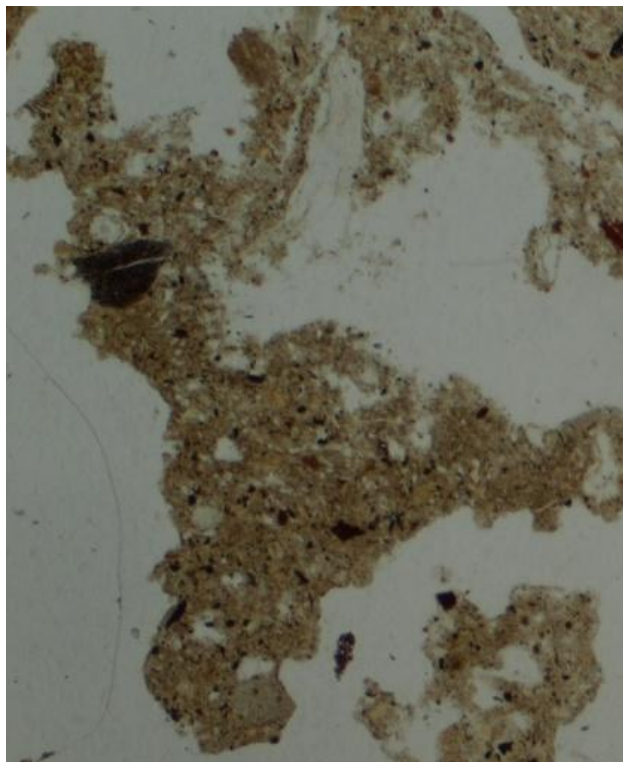
Obrázek 9: Půdní výbrus z 25 let staré nerektivované plochy zachycuje kořen s dobře viditelnou buněčnou strukturou.



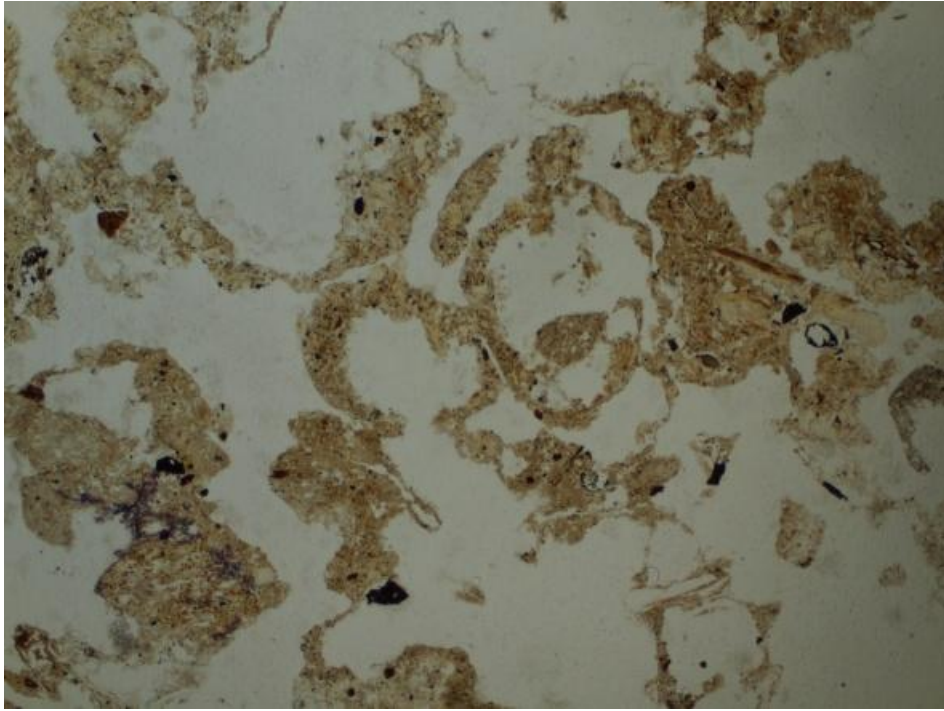
Obrázek 10: Půdní výbrus zachycuje exkrementy členovců, póry, opad a fragmenty.



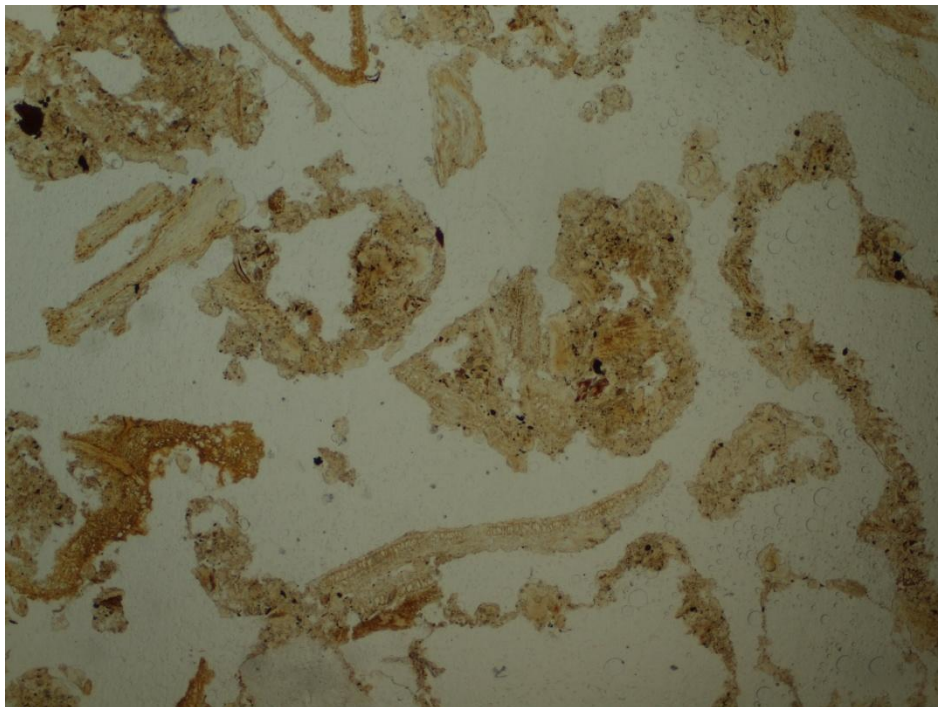
Obrázek 11: Půdní výbrus z rekultivované 29 let staré plochy zobrazuje exkrementy žížal, vlevo je zakomponovaný černý kousek uhlí, uprostřed je v něm vidět kousek opadu, dále jsou vidět póry.



Obrázek 12: Půdní výbrus z rekultivované 29 let staré plochy zachycuje exkrementy žížal s vlevo zakomponovanou tmavou minerální částí.



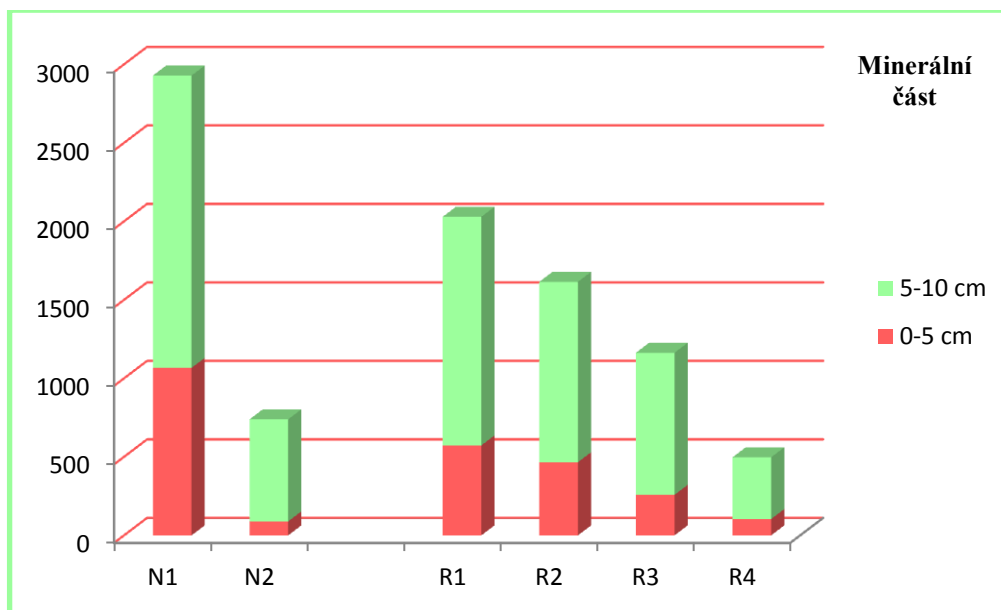
Obrázek 13: Půdní výbrus z rekultivované 33 let staré plochy zobrazuje exkrementy žížal, póry, vpravo rozpadající se minerální část.



Obrázek 14: Půdní výbrus z 50 let staré rekultivované plochy zachycuje exkrementy žížal, vlevo kořen, uprostřed fragment opadu.

