

UNIVERZITA KARLOVA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA FYZICKÉ GEOGRAFIE A GEOEKOLOGIE



Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie

Bc. Kateřina Freyerová

NÍŽINNÉ PODZOLY V ČESKU A JEJICH ROLE V UHLÍKOVÉ BILANCI PŮD

AZONAL PODZOLS IN CZECHIA AND THEIR ROLE IN SOIL CARBON BALANCE

Diplomová práce

Vedoucí práce: *RNDr. Luděk Šefrna CSc.*

Praha 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 27. 4. 2013

Kateřina Freyerová

Poděkování

Na tomto místě bych za cenné připomínky, rady a trpělivost chtěla poděkovat vedoucímu práce RNDr. Lud'ku Šefrnovi CSc. Velmi také děkuji paní Aleně Homolové, za pomoc s přípravou dat pro trojrozměrnou vizualizaci. Dále bych chtěla poděkovat Bc. Petře Polické za analýzu některých vzorků pro stanovení Cox. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat také všem kolegům za pomoc při terénních výjezdech a své rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá nížinnými podzoly v Česku, s důrazem na sekvestraci uhlíku v jejich podpovrchových horizontech a jejich rolí v uhlíkové bilanci půd. Pro tyto účely byly v ČR vybrány dvě lokality s arenickými podzoly – Ralsko a Týnec nad Labem. V těchto dvou lokalitách byla spočítána zásoba uhlíku ve všech horizontech a byly analyzovány vybrané vlastnosti půdy ovlivňující tuto zásobu. Pro Týnec vychází zásoba uhlíku $21,107 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, pro Ralsko $25,064 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, resp. $49,97 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ podle podrobnosti dat o mocnostech horizontů použitých při výpočtu. Značná část této zásoby se přitom nachází v podpovrchových horizontech pod hranicí 30 cm.

Profil z Ralska byl dále zpracováván – proběhla vizualizace zásob uhlíku v jednotlivých horizontech a její průběh. Protože zásoba uhlíku v daném horizontu je závislá na jeho mocnosti, která je u nížinných podzolů značně proměnlivá, byla provedena trojrozměrná vizualizace průběhu horizontů v rámci půdního profilu z Ralska. Byly také nastíněny možné příčiny této variability.

Klíčová slova: podzol arenický, nížinný podzol, uhlík, zásoba uhlíku, vývraty.

Abstract

The aim of this thesis is characterization of azonal podzols in Czechia and their role in soil carbon balance. The emphasis was put on carbon sequestration at subsurface mineral horizons. Two localities with this type of podzol were chosen: Ralsko and Týnec nad Labem. Carbon density was calculated for these two profiles: $21,107 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ for Týnec and $25,064 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ for Ralsko. When the detailed data about horizons were used, the carbon density for Ralsko was $49,97 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. A lot carbon is located in subsurface horizons under 30 cm border.

There were additional outputs from Ralsko profile - carbon density visualization for all soil horizons and its course. Carbon density depends on soil horizons thickness which is very variable in azonal podzol case, therefore it was visualised as well. Possible causes of this variability was sketched.

Keywords: azonal podzol, carbic podzol, humods, carbon density, windthrow.

Obsah

1. Úvod	12
2. Teoretická část	14
2.1. Podzoly v Česku	14
2.1.1. Stratigrafie profilu nížinného podzolu.....	16
2.2. Organická hmota v podzolu - její chemie a specifika.....	18
Selektivní rozklad organické hmoty	19
2.3. Datování stáří podzolů	20
2.4. Vybrané půdní vlastnosti.....	21
2.4.1. Objemová hmotnost.....	21
2.4.2. Zásoby organické hmoty a uhlíku v půdě.....	22
2.5. Projekty věnující se uhlíku v krajině v České republice.....	23
2.5.1. Kvantifikace zásob uhlíku v lesních půdách	24
2.5.2. Možnosti kvantifikace uhlíku v půdě	28
2.6. Pedoturbace.....	30
2.6.1. Vývraty	31
2.6.2. Datování stáří vývratů	36
2.6.3. Trvanlivost vývratového mikroreliefu	37
2.6.4. Specifika vývratů na podzolech.....	38
3. Zájmové území a jeho fyzickogeografická charakteristika	39
3.1.1. Lokalita Ralsko Vrchbělá	39
3.1.2. Lokalita Týnec nad Labem	42
3.2. Lokality s vývraty	44
4. Metodika.....	45
4.1. Objemová hmotnost.....	46
4.2. Uhlík	47
4.3. Mocnosti horizontů	47
4.4. Vizualizace přechodů horizontů.....	48
4.5. Výpočet zásob uhlíku v podzolech a jejich vizualizace.....	49
4.6. Vizualizace vývratišť	49
4.7. Použité statistické metody	50
5. Výsledky a jejich komentář	52
5.1. Mocnosti horizontů.....	52
5.2. Objemová hmotnost.....	53
5.3. Vizualizace prostorové variability přechodů jednotlivých horizontů	56
5.4. Vizualizace vývratů.....	59
5.4.1. Brenná.....	59
5.4.2. Jižní svah	60
5.4.3. U Maršů	61
5.4.4. Doksy.....	62
5.5. Obsah uhlíku v půdě	63
5.6. Zásoba uhlíku v půdě a její vizualizace	66
5.6.1. Zásoby pomocí jedné hodnoty mocnosti	66
5.6.2. Zásoby uhlíku v půdě z podrobných mocností horizontů.....	67
5.6.3. Průběh zásob uhlíku v půdním profilu	70
6. Diskuze	72

6.1. Porovnání objemových hmotností	72
6.2. Organický uhlík	73
6.3. Zásoby uhlíku v půdě.....	75
7. Závěr.....	79
8. Použitá literatura.....	80
8.1.1. Internetové zdroje	85
8.1.2. Ostatní.....	85
9. Přílohy	Chyba! Záložka není definována.

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozšíření podzolů, kryptopodzolů a podzolů arenických v Česku	15
Obr. 2: Stratigrafie podzolu arenického, ortštejn.....	16
Obr. 3: Světlé skvrny v profilu – selektivní rozklad OH.....	19
Obr. 4: Střední obsah uhlíku podle výškových pásem.....	23
Obr. 5: Střední zásoba uhlíku podle výškových pásem	24
Obr. 6: Zásoby uhlíku v epipedonu lesních půd	27
Obr. 7: Profil a jednotlivé segmenty vývratiště	31
Obr. 8: Dřevěné zbytky kmene v čelní straně kupy.....	33
Obr. 9: Zbytky sněhu v depresích vývratiště.	33
Obr. 10: Půda ve vývratišti po A) 20-30 letech, B) 50-60 letech, C) 80-100 letech.....	35
Obr. 11: Vztah věku semenáčku smrku a jeho výšky	36
Obr. 12: Profil arenického podzolu na lokalitě Ralsko. Žilky s organickým materiálem uvnitř Bs. Formování záteků podél kořenu stromu.	41
Obr. 14: Profil arenického podzolu z lokality Týnec nad Labem.....	43
Obr. 15: Lokality s vývraty.....	44
Obr. 16: Čelní strana profilu výkopu podzolu v Ralsku.	45
Obr. 17: Válečky pro odběr vzorků půdy na stanovení objemové hmotnosti.	46
Obr. 18: Schéma extrapolace mocností horizontů pro jednotlivé profily v Ralsku.....	48
Obr. 19: Průběh obj. hmotností směrem do hloubky půdy v Ralsku.....	54
Obr. 20: Průběh obj. hmotnosti směrem do hloubky profilu v Týnci.....	55
Obr. 21: Přejít mezi povrchem a Ah horizontem.	57
Obr. 22: Přejít mezi Ah a E horizontem.	57
Obr. 23: Přejít mezi E a Bhs horizontem.....	58
Obr. 24: Přejít mezi Bhs a Bs horizontem.....	58
Obr. 25: Schéma průřezu vývratištěm, lokalita Brenná,	60
Obr. 26: Schéma vývratiště Jihozápadní svah.	61
Obr. 27: Schéma průřezu vývratištěm, lokalita U Maršů	62
Obr. 28: Schéma vývratiště v lokalitě Doksy. Oranžovou barvou je znázorněn ortštejn, černou skelet v kořenovém balu. Délka profilu vývratiště je 130 cm.	63
Obr. 29: Obsah Cox v jednotlivých horizontech podzolu z lokality Ralsko..	64