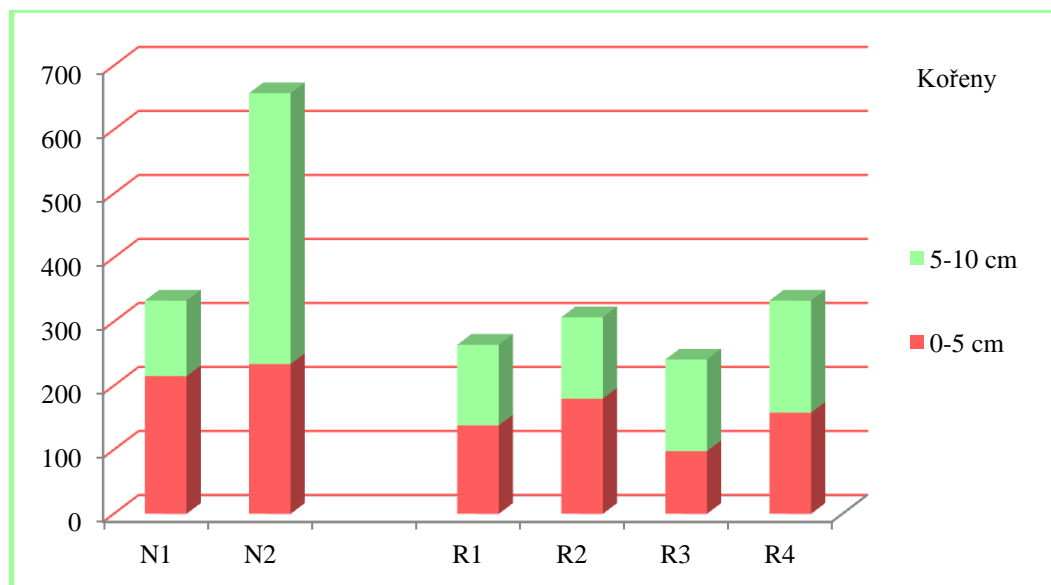
5.2 Porovnání jednotlivých struktur podle chronosekvence v závislosti na rekultivaci a hloubce

Jak závisí podíl jednotlivých komponent v půdě na hloubce u rekultivovaných a nerektivovaných ploch? Nejvíce minerálního podílu bylo nalezeno u mladší nerektivované plochy, u starší nerektivované plochy se minerální podíl snížil. U rekultivovaných ploch byl největší podíl minerálních částí na nejmladší ploše, tento podíl spolu se stářím plochy klesal od R1 (nejmladší 25 let) až k R4 (nejstarší plocha 50 let). V hloubce 5–10 cm je ve všech vzorcích více minerálních částí, než v hloubce 0–5 cm. Podle chí-kvadrát testu porovnávacího rozdělení minerálního podílu mezi vrstvami v závislosti na stáří plochy vyšla u nerektivovaných ploch p-hodnota $< 2,2e^{-16}$, u rekultivovaných p-hodnota = $6,361e^{-06}$. V obou případech tedy zamítáme nulovou hypotézu, že se minerální podíl statisticky významně neliší mezi hloubkami v závislosti na stáří. Ve všech případech je statisticky významný rozdíl. Větší množství minerálního podílu se nachází ve větší hloubce, zároveň jak v případě ploch ponechaných spontánní sukcesi, tak rekultivovaných ploch klesá minerální podíl s věkem plochy (obrázek 15).



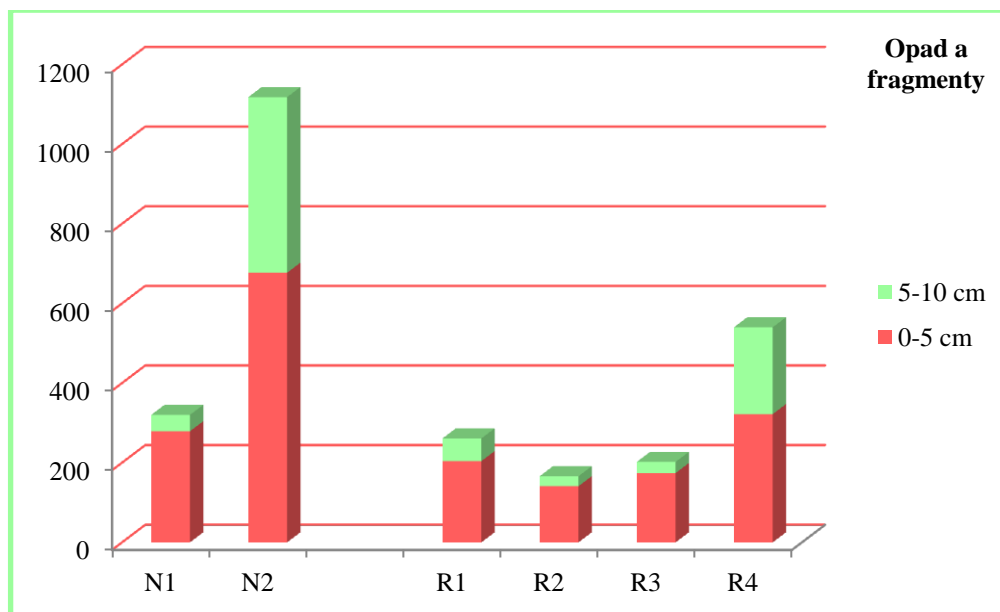
Obrázek 15: Množství minerálních částí v jednotlivých rekultivovaných (R) a nerektivovaných (N) plochách různého stáří na hnědouhelných výsypkách v okolí Sokolova (popis ploch je v tabulce 1).

U mladších ploch N1, R1, R2 se nacházel vyšší podíl kořenů v hloubce 0–5 cm. Naopak u starší plochy ponechané spontánní sukcesi N2 i u nejstarších rekultivovaných ploch R3, R4 se nacházelo více kořenů v hloubce 5–10 cm. Podle chí-kvadrát testu porovnávacího rozdělení kořenů mezi jednotlivé vrstvy v závislosti na stáří vyšla u ploch ponechaných spontánní sukcesi p-hodnota $< 2,2e^{-16}$, u rekultivovaných ploch p-hodnota = 0,0002789. Podíl kořenů v závislosti na hloubce se tedy v obou případech statisticky liší (obrázek 16). Celkově nejvíce kořenů bylo u starší nerektivované plochy.



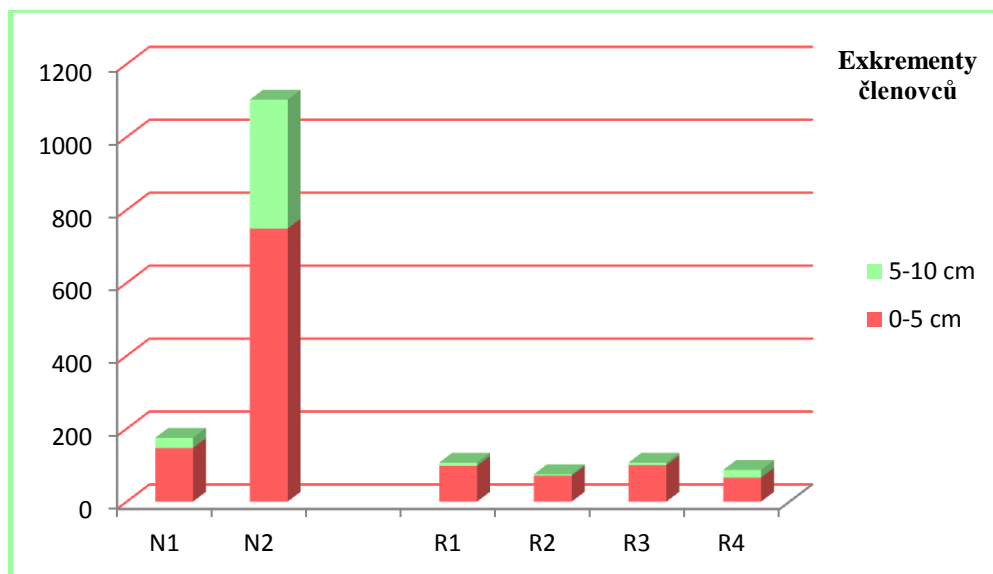
Obrázek 16: Množství kořenů v jednotlivých rekultivovaných (R) a nerektivovaných (N) plochách různého stáří na hnědouhelných výsypkách v okolí Sokolova (popis ploch je v tabulce 1).

Ve všech vzorcích se nacházel vyšší podíl opadu a fragmentů u povrchu v hloubce 0–5 cm. Podle chí-kvadrát testu porovnávacího rozdělení opadu a fragmentů mezi jednotlivé vrstvy v závislosti na stáří ploch vyšla u rekultivovaných i nerektivovaných ploch p-hodnota $< 2.2e^{-16}$. V obou případech tedy zamítáme nulovou hypotézu. Podíl opadu se v závislosti na stáří a hloubce u nerektivovaných i rekultivovaných ploch statisticky liší. Nejvíce opadu a fragmentů bylo u starší nerektivované plochy (obrázek 17).



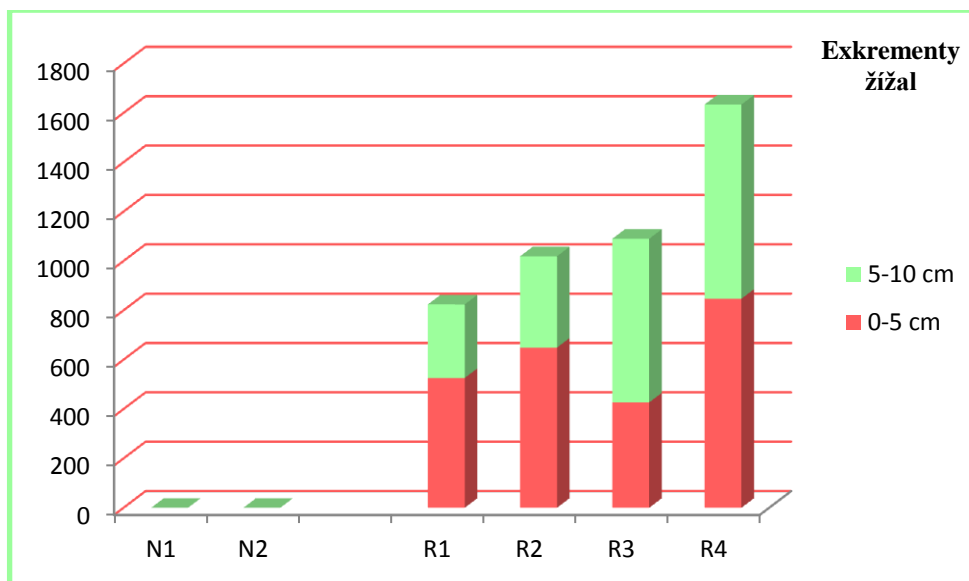
Obrázek 17: Množství opadu a fragmentů v jednotlivých rekultivovaných (R) a nerektivovaných (N) plochách různého stáří na hnědouhelných výsypkách v okolí Sokolova (popis ploch je v tabulce 1).

Nejvíce exkrementů členovců se nacházelo u starší nerektivované plochy N2. Podle chí-kvadrát testu porovnávacího rozdělení exkrementů členovců mezi jednotlivé vrstvy vyšla u nerektivovaných ploch p-hodnota = $1,661e^{-05}$, u rekultivovaných ploch vyšla p-hodnota = 0,0001126. V obou případech se množství exkrementů členovců statisticky liší mezi hloubkami. Ve všech případech bylo množství exkrementů členovců vyšší v nižší hloubce 0–5 cm, tedy blíže u povrchu. Zároveň bylo jejich množství vyšší u obou nerektivovaných ploch (obrázek 18).



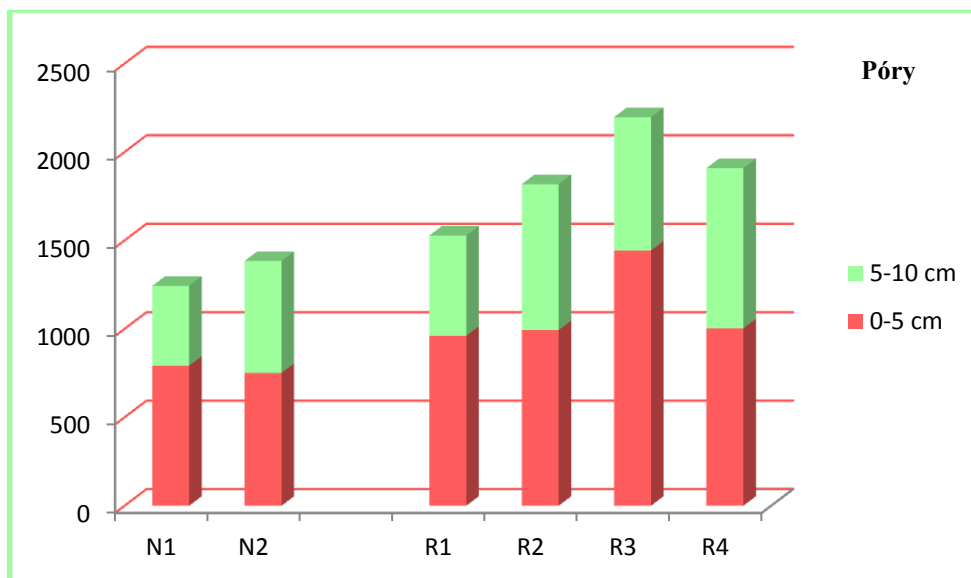
Obrázek 18: Množství exkrementů členovců v jednotlivých rekultivovaných (R) a nerektivovaných (N) plochách různého stáří na hnědouhelných výsypkách v okolí Sokolova (popis ploch je v tabulce 1).

U ploch ponechaných spontánní sukcesi se exkrementy žížal zatím neobjevily. U rekultivovaných ploch množství exkrementů žížal stoupalo spolu se stářím od nejmladší plochy R1 k nejstarší ploše R4. Podle chí-kvadrát testu porovnávajícího rozdělení exkrementů žížal mezi jednotlivé vrstvy vyšla u rekultivovaných ploch p-hodnota $< 2,2e^{-16}$. Podíl exkrementů žížal se v závislosti na stáří statisticky liší mezi hloubkami (obrázek 19).



Obrázek 19: Množství exkrementů žížal v jednotlivých rekultivovaných (R) a nerektivovaných (N) plochách různého stáří na hnědouhelných výsypkách v okolí Sokolova (popis ploch je v tabulce 1).

Podíl pórů stoupal od nejmladších ploch ke starším. Výjimku tvoří plocha R4, kde je více pórů než u plochy R2, ale méně než u plochy R3. Ve všech vzorcích se nacházelo více pórů blíže u povrchu v hloubce 0–5 cm (obrázek 20). Podle chí-kvadrát testu porovnávacího rozdělení pórů mezi jednotlivé vrstvy v závislosti na stáří vyšla u nerektivovaných ploch p-hodnota = $8,92e^{-07}$, u rekultivovaných ploch p-hodnota $< 2,2e^{-16}$. Podíl pórů se statisticky liší mezi hloubkami v závislosti na stáří.

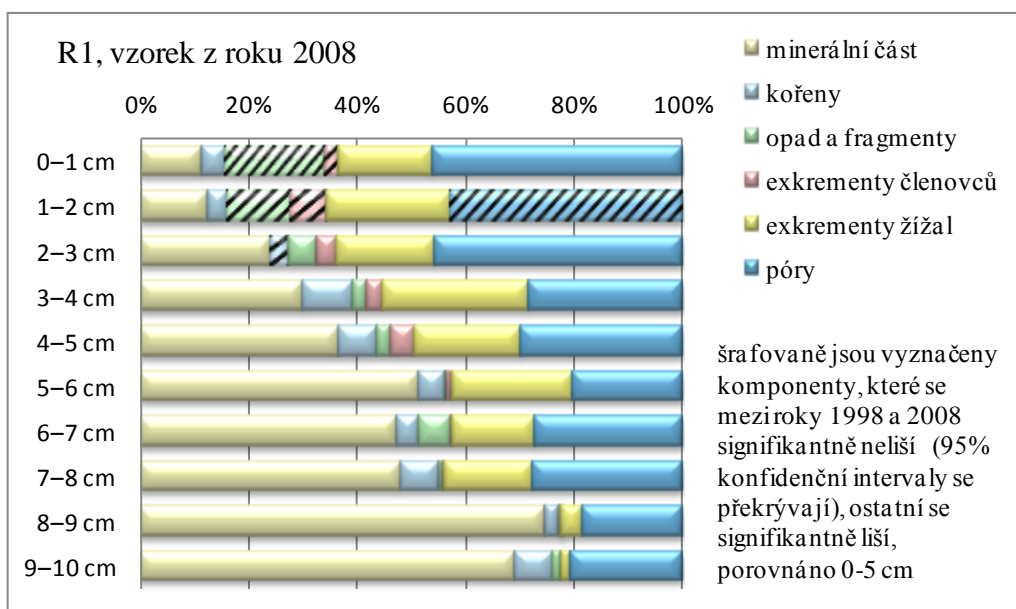
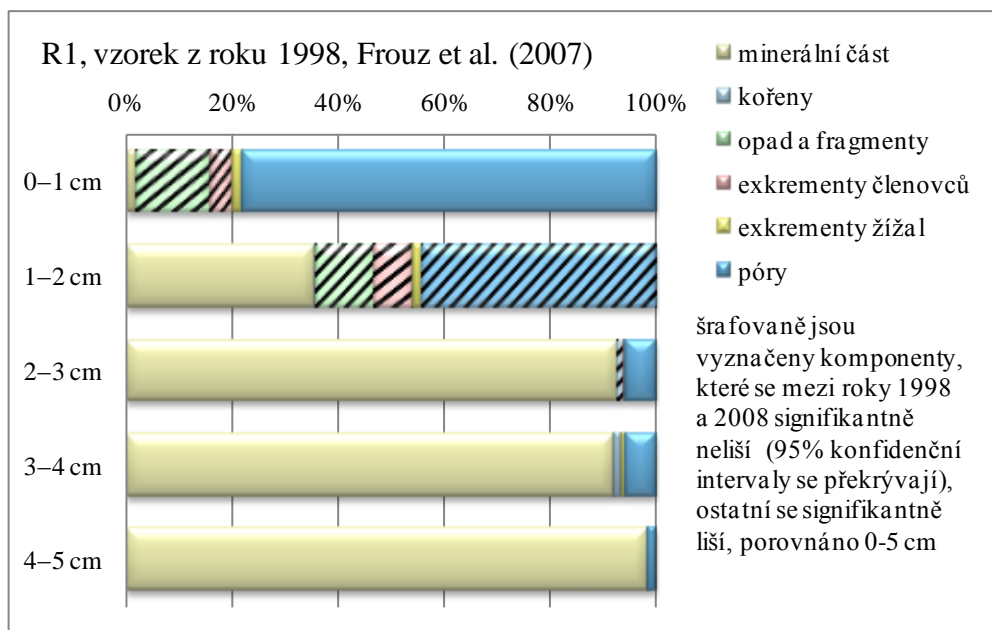


Obrázek 20: Množství pórů v jednotlivých rekultivovaných (R) a nerektivovaných (N) plochách různého stáří na hnědouhelných výsypkách v okolí Sokolova (popis ploch je v tabulce 1).

Při porovnání chronosekvencí se u mladší plochy ponechané spontánní sukcesi nacházel celkově nejvyšší podíl minerálních částí (obr. 15). U starší nerektivované plochy se jejich podíl snížil, a naopak stoupl podíl opadu a fragmentů (obr. 17), exkrementů členovců (obr. 18) a kořenů (obr. 16). Nejvyšší podíl exkrementů členovců byl u starší rekultivované plochy, kde se ještě nevyskytly exkrementy žížal. U ploch rekultivovaných výsadbou olše byl nejvyšší podíl minerálních částí u nejmladší plochy. Jejich podíl klesal spolu se zvyšujícím se stářím plochy a zároveň přibýval podíl exkrementů žížal (obr. 19). U mladších ploch N1, R1, R2 se nacházelo více kořenů v hloubce 0–5 cm. Naopak u starší plochy ponechané spontánní sukcesi i u nejstarších rekultivovaných ploch R3, R4 se více kořenů nacházelo v hloubce 5–10 cm (obr. 16).

5.3 Porovnání jednotlivých komponent ve vzorcích z roku 1998 a 2008

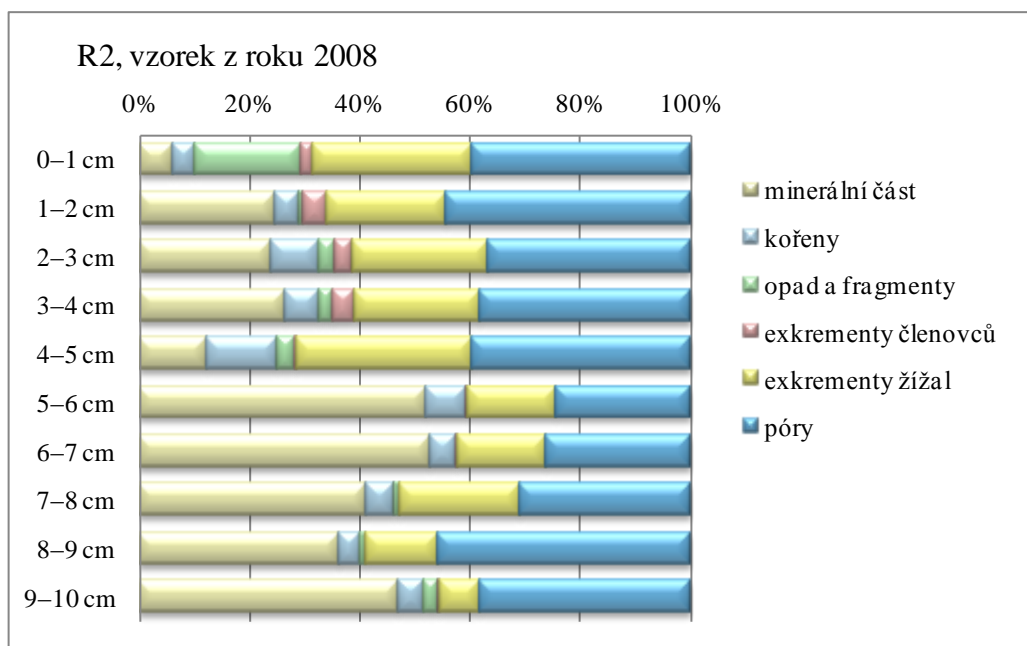
Při porovnání podílu jednotlivých komponent na rekultivované ploše R1 po deseti letech se od hloubky jednoho centimetru snížilo množství minerálních částí. Rozdíly ve změně půdy potvrzují rozdílné intervaly spolehlivosti, které se ani v jednom z porovnávaných 5 centimetrů u minerálních částí nepřekrývají. Naopak v celé porovnávané hloubce se objevilo více exkrementů žížal. Množství opadu u povrchu bylo podobné, intervaly spolehlivosti se překrývaly (obrázek 21).