Obr. 30: Obsah uhlíku v jednotlivých horizontech profilu podzolu arenického z lokality Týnec n. L.....	65
Obr. 31: Vizualizace zásob uhlíku v celém profilu.....	69
Obr. 32: Průběh zásoby uhlíku v jednotlivých horizontech a celková zásoba v pátém profilu	71
Obr. 33: Množství uhlíku C _{to} (%) v minerálních horizontech podzolů severní a východní Evropy.....	74
Obr. 34: Zásoby uhlíku v podzolech ve svrchním 1 m.....	75
Obr. 35: Zásoba uhlíku v podzolech s různým hydrologickým režimem ve Švédsku.	76

Seznam tabulek

Tab. 1: Objemové hmotnosti pro vybrané profily podzolů	21
Tab. 2: Množství uhlíku poutaného v humusové vrstvě a ve svrchních vrstvách minerální půdy u vybraných ekosystémových jednotek.....	26
Tab. 3: Půdní kategorie (pro lesní i zemědělské půdy) podle zásoby C _{ox} v t.ha ⁻¹ a jejich plošné zastoupení z půdní map.....	27
Tab. 4: Určení relativního stáří podle stupně rozkladu kmene	36
Tab. 5: Zařazení lokality Ralsko podle geomorfologického členění ČR.....	39
Tab. 6: Charakteristika mírně teplé oblasti	40
Tab. 7: Průměrné mocnosti horizontů zkoumaného profilu.	41
Tab. 8: Zařazení lokality Týnec nad Labem podle geomorfologického členění ČR.....	42
Tab. 9: Charakteristika velmi teplé oblasti	42
Tab. 10: Objemy použitých válečků	46
Tab. 11: Mocnosti horizontů profilu z lokality Ralsko.....	52
Tab. 12: Mocnosti horizontů profilu z lokality Týnec nad Labem.	52
Tab. 13: Vybrané charakteristiky polohy a variability mocností jednotlivých horizontů profilu z Ralska.....	53
Tab. 14: Redukované objemové hmotnosti jednotlivých horizontů v profilu Ralsko	54
Tab. 15: Vybrané míry polohy pro redukovanou objemovou hmotnost B _{hs} horizontu z profilu Ralsko	54
Tab. 16: Redukované objemové hmotnosti jednotlivých horizontů z profilu Týnec.	55

Tab. 17: Obsahy Cox v různých částech profilu PZr z Ralska.	64
Tab. 18: Obsah Cox v horizontech PZr z Týnce.....	65
Tab. 19: Zásoba uhlíku získaná prostým aplikováním vzorce na jednu hodnotu mocnosti horizontu, bez zjišťovaných podrobných hodnot mocností horizontů. Ralsko.	66
Tab. 20: Zásoba uhlíku v profilu podzolu z Týnce.	67
Tab. 21: Zásoba uhlíku v horizontech PZr z Ralska, aplikováním podrobných mocností z celého výkopu. Uvedené zásoby jsou v kg.m^{-2}	68
Tab. 22: Vybrané půdní vlastnosti podzolu z Německa. Upraveno podle Schultze et al. (2009).	73
Tab. 23: Množství Corg (%) ve vybraných horizontech podzolů různého stáří.....	74
Tab. 24: Průměrné zásoby uhlíku (MC) v profilech o ploše 1m^2 (1m hlubokých).	76
Tab. 25: Kvantifikace zásob uhlíku pro hranici nad a pod 30 cm. Ralsko,	78
Tab. 26: Kvantifikace zásob uhlíku pro hranici nad a pod 30 cm. Týnec	78
Tab. 27: Kvantifikace zásob uhlíku pro hranici nad a pod 30 cm. Ralsko pomocí podrobných mocností horizontů	78

Seznam příloh

- Příloha 1: Poloha zájmového území v Ralsku **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 2: Poloha zájmové lokality Týnec nad Labem... **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 3: Znázornění zásob uhlíku v horizontech Ah a E z Ralska **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 4: Znázornění zásob uhlíku v horizontech Bhs a Bs z Ralska **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 5: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 1 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 6: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 2 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 7: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 3 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 8: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 4 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 9: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 5 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 10: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 6 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 11: Průběh zásob uhlíku v profilu č. 7 **Chyba! Záložka není definována.**
- Příloha 12: Tabulka s výpočty zásob uhlíku v jednotlivých bodech sítě 15x10 cm vytvořené z fotografií 1-7 a řezů 1-15. **Chyba! Záložka není definována.**

Seznam zkratek a pojmů

- O – horizont nadložního humusu, organický
- Ah – humózní lesní horizont, organominerální
- AhE – směs E a Ah horizontu, minerální
- Ep, E – podzolizací vybělený horizont, minerální
- Bhs - humusoseskvioidický horizont, minerální
- Bsh – humusoseskvioidický horizont, minerální
- Bs – spodický horizont, minerální
- EBs – směs horizontu E a Bs, minerální
- C – půdotvorný substrát
- PZr – podzol arenický
- PZm – podzol modální
- Cox – uhlík, získaný metodou mokré oxidace
- OH – organická hmota
- BD – bulk density, redukovaná objemová hmotnost
- TKSP ČR – Taxonomický klasifikační systém půd ČR
- ÚHUL – ústav pro hospodářskou úpravu lesa
- ÚSBE – ústav systémové biologie a ekologie
- IFER – ústav pro výzkum lesních ekosystémů
- Epipedon – svrchních 30 cm půd, zahrnuje organické a organominerální horizonty

1. Úvod

V současnosti vystupují klimatické změny a koloběh uhlíku jako celospolečenské téma, o kterém se vedou bouřlivé diskuze. Probíhá snaha o co nejpřesnější kvantifikaci množství uhlíku v krajině a jeho toků. V rámci těchto snah bylo zjištěno, že významným úložištěm uhlíku je půda, jak zemědělská, tak lesní. Ukazuje se, že půdy mohou mít novou funkci, a to právě úložiště uhlíku.

Podzoly patří k celosvětově rozšířeným půdám. Vyskytují se jako typická zonální půda boreálního pásma a tajgy. Hlavními oblastmi výskytu jsou Skandinávie, Rusko, Polsko, severní Německo, Nizozemí, Kanada, oblast velkých jezer v USA. Aazonálně se nachází na minerálně chudých substrátech, a to jak v tropech, tak i na písčítých substrátech a kvartérních glaciálních sedimentech v mírných šířkách. Proti podzolům zonálním a horským byly ve střední a východní Evropě aazonální podzoly identifikovány jako půdy s významnou zásobou uhlíku (Baritz et al. 2005). Podzoly patří mezi půdy s největším obsahem uhlíku mimo humusový horizont, tzn. v minerální půdě. Tyto zásoby mají velkou variabilitu v prostorovém rozložení, variační koeficient dosahuje hodnoty 146 % (Batjes 2002).

Organické horizonty mají nejmenší prostorové rozdíly v obsahu organického uhlíku (Liski a Westman 1997, Dégórski 2007), jsou tedy z hlediska obsahu Cox poměrně homogenní. Proto je kvantifikace obsahu uhlíku v půdě pouze na základě hodnot Cox z těchto horizontů, resp. ze svrchních 30 cm půdy, kde jsou zastoupeny převážně tyto organické horizonty, poměrně jednoduchá. Nezahrnutím humusem bohatých minerálních horizontů a hlubokých humusem bohatých orničních horizontů hlouběji 30 cm dochází ke zkreslení zásob uhlíku jak v zemědělských (Ac a Ap u černozemí a černic, koluvizemí a fluvizemí), tak i v lesních půdách (Bh a Bhs horizonty podzolů). V případě kambizemí mírného pásma se může hlouběji v půdě (v B a C horizontech) nacházet až 47 % organického uhlíku, u podzolů to pak může být až 75 % organického uhlíku (Rumpel et al. 2002).

Data v mapě zásob uhlíku v lesních půdách v ČR, která byla jedním z výstupů projektu CzechCarbo, tedy nereprezentují jeho skutečnou zásobu. Jsou dána mocností organických horizontů a objemovou hmotností sušiny nadložního humusu.

Původně bylo plánem prozkoumat a porovnat všechny lokality s nížinnými podzoly

v ČR, tento záměr ale přesahuje možnosti této práce. Proto byly vybrány dvě lokality s výskytem arenických podzolů – Ralsko a Polabí. Ačkoli v obou těchto lokalitách byl jako půdní typ diagnostikován podzol arenický, jednotlivé půdy se od sebe morfologicky liší, což znesnadňuje možnosti porovnání. Pro účely kvantifikace zásob uhlíku v hlouběji položených horizontech ale tyto dva profily postačují, neboť v obou případech se horizonty s výraznějším obsahem a akumulací uhlíku vyskytují i pod hranicí 30 cm.

Tato práce si klade za cíl přispět k charakterizaci nížinných neboli arenických podzolů v České republice a zhodnotit jejich roli v uhlíkové bilanci půd. Budou analyzovány vybrané vlastnosti nížinných podzolů, se zvláštním důrazem na sekvestraci uhlíku v podpovrchových horizontech. Dále budou zkoumány faktory ovlivňující zásoby uhlíku a jejich rozmístění v profilech podzolů. Proběhne snaha charakterizovat prostorovou variabilitu profilu nížinných podzolů a nastínit její příčiny.

Veškeré fotografie a grafické výstupy, u kterých není uveden zdroj, jsou autorčiny vlastní.

2. Teoretická část

2.1. Podzoly v Česku

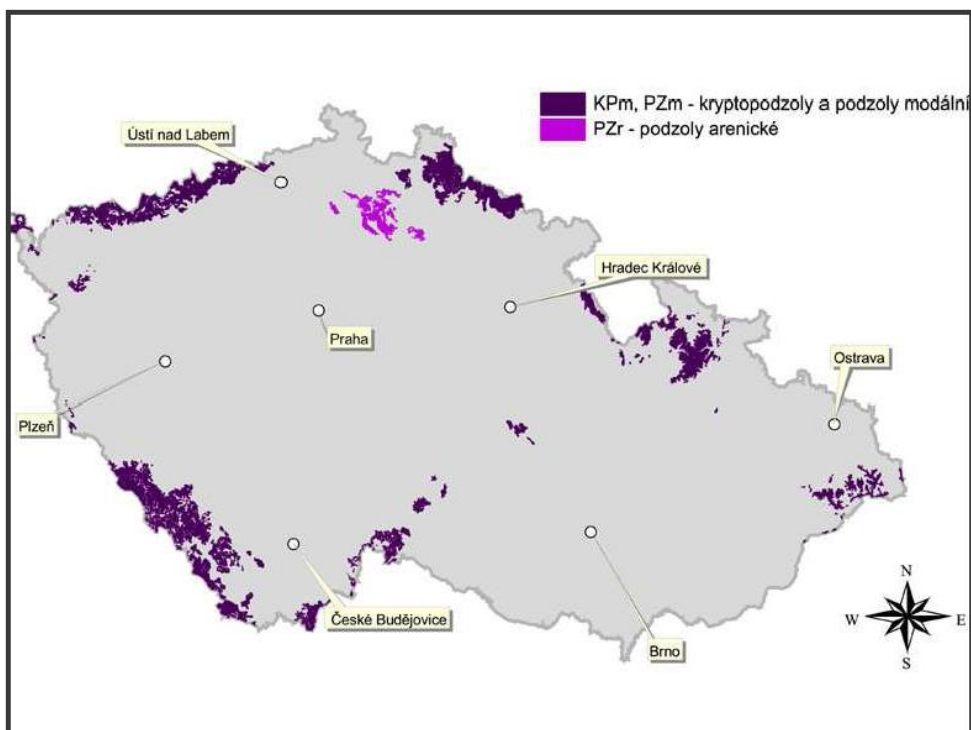
Podzoly se dělí do dvou hlavních kategorií – zonální a azonální. Zatímco zonální půdy jsou pro danou klimatickou oblast typické a vyskytují se nezávisle na geologickém podloží, půdy azonální se v oblasti vyskytují v závislosti na geologickém podloží anebo jsou podmíněny klimaticky. V případě podzolů v ČR tyto dvě skupiny reprezentují podzoly horské a nížinné. Stratigrafií půdního profilu se od sebe tyto dva podzoly příliš neliší. Hlavním rozdílem jsou látky, které jsou transportovány při podzolizaci. V případě horských podzolů jde převážně o seskvioxidy, což jsou oxidy hliníku a trojmocného železa (Němeček a kol. 2011). V nížinných podzolech, které se vyskytují na minerálně chudých substrátech, je primárně transportována organická hmota (Němeček a kol. 1990).

Horské podzoly se u nás vyskytují ve vyšších nadmořských výškách. Nacházejí se především na kyselých metamorfovaných i vyvěřelých horninách (Němeček a kol. 2011). Jejich vznik je dán především extrémními klimatickými a vegetačními podmínkami. Ty jsou charakteristické nízkými teplotami a vysokými srážkami zapříčiňujícími nevysychavost půdního profilu. Nachází se v lesních vegetačních stupních 7 a 8, v bukovo-smrkovém a smrkovém, kde je dostatek kyselého opadu jehličnanů (Němeček a kol. 2001). Podle Taxonomického klasifikačního systému půd ČR (TKSP, Němeček a kol. 2001) se tento podzol označuje jako podzol modální (PZm). Podzoly modální se nacházejí takřka ve všech českých pohraničních pohořích na metamorfovaných horninách (Krkonoše, Jizerské hory, Krušné hory, Šumava). Menší je jejich výskyt na Moravě, kde je nalezneme jen v Jeseníkách a v menší míře v Beskydech.

Podzoly nížinné se vyskytují v oblastech, které odpovídají lesnímu vegetačnímu stupni 3, dubovo-bukovému (Němeček a kol. 2001). Zde je mnohem teplejší klima než v horských oblastech, často i nižší úhrny srážek, takže profil může občas prosychat. Při periodickém prosychání půdního profilu se může vytvářet ortštejn nebo celé ortštejnové horizonty (Němeček a kol. 2001, viz obr. 2). Ten je výsledkem procesu transportu a akumulace organokovových látek s vyšším zastoupením organické hmoty (Němeček a kol. 1990). Taxonomický systém (Němeček a kol. 2001) tyto podzoly klasifikuje jako podzol arenický (PZr). Nacházejí se ve stejných klimatických oblastech jako hnědozemě a

luziště, které jsou často lokalizovány jen o pár kilometrů dál. Právě tyto nížinné podzoly mohou ve svých Bhs horizontech obsahovat značné množství organické hmoty, a to i více než 5 % (Němeček a kol. 2001).