Obrázek 21: Porovnání podílu jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na rekultivované ploše R1 v roce 1998 a v roce 2008.

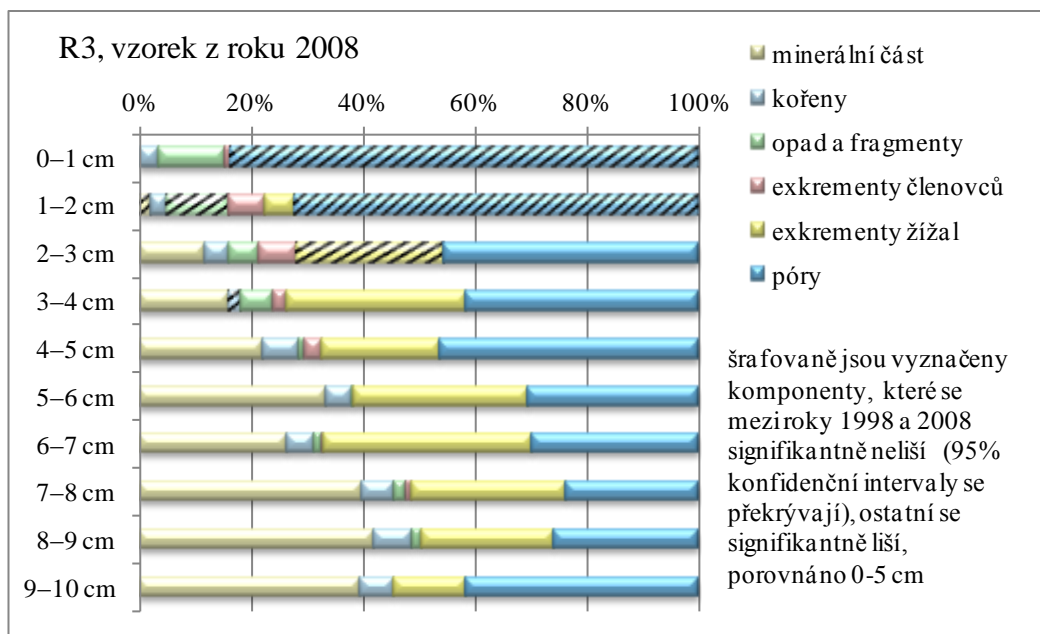
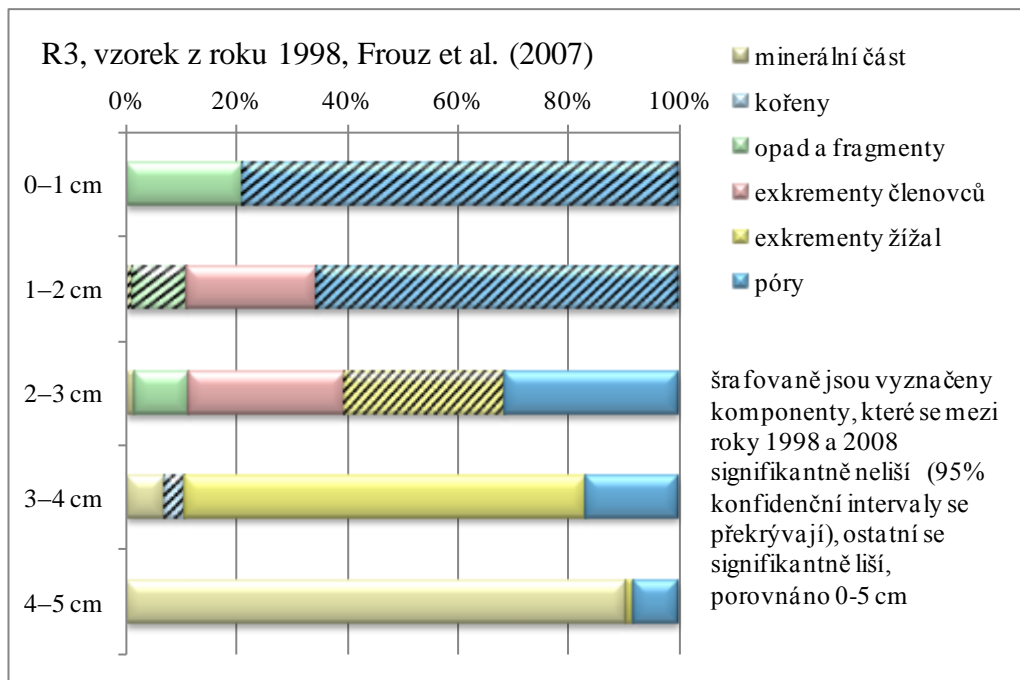
Přestože nejsou k dispozici ke srovnání výsledky z roku 1998 z lokality R2, rozhodla jsem se zařadit graf z lokality R2 z roku 2008 (obr. 22). Lokalita R2 je mladší než lokalita R3 a starší než lokalita R1. Je proto možné utvořit si přesnější představu o vývoji půdy prostřednictvím tohoto typu grafu (obr. 22), kde jsou zobrazeny podíly jednotlivých struktur v každém centimetru hloubky.

Při porovnání s mladší plochou jsem nacházela více exkrementů žížal v hloubce 8–10 cm, ale u starší plochy jsem v této hloubce pozorovala ještě vyšší množství exkrementů žížal.



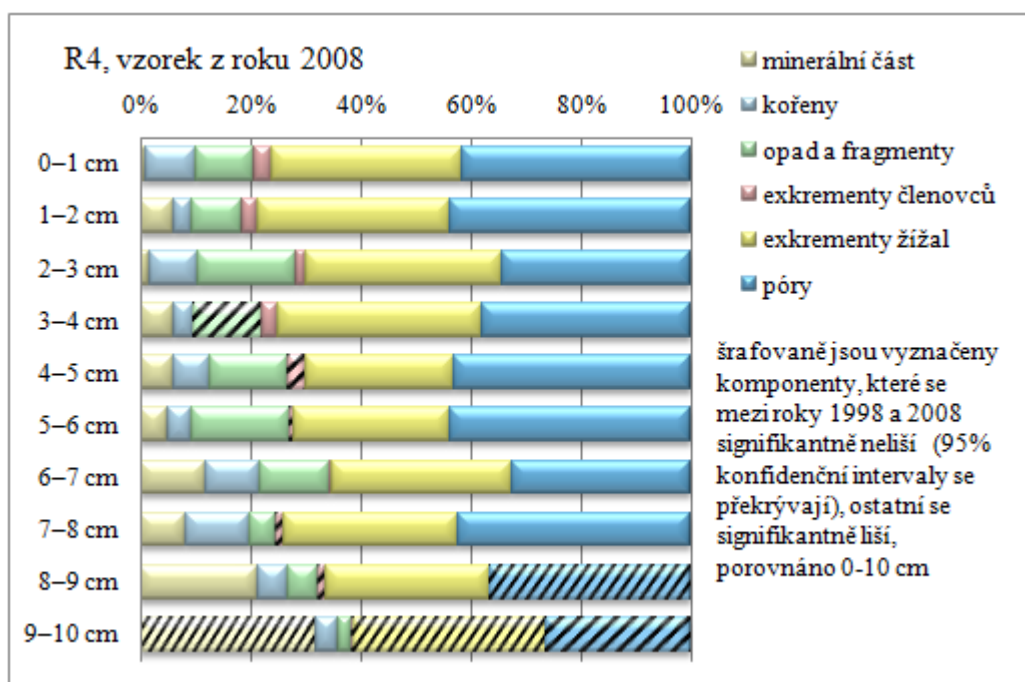
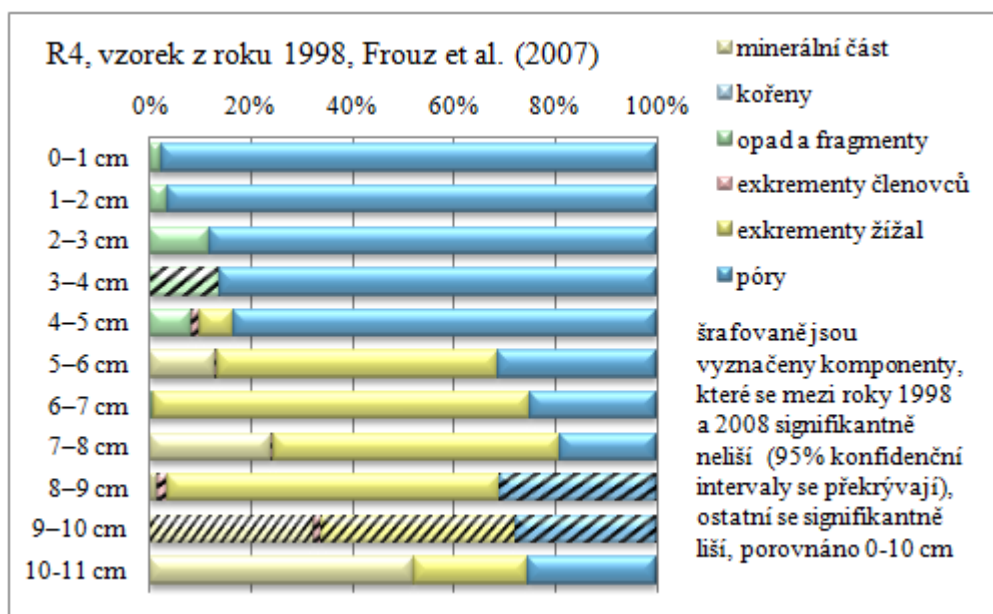
Obrázek 22: Podíl jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na rekultivované ploše R2 v roce 2008.