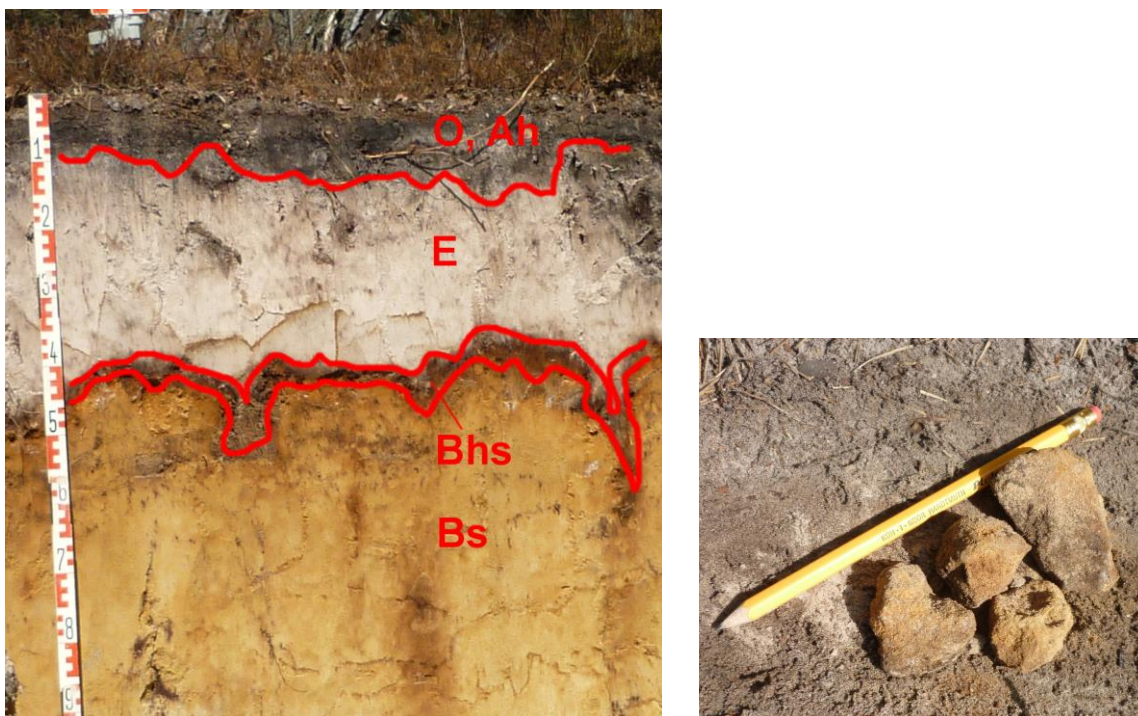
Výskyt arenických podzolů v České republice je vázán na písčité substráty. Jedná se především o oblasti s mesozoickými sedimenty. V Česku jsou tyto sedimenty reprezentovány Českou křídovou tabulí, dále se jedná o Třeboňsko a Českobudějovicko. Právě severní části České křídové tabule dominují facie kvádrových pískovců, charakterizované převládajícím písčitém materiálem (Chlupáč et al 2011), na kterých se nížinné podzoly často vyskytují. Další typickou lokalitou výskytu nížinných podzolů v ČR je Polabí, kde se vyskytují i nižších lesních vegetačních stupních, než ve třetím. Podzoly se zde vyskytují na říčních terasách a v lokalitách, které nejsou překryty sprašovými formacemi a polygenetickými hlínami, ale písčitémi eolickými sedimenty. Často se jedná o lokality jen několik desítek metrů od obdělávaných černozemí a hnědozemí. V Jižních Čechách se podzoly vyskytují v Třeboňské pánvi, jejíž výplň tvoří sladkovodní svrchnokřídové a terciérní sedimenty (Chlupáč a kol. 2011). Orientační mapka rozšíření arenických podzolů v ČR je na obrázku 1. Nejsou zde však zohledněny lokality, kde se nížinné podzoly vyskytují minoritně (Polabí, Třeboňsko).



Obr. 1: Rozšíření podzolů, kryptopodzolů a podzolů arenických v Česku. (studijní materiály, Rohošková 2013)

2.1.1. Stratigrafie profilu nížinného podzolu

Podzoly, o kterých pojednává tato práce, se rozumí nížinné neboli arenické podzoly. Dle platného Taxonomického klasifikačního systému ČR (TKSP, Němeček a kol. 2001) jsou podzoly půdy s typickou stratografií O – Ah – Ep- Bhs – Bs – C. Stratigrafie je vyobrazena na obr. 2. Sorpční komplex podzolů je výrazně nenasycený, dosahuje hodnot $V_M < 35 \%$ (Němeček a kol. 2001).



Obr. 2: Stratigrafie podzolu arenického (PZr, vlevo) a ortšejn (vpravo).

Charakteristický je výrazně diferencovaný profil na eluviaci vybělený horizont Ep, a obohacený iluviální humusosekvioxidický spodický horizont Bs. Ep někdy může být migrujícím humusem a materiálem z Ah zbarven do šeda.

Spodický horizont Bs je diagnostickým horizontem podzolu. Dle TSKP ČR (Němeček a kol. 2001) je charakteristický výplní intergranulárních pórů matrice z hrubozrnných částic amorfními černohnědými (s převahou organické hmoty, svrchní část) a rezivými (s převahou seskvioxidů, spodní část) koloidy. Černohnědé koloidy obsahují převážně organickou hmotu, a nacházejí se ve svrchní části Bs, protože se imobilizují jako první, rezivé obsahují více seskvioxidů (Němeček a kol. 1990). Tím dochází k diferenciaci Bs na subhorizonty Bh, Bhs a Bsh Ty se od sebe liší kombinací poměrů obsahů organické

hmoty a seskvioxidů hliníku a železa, Bhs tedy obsahuje více organické hmoty, Bsh více seskvioxidů. Tyto horizonty jdou však od sebe v terénu rozeznat pouze velmi obtížně, neboť plynule přechází jeden do druhého. Bhs se také od Bs liší složením organických látek. Podle Němečka a kol. (1990) v Bhs převládají huminové kyseliny (62 %), v Bs jsou naopak dominantní složkou organických látek fulvokyseliny (63 %). Bh se dle Němečka a kol. (1990) je přítomný pouze u počátečních fází vývoje podzolu, kdy se Bs rozdělí na Bh a Bs. Časem je Bh obohacován seskvioxidy (především Fe) a tím se přeměňuje a diferencuje na Bhs a Bsh. V současnosti se podzoly s Bh horizontem v ČR nevyskytují (Němeček a kol. 2001).

Humusovou formou je převážně surový humus, mor. Humózní Ah horizont často není přítomný či snadno rozlišitelný a tvoří spolu s nadložním humusem heterogenní konglomerát (van Breemen a Buurman 2002).

Horizont C nemusí být na první pohled vůbec patrný, protože přechod mezi Bs a C horizontem může být nezřetelný a plynulý, popř. se C horizont nachází velmi hluboko.

Hlavním půdotvorným procesem je podzolizace, což je proces mobilizace a transportu komplexů železa a hliníku spolu s organickou hmotou ze svrchních částí půdního profilu směrem do větších hloubek, kde se následně tyto sloučeniny akumulují. Organické sloučeniny jsou získávány v O a Ah horizontu rozkladem opadu a z rostlinných a houbových exudátů. Tyto organické sloučeniny způsobují uvolnění železa a hliníku a vytváří s nimi mobilní komplex. Ten se pak díky perkolující vodě dostává dále do hlubších partií půdního profilu, kde se imobilizuje, vysráží a zformuje tak B horizont (van Breemen a Buurman 2002, Schaeztl a Anderson 2005, Lundström et al. 2000). Jednotlivé teorie podzolizace se liší především ve způsobu, jakým je organická hmota uvolňována a jaký mechanismus způsobuje imobilizaci a srážení organické hmoty H a Fe a Al iontů hlouběji v profilu. V boreálních podzolech jsou hliník a železo imobilizovány díky rozkladu organické části komplexu heterotrofními organismy (Lundström 1995 in Buurman et al. 2005), zatímco část kovu je pravděpodobně připojena k větším organickým molekulám (van Breemen a Buurman 2002). Pro tuto práci ale není podrobná teorie podzolizace rozhodující, proto se jí zde nebudu blíže věnovat (viz Schaeztl a Anderson 2005, Lundström et al. 2000, van Breemen a Buurman 2002, Buurman a Jongmans 2005).

Geneze B horizontu, která je pro tuto práci podstatnější, než podrobné řešení problematiky podzolizace, zatím také není úplně objasněna. Zatímco dle obecné teorie

podzolizace je B horizont formován především díky obohacování o organickou hmotu a seskvioxidy, v mnoha podzolech vzniká B horizont z lokálního rozkladu kořenů *in situ* (Nierop, 1998, van Breemen a Buurman 2002, Buurman a Jongmans 2005, Buurman et al. 2005). Tento mechanismus se uplatňuje především u iniciálních podzolů, což ve své práci pozorovali Nierop a Buurman (1999), kteří identifikovali v B horizontu mladých podzolů část organické hmoty rostlinného původu (17-37 %).

Ochuzený a vybělený Ep horizont se díky opakovanému rozpouštění a odnosu organokovových komplexů do svrchní části B horizontu, a následnou dekompozicí zbývající nevázané organické hmoty, vyvíjí a rozšiřuje směrem do hloubky (Buurman a Jongmans 2005). Na druhou stranu, Buurman et al. (2005), jež zkoumal složení organické hmoty v podzolech, došel k závěru, že E horizont je formován a rozšiřován oxidací organické hmoty ze svrchní části B horizontu. K biologické homogenizaci Ep horizontu nedochází kvůli nízkým hodnotám pH (Buurman et al. 2007).

2.2. Organická hmota v podzolu - její chemie a specifika

Organickou hmotou v půdě se rozumí soubor organických zbytků rostlinného, mikrobiálního a živočišného původu, který je v různém stadiu rozkladu (Nierop 1998, Schaetzl a Anderson 2005). Organický uhlík tvoří 45-60 % tohoto organického souboru (van Breemen a Buurman 2002). Jednotlivé typy organické hmoty a uhlíku v půdě jsou velmi dobře popsány v diplomové práci Bláhové (2009). V této práci se pojednává výhradně o uhlíku organickém, a nikoli anorganickém, který se do půdy dostává z vápnatých sloučenin.

Složení organické hmoty v profilu podzolu ovlivňuje přísun organiky z kořenového systému a její rozklad, a půdotvorný proces – podzolizace (Rumpel et al. 2002). Uhlík je v půdním profilu transportován ve formě rozpuštěného organického uhlíku (DOC – dissolved organic carbon), který pochází především ze svrchních organických horizontů (Rumpel et al. 2002). Tímto je poněkud komplikována možnost datování stáří podzolů pomocí radiokarbonové metody, protože stáří půdního uhlíku směrem do hloubky nenarůstá (van Breemen a Buurman 2002).

V A horizontech a dobře odvodněných B horizontech se nejčastěji vyskytuje organická hmota rostlinného původu (kořínky a spol.), oproti tomu v zamokřených B horizontech, kam kořeny vegetace běžně nedosahují, převládá OH ve formě povlaků

(Buurman et al. 2005).

Nejčastěji se OH v podzolech skládá z uhlovodíků skupin alkyl- (tuky s dlouhými řetězci, steroly, alkylové aromatické uhlovodíky) a *O*-alkyl- (C v ligninu a uhlovodících), a to nezávisle na geografické poloze, vegetaci, podloží a stavu podzolizace (Wilcken et al. 1997). V B horizontech většiny podzolů převládají fulvokyseliny, vyskytují se ale i podzoly, v jejichž B horizontech převládají huminové kyseliny (Wilcken et al. 1997). Dle Rumpel et al. (2002) má v B horizontech podzolů většinový podíl organická hmota s vysokým stupněm oxidace. Ta je díky podzolizaci (především migraci uhlíku v půdním profilu a přísunu organické hmoty z kořenového systému) chudá na jednoduché aromatické (arylové) uhlíky.

Selektivní rozklad organické hmoty

U některých podzolů jsou patrné světlejší skvrny (obr. 3), které se mohou vyskytovat napříč celým profilem, ve všech horizontech. Tento fenomén je často k vidění v Nizozemí, Belgii a v severním Německu. Byl rovněž pozorován na podzolech třetihorního stáří, které byly recentně exponovány (Buurman et al. 2007). Světlé partie skvrn jsou od sebe odděleny tenkými liniemi tmavší barvy s vyšším obsahem organické hmoty. Skvrny se navzájem nepřekrývají, proto se původně považovaly za produkt rozkladu organické hmoty prostřednictvím hub (Dr. A. Akkermans, pers. communication in Buurman et al 2007). Protože se ale nacházejí ve všech částech půdního profilu podzolu, u kterých se chemismus mezi jednotlivými horizonty značně liší, je pravděpodobnější, že organické zbytky jsou rozkládány pomocí mikroorganismů selektivně podle jejich potravních preferencí. To může vést ke vzniku reziduí organiky, kterou organismy nepreferují (Buurman et al. 2007). Tyto změny jsou způsobeny jednak oxidací (rozkladem) méně odolných rostlinných složek, a částečně také nárůstem mikrobiální organické hmoty v silně ochuzených částech profilu.



Obr. 3: Světlé skvrny vzniklé selektivním rozkladem OH.

Organická hmota vzniklá mikrobiálním rozkladem ve skvrnách také ukazuje posun chemismu z B směrem k E horizontu. Toto podporuje teorii, že formování E horizontu je mimo jiné způsobeno rozkladem organické hmoty z původního B horizontu (Buurman et al. 2005), k čemuž dochází právě tímto mikrobiálním rozkladem (Buurman et al. 2007). Mikroorganismy odpovědné za vznik skvrn nejsou nijak inhibovány přítomností volných seskvioxidů (Buurman et al 2007). Buurman et al (2005) rovněž ukázal, že Ah horizont, který byl překryt písčitém substrátem, se časem stává z hlediska organické hmoty chemicky podobnější E horizontu. I toto se připisuje selektivnímu rozkladu organické hmoty mikroorganismy dle jejich preferencí.

2.3. Datování stáří podzolů

Při procesu podzolizace uhlík migruje půdním profilem, nejčastěji ve formě rozpuštěného organického uhlíku (DOC dissolved organic carbon). Tento fakt způsobuje, že zjištěné radiokarbonové stáří (^{14}C) datovaného horizontu s převládající akumulací uhlíku může být nižší, než skutečné stáří (Rumpel et al. 2002). Tím se značně komplikuje datování půd, protože za normálních podmínek stáří půdního uhlíku v profilu narůstá směrem do hloubky, vlivem pomalejší dekompozice, menších interakcí uhlíku s okolím a menším přísunem čerstvé organické hmoty z nadložních horizontů (van Breemen a Buurman 2002).

Uhlík se výrazně akumuluje v horizontech Bh, Bhs a Bsh (Němeček a kol. 2001). Zde může dojít i k situaci, že minerální zrna jsou organickou hmotou doslova obalena (Rumpel et al. 2002). Tyto horizonty jsou na první pohled snadno rozeznatelné, protože se svou výrazně tmavou barvou odlišují od ostatních horizontů. Relativně nízké stáří uhlíku v humusosekvioxidických horizontech je způsobeno vyšším obratem uhlíku, který je zde poměrně rychle rozkládán různými mikroorganismy (van Breemen a Burrman 2002).

Protože jedním z požadavků světových klasifikací pro určení podzolu je i určitá mocnost diagnostických horizontů a obsah organických látek, zajímavou alternativní možností určování stáří podzolů stanovil Mokma et al. (2004). Ten určil vztah pro množství uhlíku v půdě na základě stáří spodického horizontu. Vychází z toho, že za určitý časový úsek se v Bs akumuluje určité množství uhlíku, podle vztahu:

$$C_{\text{org}} = 0,0002 \text{ time} + 0,1963$$

s hodnotou koeficientu determinace $r^2 = 0,77$. Z tohoto vztahu se dá i zpětně odvodit stáří zkoumaného profilu na základě množství uhlíku. Samozřejmě má tato metoda jistá omezení, především se jedná o její geografickou lokalizaci na písčité substráty ve Finsku. Nemůže být tedy považována za reprezentativní pro jiné lokality a substráty. Může však sloužit jako dobrý orientační odhad stáří, pokud nemáme k dispozici jiné metody.