Při porovnání podílu jednotlivých komponent ve vzorku z rekultivované plochy R3 se v hloubce 4–5 cm v roce 2008 oproti roku 1998 nacházelo statisticky významně méně exkrementů žížal (obr. 23). Ve vzorku z roku 2008 jsem pozorovala nižší množství exkrementů členovců v hloubce 1–3 cm, ale v menším počtu jsem je pozorovala i ve větší hloubce 3–5 cm, kde se v roce 1998 neobjevily. Ve vzorku z roku 2008 jsem pozorovala vyšší množství kořenů téměř ve všech hloubkách, výjimkou byla hloubka 3–4 cm, kde se u kořenů překrývají intervaly spolehlivosti. V roce 1998 bylo pozorováno v hloubce 3–5 cm nižší množství pórů, než v roce 2008.



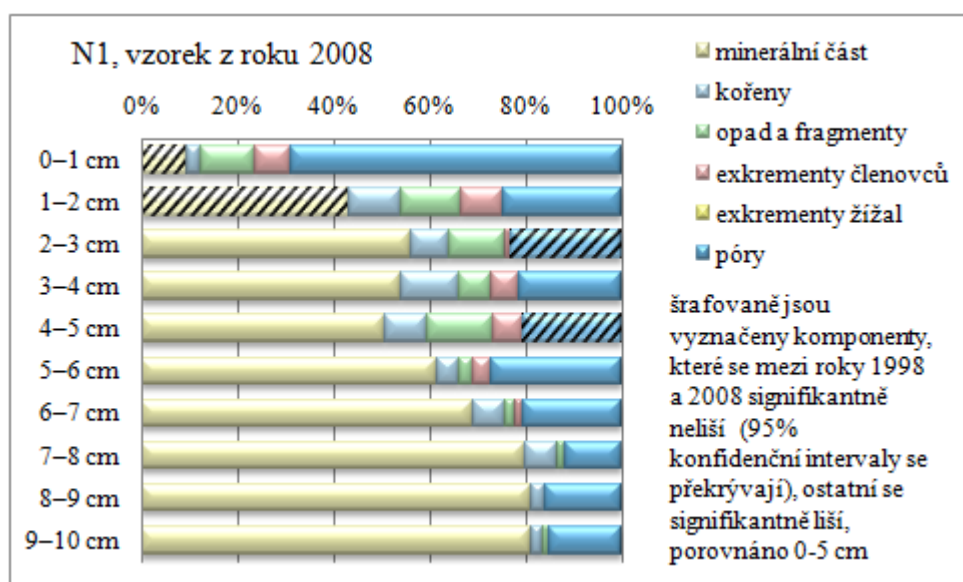
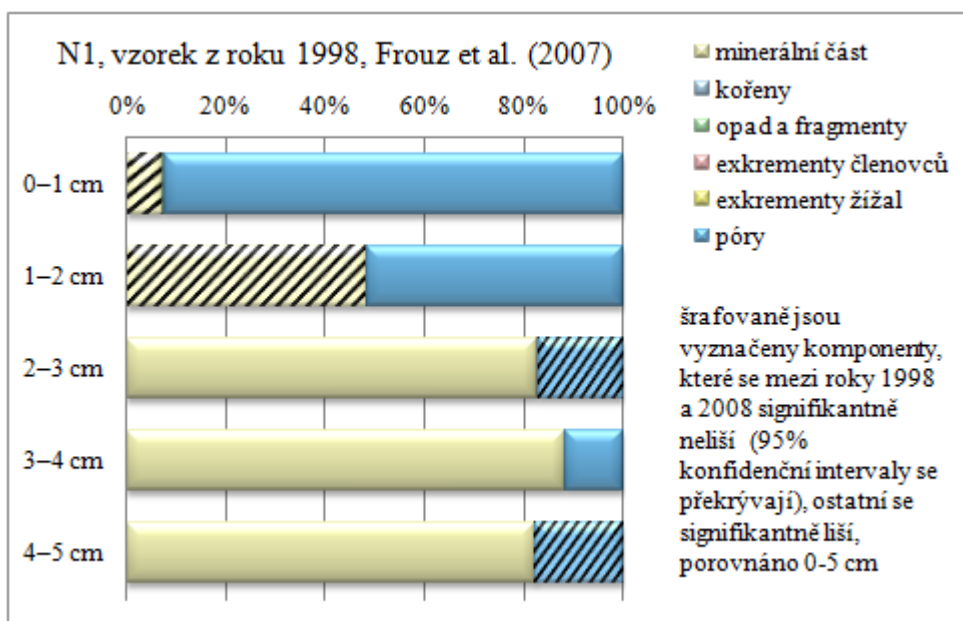
Obrázek 23: Porovnání podílu jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na rekultivované ploše R3 v roce 1998 a v roce 2008.

U plochy R4 jsem ve vzorku z roku 2008 nacházela podobný podíl exkrementů žížal ve všech hloubkách (obr. 24), na rozdíl od vzorku z roku 1998, kde se ve vrchních vrstvách nacházely převážně póry a opad. Při porovnání s ostatními vzorky byla půda u tohoto vzorku nejvíc promíchaná.



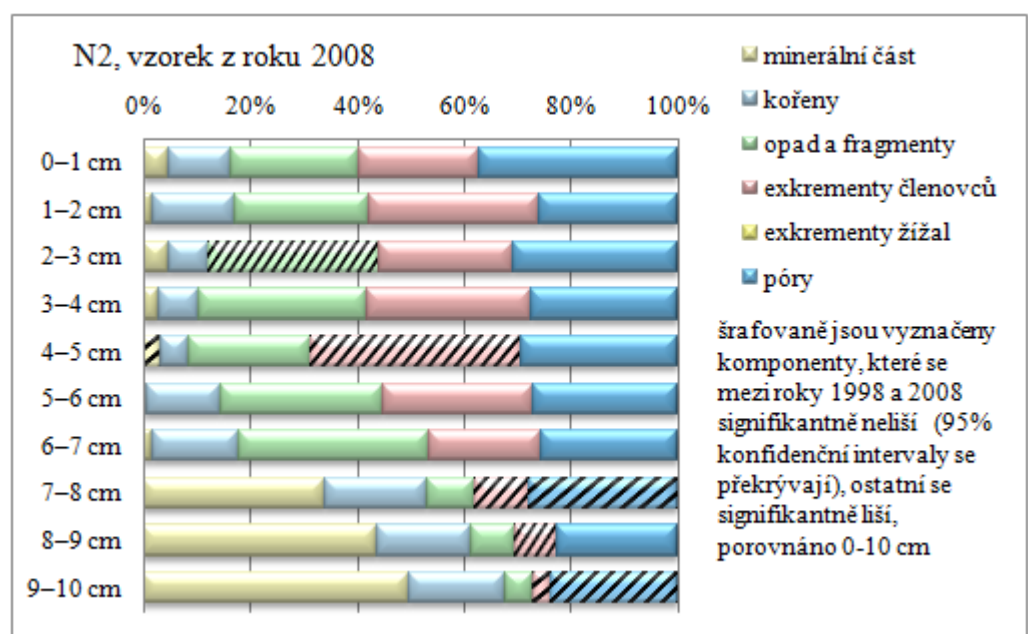
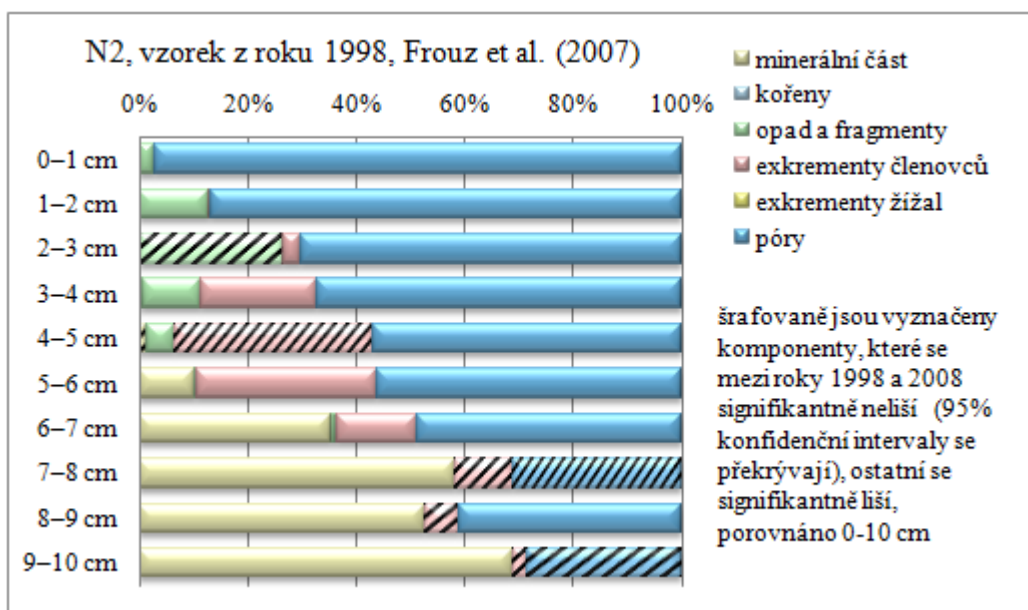
Obrázek 24: Porovnání podílu jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na rekultivované ploše R4 v roce 1998 a v roce 2008.

Při porovnání podílů jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na nereakultivované ploše N1 mezi roky 1998 a 2008 došlo k nárůstu organických částí. Přibyl opad a fragmenty, kořeny a exkrementy členovců (obrázek 25).



Obrázek 25: Porovnání podílu jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na nerektivované ploše N1 v roce 1998 a v roce 2008.

Při porovnání podílů jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na nerektivované ploše N2 mezi roky 1998 a 2008 došlo k nárůstu organických částí. Přibyl opad a fragmenty, kořeny a exkrementy členovců (obrázek 26). Půda byla v roce 2008 částečně promíchaná.



Obrázek 26: Porovnání podílu jednotlivých komponent v jednotlivých hloubkách na nerekvultivované ploše N2 v roce 1998 a v roce 2008.

Podle tabulky 2 vidíme, že při porovnání jednotlivých struktur v hloubce 0–5 cm a 5–10 cm mezi roky 1998 a 2008 došlo u většiny z nich ke statisticky významné změně. Při porovnání mezi roky 1998 a 2008 se intervaly spolehlivosti pro podíl minerálních částí v hloubce 0–5 cm ani u jednoho vzorku nepřekrývaly, byly tedy rozdílné. U ploch N1, R1, R3 bylo v roce 2008 jejich množství výrazně nižší,

u vzorků N2 a R4 naopak vyšší. U plochy N2 v hloubce 5–10 cm byl v roce 2008 podíl minerální části výrazně nižší proti roku 1998, intervaly spolehlivosti se nepřekrývaly, u minerálních částí v hloubce 5–10 cm byl tedy statisticky významný rozdíl. U vzorku R4 v hloubce 5–10 cm se intervaly spolehlivosti pro minerální podíl překrývaly, jejich množství bylo podobné.

U všech porovnávaných vzorků v obou hloubkách 0–5 cm a 5–10 cm se vyskytovalo více kořenů v roce 2008 oproti roku 1998. Intervaly spolehlivosti se nepřekrývaly, rozdíl byl statisticky významný. V roce 1998 byl výskyt kořenů na stejných plochách celkově nízký, např. na ploše R4 a N2 v hloubce 5–10 cm nebyl nalezen žádný kořen. V obou porovnávaných hloubkách bylo v roce 2008 více kořenů u všech porovnávaných pětcentimetrových intervalů oproti vzorkům z roku 1998.

Opad a fragmenty se nacházely v podobném množství u plochy R3 v hloubce 0–5 cm. U všech ostatních porovnávaných vzorků v hloubce 0–5 cm a 5–10 cm se objevovalo více opadu a fragmentů ve vzorcích z roku 2008.

Podíl exkrementů členovců byl v roce 2008 podobný při porovnání s rokem 1998 na plochách N2 a R4 v hloubce 5–10 cm, intervaly spolehlivosti se překrývají. U hloubky 0–5 cm byl jejich podíl rozdílný u všech porovnávaných ploch. U ploch N1, N2, R1 a R4 se jich v hloubce 0–5 cm nacházelo v roce 2008 více oproti roku 1998.

Exkrementy žížal se na nerektivovaných plochách neobjevovaly v roce 1998 ani v roce 2008. Při porovnání rektivovaných ploch v hloubce 0–5 cm bylo v roce 2008 více exkrementů žížal u ploch R1 a R4, méně u plochy R3, kde bylo naopak více pórů. Méně exkrementů žížal jsem pozorovala ve vzorku z roku 2008

u plochy R4 v hloubce 5–10 cm, bylo zde naopak více kořenů, pórů, opadu a fragmentů. Minerálních částí a exkrementů členovců se na této ploše v roce 1998 a 2008 vyskytovalo podobné množství.

Tabulka 2: Porovnání intervalů spolehlivosti pro 0–5 cm a 5–10 cm pro rok 1998 (Frouz a kol., 2007b) a 2008. Žlutě jsou vyznačeny nepřekrývající se intervaly spolehlivosti, tedy rozdílné a modře jsou vyznačeny překrývající se intervaly spolehlivosti, tedy podíl struktur, který vyšel podobně. Světle šedým písmem jsou struktury, pro které nejsou historická data ke srovnání.

minerální část	0–5 cm, 1998	0–5 cm, 2008	5–10 cm, 1998	5–10 cm, 2008
N1	(60,49 % – 63,19 %)	(40,74 % – 44,62 %)	není	(72,77 % – 76,19 %)
N2	(0,24 % – 0,60 %)	(2,83 % – 4,29 %)	(43,68 % – 46,44 %)	(24,28 % – 27,72 %)
R1	(62,93 % – 65,59 %)	(21,27 % – 24,57 %)	není	(56,31 % – 60,17 %)
R3	(18,93 % – 21,15 %)	(9,13 % – 11,51 %)	není	(34,32 % – 38,08 %)
R4	0	(3,38 % – 4,94 %)	(13,31 % – 15,25 %)	(14,29 % – 17,15 %)
kořeny				
	0–5 cm, 1998	0–5 cm, 2008	5–10 cm, 1998	5–10 cm, 2008
N1	(0,00 % – 0,10 %)	(7,50 % – 9,70 %)	není	(3,89 % – 5,55 %)
N2	0	(8,22 % – 10,50 %)	(0,12 % – 0,40 %)	(15,45 % – 18,39 %)
R1	(0,34 % – 0,74 %)	(4,62 % – 6,42 %)	není	(4,18 % – 5,90 %)
R3	(0,52 % – 1,00 %)	(3,16 % – 4,68 %)	není	(4,81 % – 6,63 %)
R4	0	(5,37 % – 7,27 %)	(0,00 % – 0,10 %)	(6,00 % – 8,00 %)
opad a fragmenty				
	0–5 cm, 1998	0–5 cm, 2008	5–10 cm, 1998	5–10 cm, 2008
N1	(0,00 % – 0,16 %)	(9,93 % – 12,39 %)	není	(1,14 % – 2,14 %)
N2	(10,69 % – 12,47 %)	(25,34 % – 28,82 %)	(0,12 % – 0,40 %)	(16,15 % – 19,13 %)
R1	(4,34 % – 5,54 %)	(7,09 % – 9,23 %)	není	(1,69 % – 2,87 %)
R3	(7,46 % – 8,98 %)	(5,96 % – 7,96 %)	není	(0,71 % – 1,53 %)
R4	(7,34 % – 8,86 %)	(11,57 % – 14,19 %)	(0,04 % – 0,24 %)	(7,61 % – 9,83 %)
exkrementy členovců				
	0–5 cm, 1998	0–5 cm, 2008	5–10 cm, 1998	5–10 cm, 2008
N1	0	(4,96 % – 6,80 %)	není	(0,71 % – 1,53 %)
N2	(11,43 % – 13,25 %)	(28,16 % – 31,76 %)	(12,61 % – 14,51 %)	(12,75 % – 15,49 %)
R1	(1,92 % – 2,76 %)	(3,16 % – 4,68 %)	není	(0,13 % – 0,59 %)
R3	(9,50 % – 11,18 %)	(3,23 % – 4,77 %)	není	(0,07 % – 0,49 %)
R4	(0,13 % – 0,43 %)	(2,01 % – 3,27 %)	(0,50 % – 0,98 %)	(0,48 % – 1,20 %)
exkrementy žížal				
	0–5 cm, 1998	0–5 cm, 2008	5–10 cm, 1998	5–10 cm, 2008
N1	0	0	není	0
N2	0	0	0	0
R1	(0,66 % – 1,18 %)	(19,44 % – 22,64 %)	není	(10,65 % – 13,19 %)
R3	(19,46 % – 21,70 %)	(15,60 % – 18,56 %)	není	(24,79 % – 28,25 %)
R4	(1,00 % – 1,64 %)	(32,02 % – 35,74 %)	(52,80 % – 55,56 %)	(29,66 % – 33,30 %)
póry				
	0–5 cm, 1998	0–5 cm, 2008	5–10 cm, 1998	5–10 cm, 2008
N1	(36,69 % – 39,39 %)	(29,86 % – 33,50 %)	není	(16,53 % – 19,55 %)
N2	(74,47 % – 76,85 %)	(28,24 % – 31,84 %)	(39,76 % – 42,48 %)	(23,62 % – 27,02 %)
R1	(25,77 % – 28,23 %)	(36,53 % – 40,35 %)	není	(21,04 % – 24,32 %)
R3	(38,70 % – 41,42 %)	(55,78 % – 59,66 %)	není	(28,36 % – 31,96 %)
R4	(89,48 % – 91,12 %)	(38,20 % – 42,04 %)	(25,43 % – 27,89 %)	(34,36 % – 38,12 %)

6 Diskuze

Nejvýraznějším trendem v časovém vývoji půd pozorovaným jak na základě porovnání výbrusů z různých ploch chronosekvence, tak na základě změn jednotlivých ploch v čase je postupný úbytek čistě minerálních struktur a jejich nahrazování strukturami biogenního původu opadem a jeho fragmenty, exkrementy členovců, exkrementy žížal a kořeny. To názorně demonstruje vysoký podíl biogenních struktur a tím i zásadní podíl organismů na formování vrchní vrstvy půdy, na který upozorňují i další autoři (Barros a kol., 2001; Bhadauria a Saxena, 2010; Frouz a kol., 2007b; Hole, 1981; Jouquet a kol., 2006; Lavelle a kol., 1997; Rusek, 1975; Rusek, 2006; Rusek, 2008). Hromadění biogenních struktur také jistě souvisí s hromaděním hlavních biogenních prvků C a N, které bylo s postupným stárnutím těchto ploch pozorováno jinými autory (Šourková a kol., 2005; Frouz a kol., 2011).

Tento proces akumulace biogenních struktur postupuje od povrchu směrem do hloubky, v důsledku toho je v hloubce 5–10 cm ve všech vzorcích více minerálních částí než v hloubce 0–5 cm. Tento postupný vývoj půdy z povrchu směrem dolů ukazuje na zásadní vliv opadu a organismů, které se opadem živí, pro vývoj půd na sledovaných plochách. Lze si představit, že kdyby řídicí silou vývoje byly kořeny, probíhal by vývoj od hloubky největšího prokořenění na obě strany, a kdyby se uplatňovala nějaká mechanická disturbance, jako je například eroze, objevovaly by se biogenní struktury víceméně náhodně v celé hloubce profilu, jak ukázal Frouz a kol. (2013) na variabilitě vývoje půdního profilu napříč USA.

To jistě neznamena, že by se na našich plochách na tvorbě půd nepodílely kořeny, ale zdá se, že distribuce kořenů sleduje distribuci ostatních biogenních struktur. U mladších ploch N1, R1, R2 se nacházelo více kořenů v hloubce 0–5 cm. Naopak u starší plochy ponechané spontánní sukcesi N2 i u nejstarších rekultivovaných ploch R3, R4 se nacházelo více kořenů v hloubce 5–10 cm. To indikuje, že dusík hlavní limitující prvek v raných fázích sukcese je povětšinou vázán na organickou hmotu a nárůst jeho obsahu v půdě souvisí s nárůstem organické hmoty v půdě (Šourková a kol., 2005).

Při porovnání kořenů v letech 1998 a 2008 vyšel celkově vyšší podíl kořenů u všech ploch v roce 2008. To mohla také ovlivnit vhodná vlhkost půdy či její teplota v předchozích letech (Hurd, 1968; Teskey a Hinckley, 1981).