2.4. Vybrané půdní vlastnosti

2.4.1. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost patří k důležitým půdním vlastnostem. Používá se k vyjádření stupně nakypření nebo utužení půdy. Její proměnlivost v prostoru je ovlivňována nejen litologickými faktory, ale i faktory biogenními, jako jsou obsah organické hmoty a prostorové rozložení kořenů rostlin (Poláková a kol. 2011). Nejnižší hodnoty objemové hmotnosti se vyskytují v organických horizontech, hodnoty pro surový humus a hrabanku nepřevyšují $0,12 \text{ g.cm}^{-3}$. Směrem hlouběji do půdy hodnoty objemové hmotnosti narůstají až k $\sim 1,8 \text{ g.cm}^{-3}$ v silně ulehých půdách (Sáňka a Materna 2004).

Průměrné hodnoty objemové hmotnosti podzolů z práce Degórskiho (2007) jsou shrnuty v tabulce č. 1, pohybují se v průměru mezi $1,25$ až $1,65 \text{ g.cm}^{-3}$. Hodnoty objemové hmotnosti ve východní a severní Evropě narůstají směrem k jihu, což je pravděpodobně způsobeno vyšší stupněm humifikace organické hmoty v teplejším podnebí (Degórski 2007).

Tab. 1: Průměrné (BD_m), krajní hodnoty (BD_{min} , BD_{max}) a směrodatná odchylka (d) objemové hmotnosti pro vybrané profily podzolů. Vysvětlivky: Group 1-Profilý z Finska, Group 2-ostatní profily. (upraveno podle Degórski 2007)

Genetic horizon	All analysed soils						Group I		Group II	
	BD_m	d	BD_{min}	no. of profile	BD_{max}	no. of profile	BD_m	d	BD_m	d
	g cm^{-3}			with BD_{min}	g cm^{-3}	with BD_{max}	g cm^{-3}			
podzolic soils										
AEs	1.30	0.12	1.05	28	1.49	3	1.42	0.04	1.25	0.09
Ees	1.42	0.11	1.12	28	1.58	3, 4	1.52	0.05	1.38	0.10
Bh	1.59	0.09	1.34	28	1.69	22, 32	1.61	0.04	1.58	0.09
Bfe	1.48	0.08	1.29	28	1.59	3, 4, 22	1.54	0.05	1.46	0.08
C	1.58	0.09	1.47	29	1.74	5	1.67	0.07	1.55	0.08

Z jeho výsledků také všechny profily zkoumaných podzolů ukazují zvýšení objemové hmotnosti v Bh ve srovnání s přilehlými horizonty (viz tab. XY).

2.4.2. Zásoby organické hmoty a uhlíku v půdě

Dle práce Posta et al. (1990) jsou přibližně dvě třetiny uhlíkových rezerv v lesních ekosystémech uchovány ve formě půdní organické hmoty. Prostorová variabilita těchto zásob uhlíku je podmíněna mocností horizontů a množstvím organického uhlíku v půdě.

Pokud je uvažována vertikální distribuce zásob (v anglicky. psané literatuře hustot) uhlíku, nejvyšší hodnoty se nacházejí dle očekávání v subhorizontech organických horizontů. Uhlík akumulovaný v těchto horizontech je mladší a homogennější oproti uhlíku v hlouběji položených minerálních horizontech (Liski et al. 1997 in Degórski 2007). V podzolech a kryptopodzolech analyzovaných Degórskim (2007) je organická hmota akumulována převážně ve spodní části organických horizontů a obsah uhlíku klesá spolu se stupněm humifikace organické hmoty směrem do hloubky. Organické horizonty mají také v rámci podzolů nejmenší prostorové rozdíly v obsahu uhlíku (Liski a Westman 1997, Degórski 2007), nehledě na jejich ovlivnění antropogenními zásahy, lesním managementem, sklizní z bylinného patra anebo lesními požáry.

V minerálních horizontech je situace s poklesem obsahu organické hmoty podobná, s výjimkou znatelného obohacení organickou hmotou v Bhs ve srovnání s přilehlými horizonty (Degórski 2007). Proměnlivost v obsahu organické hmoty v tomto horizontu je navíc díky množství záteků značná.

Výsledky Degórského (2007) ukazují, že z hlediska kvantity podzoly obsahují více organického uhlíku než kryptopodzoly, nicméně podíl organického uhlíku v poměru k ostatním složkám organické hmoty je vyšší u kryptopodzolů. Podzolové půdy tedy mají větší rezervy v zásobách uhlíku než kryptopodzoly, problémem ale je, že podzoly vykazují velkou diversitu charakteristik profil od profilu.

Obsah organického uhlíku v podzolech odráží limitovanější biologickou aktivitu v půdním prostředí (než je to mu u kryptopodzolů), nízký trofický status, intenzivnější iluviaci a transfer organického materiálu a organických složek. Zásoby uhlíku mají tendenci být vyšší v oblastech s humidnějším podnebím. Degórski (2007) pozoroval vyšší hodnoty především v severních a východních částech Severní a Východní Evropy. Podobné podmínky prostorové variability zásob organického uhlíku byly zjištěny

v podzolech ve Skandinávii (Liski a Westman 1995) a v severní části USA (Michaelson et al. 1996 in Degórski 2007).

2.5. Projekty věnující se uhlíku v krajině v České republice

V posledních několika letech proběhlo několik pokusů o kvantifikaci toků a zásob uhlíku v krajině. Zatímco kvantifikaci uhlíku akumulovaného v rostlinné biomase se věnuje poměrně velké množství prací i v České republice (např. projekt Monitoring stavu lesa v České republice, projekt Národní inventarizace lesa), kvantifikace zásoby uhlíku v půdě zatím proběhla pouze v projektu CzechCarbo, který probíhal mezi lety 2003 a 2007. Jeho cílem bylo „zkoumat schopnost krajiny České republiky vázat oxid uhličitý z atmosféry, dlouhodobě tento uhlík akumulovat, a tím zpomalovat proces globálního oteplování“ (ÚSBE 2003-2007). V rámci tohoto výzkumu byly mimo jiné kvantifikovány obsahy C v zemědělských a lesních půdách. Tomuto projektu se bude podrobněji věnovat kapitola 2.5 a 2.5.1.

Dalším projektem, v jehož rámci se z odebraných vzorků půdy zjišťoval i obsah půdního uhlíku, byla CzechTerra. Tento projekt probíhal mezi lety 2007-2011, a měl za cíl provést komplexní inventarizaci české krajiny (IFER 2009). V tomto projektu se odebíral vzorek půdy ze svrchních 30 cm minerální půdy. Byl zjišťován pouze půdní druh a nikoli již půdní typ. Půdy na šetřeném stanovišti byly na základě zjištěné hloubky rozděleny do dvou kategorií – hloubka do 30 cm a hlubší než 30 cm. Obsah uhlíku v půdách byl rozdělen po výškových pásmech (do 400 m n. m., 401-700 m n. m., více než 701 m n. m.), výsledné hodnoty jsou tedy pro potřeby této práce velmi hrubým shrnutím situace (viz obr. 4 a 5).

Výškové pásmo <i>Altitude zone</i>	Uhlík (jemná frakce) <i>Carbon (fine fraction)</i>	
	%	($\alpha = 0,05$)
pod 400 m n.m. <i>< 400 m AMSL</i>	2,85	(2,11 – 3,60)
401 - 700 m n.m. <i>401 - 700 m AMSL</i>	3,28	(3,04 – 3,51)
přes 700 m n.m. <i>> 700 m AMSL</i>	7,47	(5,65 – 9,29)
Vše <i>All</i>	3,86	(3,46 – 4,26)

Obr. 4: Střední obsah uhlíku (aritmetický průměr) podle výškových pásem (jemnozem, svrchních 30 cm). (CzechTerra, 2010)

Výškové pásmo <i>Altitude zone</i>	Uhlík (jemná frakce) <i>Carbon (fine fraction)</i>	
	kg/m ²	($\alpha = 0,05$)
pod 400 m n.m. < 400 m AMSL	6,6	(5,0 – 8,2)
401 - 700 m n.m. 401 - 700 m AMSL	5,9	(5,6 – 6,2)
přes 700 m n.m. > 700 m AMSL	7,5	(6,6 – 8,3)
Vše <i>All</i>	6,3	(5,9 – 6,8)

Obr. 5: Střední zásoba uhlíku (aritmetický průměr) podle výškových pásem (jemnozem, svrchních 30 cm). (CzechTerra, 2010)

Třetím projektem zabývajícím se uhlíkem v krajině byl projekt ForChange, který probíhal v letech 2008-2010. Jeho cílem bylo studium reakce lesních ekosystémů na globální změnu klimatu (CzechGlobe 2008-2010). V rámci tohoto projektu byl stanovován celkový tok uhlíku mezi atmosférou a lesními ekosystémy. Zásoby uhlíku v půdě zjišťovány nebyly, pouze hodnoty výměny uhlíku mezi atmosférou a pedosférou.

Další dílčí projekty probíhaly např. v ÚHULu. Příkladem může být kvantifikace Cox v lesních půdách, která probíhala mezi lety 1993-2001 a zjišťoval se při ní obsah uhlíku ve svrchních 30 cm půdy včetně nadložního humusu, anebo projekt z let 2003 až 2004, kdy se zjišťovaly obsahy Cox v půdách. Tato data, o která se ve své práci opírá Marek a kol. (2011), bohužel nejsou veřejně dostupná. Jediným publikovaným výstupem je studie Ciencialy a kol. (2006), kteří kvantifikovali zásoby uhlíku v epipedonu lesních půd v jihozápadních Čechách. Data z prvně zmíněné kvantifikace se sice na stránkách ÚHULu najít dají, nejsou ale pro účely této práce vhodná, neboť jsou zprůměrovaná za kraje (např. hodnota Cox v půdách Libereckého kraje jako celku, viz www.uhul.cz).

Zatím jediným výstupem, ukazujícím zásoby uhlíku v lesních půdách v ČR je tedy mapa s kartogramy zásob C (obr. 6) z publikace Marka a kol. (2011).

2.5.1. Kvantifikace zásob uhlíku v lesních půdách

Kvantifikace uhlíku v lesních půdách v projektu CzechCarbo probíhala ve svrchních 30 cm půdy, kterou Marek a kol. (2011) považuje z hlediska uhlíkové bilance lesa za rozhodující. Vypočtená zásoba uhlíku je ale ohrožena antropogenními hospodářskými zásahy v krajině, ať už se jedná o skladbu dřevin nebo o úpravu půdy po těžbě dřeva. Hluběji akumulovaný uhlík do těchto procesů zpravidla nevstupuje a je tedy v půdě chráněn a vázán dlouhodoběji a trvaleji. Také data Rumpel et al. (2002) ukazují, že

ve srovnání se svrchními horizonty (opad a Ah), vedou ke stabilizaci OH ve spodních horizontech (B a C) odlišné procesy. Ke stabilizaci uhlíku v půdě by bylo vhodné docílit změnami ve skladbě lesů v Česku, jak navrhuje Marek et al. (2011).

Proto byla v projektu CzechCarbo navrhována změna současné skladby lesa na takovou, která by umožňovala na jednu stranu les dále hospodářsky využívat, a na druhou stranu podporovala poutání uhlíku do nadzemní i podzemní biomasy. Tato druhová skladba, Markem et al (2011) označovaná jako „cílová“, předpokládá pokles zastoupení smrku (z 57 % na ~ 40 %) a borovice (z 24 % na ~ 10 %) na takovou hodnotu, aby listnaté dřeviny tvořily přibližně 50 % lesních porostů oproti dnešním ~ 20 %.

Výstupem tohoto návrhu je tabulka č. 2 s průměrnými zásobami uhlíku v lesích Česka ve fázích přechodu na cílovou skladbu. Při modelování ze současné na cílovou druhovou skladbu došlo k mírnému zvýšení zásob uhlíku v biomase a v půdách (z 157,5 tC.ha⁻¹ na 161,7 tC.ha⁻¹, rozdíl je tedy 4,2 tC.ha⁻¹). To je zdůvodněno tím, že výsledná zásoba uhlíku bude vázána stabilněji a rezistentněji, než současná, čehož se má dosáhnout především vhodnými hospodářskými opatřeními. Těmi jsou zvýšení doby obmýtí a obnovní doby. Zvýšení zásob uhlíku je ale primárně ovlivněno prodloužením obnovní doby, která ovlivní zásobu hroubí¹, tudíž je pravděpodobné, že dojde především ke zvýšení uhlíku alokovaného v biomase. Na druhou stranu, přiblížením druhové skladby směrem k přirozené, by se organická hmota stabilizovala také, jen by se les nemohl hospodářsky využívat ve stejné míře jako nyní.

Změnou druhové skladby blíže k přirozené se podle Macků (2007 in Marek a kol. 2011) předpokládá „úbytek až 1/3 uhlíku z humusové vrstvy“, viz tabulka 2. Stejně množství by se však mělo akumulovat v minerálních horizontech. Celkovou uhlíkovou bilanci by tedy tato změna neměla příliš ovlivnit. Z toho vyplývá stabilnější a dlouhodobější fixace uhlíku v půdě, která nebude tolik ovlivňována nahodilými událostmi či způsoby hospodaření se dřevem. Přesunem uhlíku do hlubších vrstev půdy by se rovněž měly omezit emise uhlíku, k nimž dochází při rozkladu nadložního humusu po odlesnění, popř. při dlouhodobé změně při přechodu na vyšší zastoupení listnatých dřevin. Protože čím stabilnější je organická hmota v půdě, tím menší je produkce oxidu uhličitého z půdy (Semenov et al. 2008).

Cílem změny druhové skladby v projektu tedy primárně není navýšení uhlíkových

¹ část kmene stromu, která má na tenčím konci, tzv. čepu, tloušťku i s kůrou rovnou nebo větší než 7 cm

zásob v lesních půdách, protože k výrazně větší fixaci uhlíku by nedošlo. Cílem je vhodným lesním managementem a kompromisní druhovou skladbou podpořit větší stabilizaci uhlíku fixovaného v minerální půdě. Tím by se mělo dosáhnout „lepších podmínek pro naše lesy v kontextu úsilí o minimální dopady scénářů klimatických změn“ (Marek a kol. 2011).

Data v mapě zásob uhlíku v lesních půdách v ČR (obr. 6), která byla jedním z výstupů projektu CzechCarbo, tedy nereprezentují jeho skutečnou zásobu. Vzhledem k zahrnutí pouze svrchních 30 cm (~ epipedon), jsou ovlivněna mocností organických horizontů a objemovou hmotností sušiny nadložního humusu. Hluběji ležící horizonty lesních půd Marek a kol. (2011) nejsou zahrnuty s odůvodněním, že „se mění jen pomalu“. Přitom, jak již bylo zmíněno výše, se v minerálních horizontech ležících pod hranicí 30 cm může akumulovat značné množství uhlíku, 66 % dle Batjese (2002), nebo až 75 % v případě B a C horizontů podzolů dle Rumpel et al. (2002).