Ve vývoji půd lze pozorovat výrazné rozdíly mezi rekultivovanými a nereakultivovanými plochami. U všech rekultivovaných ploch se v roce 1998 i 2008 vyskytovaly ekrementy žížal, ale žádné se zatím neobjevily na porovnávaných nereakultivovaných plochách. Z dřívější studie vyplývá, že se žížaly na nereakultivované plochy dostávají až později, v době, kdy se na ní utvoří vrstva opadu (Frouz a kol., 2007b). Na starší nereakultivované ploše bylo ze všech porovnávaných ploch nejvíce ekrementů členovců. Dá se předpokládat, že v dnešních dnech se již na ploše N2 ekrementy žížal nacházejí. Tomu nasvědčuje fakt, že se u této v roce 2008 33 let staré plochy nacházelo výrazně nejvyšší množství opadu. A především v práci Frouze a kol. (2007b) se na nereakultivované ploše staré 40 let ekrementy žížal již objevily ve větším množství. Přestože se na ploše N2 v roce 2008 ekrementy žížal zatím neobjevily, půda byla částečně promíchaná. Což by podle Lavella a kol. (1997) mohlo být způsobeno tím, že se na bioturbaci podílejí kromě žížal další zástupci půdní

makrofauny, zejména mnohonožky, larvy dvoukřídlých a někteří další členovci, tedy půdní živočichové, jejichž exkrementy se nacházely v pozorované půdě.

Činnost půdních živočichů souvisí během sukcesního vývoje se zvyšováním podílu pórů (Rusek, 2006). Kromě jedné výjimky stoupal v roce 2008 podíl pórů od mladších ploch ke starším.

U všech rekultivovaných ploch se spolu se stářím zvyšoval podíl exkrementů žížal a půda byla zároveň více promíchaná. Nejvíce promíchaná půda byla u nejstarší rekultivované plochy. Žížaly při průchodu půdou vytváří chodbičky, které mají vliv na pohyb vody a vzduchu. Zatahují do půdy opad, promíchávají minerální a organické části (Brown a kol., 2000). Žížaly tak mění strukturní vlastnosti půdy (Brown a kol., 2000; Lavelle a kol., 1997). Promíchávání půdy žížalami je v souladu s publikacemi mnoha autorů (Bhadauria a Saxena, 2010; Butt a kol., 2008; Brown a kol., 2003; Darwin, 1881; Grave a Kealhofer, 1999; Johnson, 2002; Jouquet, 2006; Kellog, 1948; Lavelle a kol., 1997; Meysman a kol., 2006).

V sukcesních změnách u půdní mikrostruktury nejdříve dochází v horní vrstvě ke kumulaci opadu, ten je rozkládán pomocí fyzikálně-chemických a mikrobiálních procesů s přispěním půdní mesofauny. Pak se díky aktivitě makrofauny vytvoří fermentační vrstva skládající se z exkrementů v horní vrstvě půdy. Další přichází kolonizace žížal, která má za důsledek promíchání půdy. Dochází k akumulaci exkrementů žížal ve vrchních vrstvách půdy a formování organické minerální humusové vrstvy (Frouz et al., 2007b).

7 Závěr

Práce přinesla srovnání vývoje půdy na Velké podkrušnohorské výsypce pomocí metodiky půdních výbrusů.

Byl potvrzen předpoklad, že se v hlubších vrstvách mladších ploch nacházelo nejvíce minerálních částí. U starších ploch se nacházelo vyšší množství organických komponent.

Částečně se splnil předpoklad, že vyšší množství exkrementů žížal se nachází u starších ploch. U nerektivovaných ploch se zatím exkrementy žížal neobjevily. Avšak u starší nerektivované plochy se nacházelo nejvyšší množství exkrementů členovců a půda byla částečně promíchaná. U všech rektivovaných ploch se nacházely exkrementy žížal, jejich podíl s jejich stářím stoupal a půda zároveň jevila čím dál vyšší známky promíchání. Nejvíce promíchaná půda byla u nejstarší rektivované plochy.

Bylo by zajímavé provést po deseti letech, tedy v roce 2018, odběr vzorků a zjistit, zda a v jakém podílu se u nerektivované plochy N2 objevují exkrementy žížal.

8 Literatura

- * ALDORF, J. Methods and Results of the Field Measuring of Geotechnical Rock Properties on Spoil Banks of Brown-coal Mines. In: Singhal a kol. *Mine Planning and Equipment Selection*. 1995. ISBN 90 5410 569 0.

- * ANDERSON, R. S. Modelling the Tor-dotted Crests, Bedrock Edges, and Parabolic Profiles of High Alpine Surfaces of the Wind River Range, Wyoming. *Geomorphology*. 2002, č. 46, s. 35–58.

- * AROCENA, J. M., J. M. van MOURIK, M. L. M. SCHILDER a A. F. CANO. Initial Soil Development Under Pioneer Plant Species in Metal Mine Waste Deposits. *Restoration Ecology*. 2010, č. 18, s. 244–252.

- * BADDELEY, A. J., H. J. GUNDERSEN a L. M. CRUZ-ORIVE. Estimation of Surface Area From Vertical Sections. *Journal of Microscopy*. 1986, č. 142/3, s. 259–276.

- * BARROS, E., P. CURMI, V. HALLAIRE, A. CHAUVEL, P. LAVELLE. The Role of Macrofauna in the Transformation and Reversibility of Soil Structure of an Oxisol in the Process of Forest to Pasture Conversion. *Geoderma*. 2001, č. 100, s. 193–213.

- * BHADOURIA, T. a K. G. SAXENA. Role of Earthworms in Soil Fertility Maintenance through the Production of Biogenic Structures. *Applied and Environmental Soil Science*. 2010, Article ID 816073, 7 str.

- * BIELECKA, M. a J. KRÓL-KORZCAK. Hybrid Expert System Aiding Design of Post-mining Regions Restoration. *Ecological Engineering*. 2010, č. 36, s. 1231–1241.

- * BLANCHART, E., A. ALBRECHT, G. BROWN, T. DECAENS, A. DUBOISSET, P. LAVELLE, L. MARIANI a E. ROOSE. Effects of Tropical Endogenic Earthworms on Soil Erosion. *Agriculture. Ecosystems and Environment*. 2004, č. 104, s. 303–315.
- * BROWN, G. G., I. BAROIS a P. LAVELLE. Regulation of Soil Organic Matter Dynamics and Microbial Activity in the Drilosphere and the Role of Interactions with other Edaphic Functional Domains. *European Journal of Soil Biology*. 2000, č. 36, s. 177–198.
- * BROWN, G. G., C. FELLER, E. BLANCHART, P. DELEPORTE a S. S. CHERNYANSKII. With Darwin, Earthworms Turn Intelligent and Become Human Friends. *Pedobiologia*. 2003, č. 47, s. 924–933.
- * BRUSSAARD, L. Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil. *Ambio*. 1997, č. 26/8, s. 563–570.
- * BULLOCK, P., N. FEDEROFF, A. JONGERIUS, G. STOOPS, T. TURSINA, U. BABEL, J. AGUILAR, H.-J. ALTEMÜLLER, E. A. FITZPATRICK, S. T. KOWALINSKI, G. PANEQUE, G. K. RUTHERFORD a E. A. YARILOVA. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Waine Research Publications, 1985, 152 str. ISBN 0905184-09-2.
- * BUTT, K. R., C. N. LOWE, T. BEASLEY, I. HANSON a R. KEYNES. Darwin's revisited. *European Journal of Soil Biology*. 2008, č. 44, s. 255-259.

- * CASTELLANOS-NAVARRETE, A., C. RODRIGUEZ-ARAGONES, R. G. M. de GOEDE, M. J. KOOISTRA, K. D. SAYERE, L. BRUSSAARD a M. M. PULLEMAN. Earthworm Activity And Soil Structural Changes Under Conservation Agriculture in Central Mexico. *Soil & Tillage research*. 2012, č. 123, s. 61–70.
- * CROSSLEY, D. A. Earthworm Ecology: from Darwin to Vermiculture – Review. *Ecology*. 1985, č. 66, s. 312.
- * DARWIN, C. *The Formation of Vegetable Mould through the Action of Worms, with Observations on their Habits*. First Edition. London: John Murray, 10th October 1881. Reprint: Geraldine Murfin-Shaw, 2007, 151 str.
- * ELYEZNASNI, N., F. SELLAMI, V. POT, P. BENOIT, L. VIEUBLE-GONOD, I. YOUNG a S. PETH. Exploration of Soil Micromorphology to Identify Coarse-sized OM Assemblages in X-ray CT Images of Undisturbed Cultivated Soil Cores. *Geoderma*. 2012, č. 179, s. 38–45.
- * FELDE, V. J. M. N. L., S. PETH, D. UTEAU-PUSCHMANN, S. DRAHORAD a P. FELIX-HENNINGSEN. Soil Microstructure as an Under-explored Feature of Biological Soil Crust Hydrological Properties: Case Study from the NW Negev Desert. *Biodiversity and conservation*. 2014, č. 23/7, s. 1687–1708.
- * FENER, M. a N. YESILLER. Vertical Pore Structure Profile of a Compacted Clayey Soil. *Engineering Geology*. 2013, č. 166, s. 204–215.

- * FROUZ, J., D. ELHOTTOVÁ, V. PIŽL, K. TAJOVSKÝ, M. ŠOURKOVÁ, T. PICEK a S. MALÝ. The Effect of Litter Quality and Soil Faunal Composition on Organic Matter Dynamics in Post-mining Soil: A laboratory study. *Applied Soil Ecology*. 2007a, č. 37, s. 72–80.
- * FROUZ, J., V. PIŽL a K. TAJOVSKÝ. The Effect of Earthworms and other Saprophagous Macrofauna on soil Microstructure in Reclaimed and Un-reclaimed Post-mining Sites in Central Europe. *European Journal of Soil Biology*. 2007b, č. 43, s. 184–189.
- * FROUZ, J., J. POPPERL, I. PŘIKRYL a J. ŠTRUDL. Tvorba nové krajiny na Sokolovsku. *Sokolovská uhelná, právní nástupce a.s., Sokolov*. 2007c, č. 26.
- * FROUZ, J., K. PRACH, V. PIŽL, L. HÁNĚL, J. STARÝ, K. TAJOVSKÝ, J. MATERNA, V. BALÍK, J. KALČÍK a K. ŘEHOUNKOVÁ. Interactions Between Soil Development, Vegetation and Soil Fauna During Spontaneous Succession in Post-mining Sites. *European Journal of Soil Biology*. 2008, č. 44, s. 109–121.
- * FROUZ, J., V. PIŽL, E. CIENCIALA a J. KALČÍK. Carbon Storage in Post-mining Forest Soil, the Role of Tree Biomass and soil Bioturbation. *Biogeochemistry*. 2009, č. 94/2, s. 111–121.
- * FROUZ, J., J. KALCIK a V. VELICHOVA. Factors Causing Spatial Heterogeneity in Soil Properties, Plant Cover, and Soil Fauna in a Non-Reclaimed Post-Mining Site. *Ecological Engineering*. 2011, č. 37/11, s. 1910–1913.

- * FROUZ, J., V. JÍLKOVÁ, T. CAJTHAML, V. PIŽL, K. TAJOVSKÝ, L. HÁNĚL, A. BUREŠOVÁ, H. ŠIMÁČKOVÁ, K. KOLAŘÍKOVÁ, J. FRANKLIN, J. NAWROT, J. W. GRONINGER a P. D. STAHL. Soil Biota in Post-Mining Sites along a Climatic Gradient in the USA: Simple Communities in Shortgrass Prairie Recover Faster than Complex Communities in Tallgrass Prairie and Forest. *Soil Biology and Biochemistry*. 2013, č. 67, s. 212–225.
- * GERKE K. M., M. V. KARSANINA A E. B. SKVORTSOVA. Description and Reconstruction of the Soil Pore Space Using Correlation Functions. *Eurasian Soil Science*. 2012, č. 45/9, s. 861–872.
- * GERWITZ, A. a E. R. PAGE. An Empirical Mathematical Model to Describe Plant Root Systems. *Journal of Applied Ecology*. 1974, č. 11/2, s. 773–781.
- * GRAVE, P., a L. KEALHOFER. Assessing Bioturbation in Archaeological Sediments using Soil Morphology and Phytolith Analysis. *Journal of Archaeological Science*. 1999, č. 26, s. 1239–1248.
- * HOLE F. D. Effects of Animals on Soil. *Geoderma*. 1981, č. 1–2, s. 75–112.
- * HUANG, P. M., Y. LI, M. E. SUMNER a T. A. GHEZZEHEI. *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. CRC Press, 2011. 1442 str. ISBN-10: 1439803056.
- * HURD, E. A. Growth of Roots of Seven Varieties of Spring Wheat at High and Low Moisture Levels. *Agronomy Journal*. 1968, č. 60/2, s. 201–205.
- * CHRISTY, R. M. On the Absence of Earthworms from the Prairies of the Canadian North-West. *Nature*. 1884, č. 29, s. 406–407.

- * JOHNSON, D. L. Darwin Would be Proud: Bioturbation, Dynamic Denudation, and the Power of Theory in Science. *Geoarchaeology: An International Journal*. 2002, č. 17, s. 7–40.
- * JONES, C. G., J. H. LAWTON a M. SHACHAK. Positive and Negative Effects of Organisms as Physical Ecosystem Engineers. *Ecology*. 1997, č. 78/7, s. 1946–1957.
- * JOUQUET, P., J. DAUBER, J. LAGERLÖF, P. LAVELLE a M. LEPAGE. Soil Invertebrates as Ecosystem Engineers: Intended and Accidental Effects on Soil and Feedback Loops. *Applied Soil Ecology*. 2006, č. 32, s. 153–164.
- * KELLOG, C. E. Conflicting Doctrines about Soils. *The Scientific Monthly*. 1948, č. 66, s. 475 – 478.
- * KUBIĚNA, W. L. *Micropedology*. Ames, Iowa: Collegiate Press, 1938, 243 str.
- * LAVELLE, P., D. BIGNELL, M. LEPAGE, W. WOLTERS, P. ROGERS, P. INESON, O. W. HEAL a S. DHILLION. Soil Function in a Changing World: the Role of Invertebrate Ecosystem Engineers. *European Journal of Soil Biology*. 1997, č. 33, s. 159–193.
- * MERTL, J., T. PONOCNÁ, K. VOČADLOVÁ, N. BUCHTA, M. ROLLEROVÁ, P. SLAVÍKOVÁ a J. POKORNÝ. *Zpráva o životním prostředí České republiky 2012* [online]. Cenia, Praha [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.cenia.cz/>.
- * MEYSMAN, F. J. R., J. J. MIDDELBURG a C. H. R. HEIP. Bioturbation: a Fresh Look at Darwin's Last Idea. *Trends in Ecology and Evolution*. 2006, č. 21, s. 688–695.

- * MÜCKENHAUSEN, E. The Scientific Work of Prof. Prof.h.c.Dr. Dr.h.c. Walter L. Kubiena. *Geoderma*. 1967, č. 1/3–4, s. 165–174.
- * PEŠEK, J., J. ADÁMEK, R. BRZOBOHATÝ, M. BUBÍK, I. CICHA, J. DAŠKOVÁ, N. DOLÁKOVÁ, A. ELZNIC, O. FEJFAR, J. FRANCŮ, Š. HLADILOVÁ, K. HOLCOVÁ, J. HONĚK, K. HOŇKOVÁ, Z. JURKOVÁ, J. KRÁSNÝ, O. KREJČÍ, J. KVAČEK, Z. KVAČEK, V. MACŮREK, S. OPLUŠTIL, R. MIKULÁŠ, P. PÁLENSKÝ, P. ROJÍK, P. SKUPIEN, J. SPUDIL, I. SÝKOROVÁ, J. ŠIKULA, L. ŠVÁBENICKÁ, V. TEODORIDIS, F. TITL, P. TOMANOVÁ-PETROVÁ, J. ULRYCH a kol. *Terciérní pánve a ložiska hnědého uhlí České republiky*. Česká geologická služba, 2010.
- * PETRÁNEK, J. *Malá encyklopedie geologie*. České Budějovice: Jih, 1993, 248 str.
- * PRACH, K. Succession of Vegetation on Dumps from Strip Coal Mining, N. W. Bohemia, Czechoslovakia. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*. 1987, č. 22/4, s. 339–354.
- * PRACH, K. Ekologie obnovy narušených míst I. Obecné principy. *Živa*. 2009, č. 1.
- * REICHMANN a kol. *Vliv těžby na životní prostředí České republiky*. Český geologický ústav ve spolupráci s Kartografií Praha, 1992. ISBN 80-7075-113-4.
- * ROJÍK, P. New Stratigraphic Subdivision of the Tertiary in the Sokolov Basin in Northwestern Bohemia. *Journal of the Czech Geological Society*. 2004, č. 49/3–4.

- * RUSEK, J. Soil Forming of Collembola and Acarina. *Pedobiologia*. 1975, č. 15/4, s. 299–308.
- * RUSEK, J. Biodiversity of Collembola and their Functional Role in the Ecosystem. *Biodiversity and Conservation*. 1998, č. 7, s. 1207–1219
- * RUSEK, J. Síla sukcese. Úloha půdních živočichů v sukcesi. *Živa*. 2006, č. 4, s. 174.
- * RUSEK, J. Vhledy do půdy. *Živa*. 2008, č. 2, s. 94.
- * ŘEHOUNEK, J. (ed.), K. ŘEHOUNKOVÁ (ed.) a K. PRACH (ed.). *Ekologická obnova území narušených těžbou nerostných surovin a průmyslovými deponiemi*. 2010. Calla, České Budějovice, 175 str.
- * SHORT, M. N. *Microscopic Determination of the Ore Minerals*. United States, Washington: Government printing office, 1931.
- * SKALOŠ, J., K. BERCHOVÁ, J. POKORNÝ, T. SEDMIDUBSKÝ, E. PECHAROVÁ a I. TRPÁKOVÁ. Landscape Water Potential as a New Indicator for Monitoring Macrostructural Landscape Changes. *Ecological Indicators*. 2014, č. 36, s. 80–93.
- * SRIVASTAVA, P. a D. SAUER. Thin-section Analysis of Lithified Paleosols from Dagshai Formation of the Himalayan Foreland: Identification of Paleopedogenic Features and Diagenetic Overprinting and Implications for Paleoenvironmental Reconstruction. *Catena*. 2014, č. 112, s. 86–98.
- * STOOPS, G. Seventy Years' „Micropedology“ 1938–2008: The Past and Future. *Journal of Mountain Science*. 2009, č. 6/2, s. 101–106.

- * STARÝ, J., I. SITENSKÝ, D. MAŠEK, T. HODKOVÁ, P. KAVINA , O. MAN, L. RICHTEROVÁ a R. KACHLÍKOVÁ. Surovinové zdroje České republiky, nerostné suroviny 2013. Ministerstvo životního prostředí. *Česká geologická služba Praha*. Říjen 2013, 305 str.
- * ŠOURKOVÁ, M., J. FROUZ a H. ŠANTRŮČKOVÁ. Accumulation of Carbon, Nitrogen and Phosphorus during Soil Formation on Alder Spoil Heaps after Brown-Coal Mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma*. 2005, č.124/1–2, s. 203–214.
- * ŠTÝS, S., K. DIMITROVSKÝ, F. JONÁŠ, Š. NEUBERG, J. PAŘÍZEK, C. PATEJDL, D. SMOLÍK, F. ŠPIŘÍK, V. THIELE, V. TOBĚRNÁ a J. VESECKÝ. *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- * ŠTÝS, S. Systémová analýza vlivů povrchové těžby na přírodní složky krajiny. *Uhlí*. 1981, č. 29/4.
- * TESKEY, R. O. a T. M. HINCKLEY. Influence of Temperature and Water Potential on Root Growth of White Oak. *Physiologia Plantarum*. 1981, č. 52/3, s. 363–369.
- * VAVROUŠEK, J. Úvodní text. In: KOUDELKA, J. *Černý trojúhelník Podkrušnohoří*. Nakladatelství Vesmír, 1994. ISBN: 80-901131-4-1.
- * WILKINSON, M. T. a G. S. HUMPHREYS. Exploring Pedogenesis via Nuclide-based Soil Production Rates and OSL-based Bioturbation Rates. *Australian Journal of Soil Research*. 2005, č. 43, s. 767–779.

* Zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), ve znění pozdějších předpisů (změny: 541/1991 Sb., 10/1993 Sb., 168/1993 Sb., 366/2000 Sb., 132/2000 Sb., 258/2000 Sb., 315/2001 Sb., 61/2002 Sb., 320/2002 Sb., 150/2003 Sb., 3/2005 Sb., 386/2005 Sb., 313/2006 Sb., 186/2006 Sb., 296/2007 Sb., 157/2009 Sb., 227/2009 Sb., 281/2009 Sb., 85/2012 Sb., 350/2012 Sb., 498/2012 Sb.).