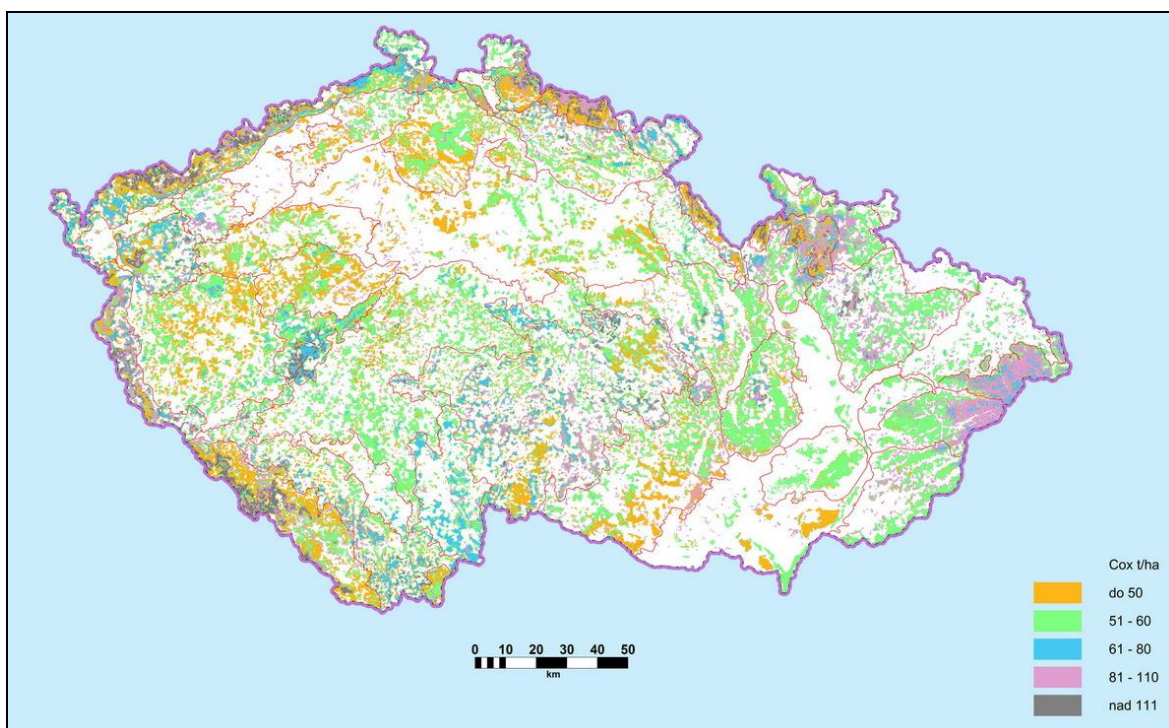
Informace o zásobách uhlíku v lesních půdách jsou vztahována k lesním vegetačním stupňům, ekologickým řadám a skupinám dřevin (smrk, dub, buk, resp. ostatní listnáče a borovice). Ze studie vyplývá Marek a kol. (2011), že největší plošné zastoupení má v Česku kategorie půd s obsahem uhlíku 51-60 t.ha⁻¹, a to konkrétně 40,16 % rozlohy ČR. Plošné zastoupení jednotlivých kategorií zásob uhlíku je shrnuto v tabulce č. 3.

Tab. 2: Množství uhlíku poutaného v humusové vrstvě a ve svrchních vrstvách minerální půdy u vybraných ekosystémových jednotek podle vzdálenosti porostů od cílového stavu. Vrstvy, kde dojde k úbytku, jsou zvýrazněny. (upraveno podle Macků 2007 in Marek a kol. 2011).

Ekosystémová jednotka (cílový hospodářský soubor / typ vývoje lesa) % rozlohy	Půdní horizonty (vrstvy)	Stav porostů vzhledem k cílovému stavu		
		blízké	přechodné (modifikovatelné)	vzdálené (různé typy)
		Zásoba uhlíku v t.ha ⁻¹		
43 Kyselé bučiny (dubové a chudé jedlové) 14,7	humusové horizonty	7	5	16
	svrchní minerální vrstva	53	50	45
	celkem	60	55	61
53 Kyselé jedlové bučiny se smrkem 14,0	humusové horizonty	14	20	22
	svrchní minerální vrstva	52	50	50
	celkem	66	70	72

Tab. 3: Půdní kategorie (pro lesní i zemědělské půdy) podle zásoby C_{ox} v $t \cdot ha^{-1}$ a jejich plošné zastoupení z půdní mapy (Marek a kol. 2011)

Půdní kategorie (-)	Zásoba C_{ox} ($t \cdot ha^{-1}$)	Podíl půdní kategorie na celkové rozloze (%)
1	do 50	17,40
2	51 – 60	40,16
3	61 – 80	13,71
4	81 – 110	19,96
5	nad 111	8,77



Obr. 6: Zásoby uhlíku v epipedonu lesních půd (upraveno podle Macků 2007, in Marek a kol. 2011)

2.5.2. Možnosti kvantifikace uhlíku v půdě

Vzorce pro výpočet zásoby (hustoty) uhlíku v půdě jsou si v zásadě velmi podobné. Nejznámějším je výpočet podle dle Batjese (1996, upraveno podle Schwartz a Namri 2002):

$$Q_i = C_i * D_i * E_i * (1 - G_i)$$

kde Q_i je celková zásoba půdního uhlíku v $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-2}$ v daném horizontu i nebo půdní vrstvě, C_i je obsah organického uhlíku v dané vrstvě či horizontu i , E_i je mocnost vrstvy i v metrech, D_i je objemová hmotnost dané vrstvy (v $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$), a G_i je objem frakce hrubých částic, kterým se provádí korekce při obsahu skeletu větším než 25-50 % (Marek et al 2011). Obsah skeletu v půdách ČR je obsažen v posledním čísle kódu BPEJ. Tento vzorec byl použit při kvantifikaci zásob uhlíku v projektu CzechCarbo (Marek a kol. 2011).

Obsah skeletu v půdě nezahrnovali do svého výpočtu Kempen et al. (2011), kteří kvantifikovali zásoby uhlíku na podzolech v Nizozemí. Vzorec výpočtu:

$$C_v = \left(\frac{C_M}{100}\right) \times \rho_s$$

kde C_v je obsah půdní organické hmoty v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ve zkoumaném horizontu, C_M je obsah organické hmoty v %, a ρ_s je objemová hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Podobně postupoval i Minasny et al. (2002):

$$C_I = \sum_{j=1}^N (C_m \times \rho_j) \times \text{thick}_j$$

kde C_I je výsledný obsah (hustota) uhlíku v daném horizontu nebo vrstvě ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), C_m je obsah uhlíku v daném vzorku půdy (kg/kg), ρ je objemová hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), a thick_j je mocnost dané vrstvy (m).

V českém prostředí se k výpočtu zásob uhlíku v epipedonu lesních půd Cienciala a kol. (2006) použil vzorec

$$SOC = Cox \times BD \times T \times CF \times 10$$

kde SOC je výsledná zásoba uhlíku v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, Cox je obsah uhlíku v %, BD je objemová hmotnost v $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, T je mocnost vrstvy v metrech a CF je koeficient pro stanovení

skeletovitosti (pokud skelet není přítomný, CF=1). Hodnota se násobí 10 pro dosažení zásob uhlíku v požadované jednotce kg.m⁻².

Mezinárodně používaný je i vzorec podle metodiky GEF UNDP (Pearson et al. 2005) určený pro standardizaci výsledků zásob uhlíku pak vypadá takto:

$$\text{SOC (t/ha)} = [(\text{objemová hmotnost (g.cm}^{-3}) \times \text{mocnost vrstvy (cm)} \times \text{C})] \times 100$$

Kde SOC je výsledná zásoba uhlíku v t.ha⁻¹. Obsah C musí být vyjádřen jako desetinný zlomek, např. pro obsah C 2,39 % bude v rovnici použita hodnota 0,0239.

2.6. *Pedoturbace*

Pedoturbace neboli procesy promíchávání půdy a půdního materiálu jsou důležitou součástí dynamiky půdy (Schaetzl a Anderson 2005). Promíchávání půdy je způsobeno buďto fyzikálními nebo biologickými činiteli (Němeček a kol. 1990), jako je činnost fauny a flóry v půdě či na jejím povrchu, a v neposlední řadě i činnost člověka.

K fyzikálním pedoturbačním činitelům řadíme především mrazové procesy v půdě. Tyto procesy vedou k pohybu půdy vlivem změn objemu vody při záporných teplotách (Němeček a kol. 1990). Výsledkem dlouhodobého působení těchto procesů jsou kryoturbace. Ty vedou ke vzniku polygonálních půd a morfologických znaků typických pro kryosoly. Některé další exogenní procesy nejsou primárně hodnoceny jako pedoturbační, na promíchávání půdního materiálu se ovšem podílejí. Jedná se o erozi větrnou a vodní, pohyb vody půdním profilem do hloubky a gravitační procesy obecně.

Dalším pedoturbačním agentem jsou organismy žijící v půdě a na jejím povrchu. Příkladem mohou být termiti, kteří vynášejí půdní materiál z hloubky na povrch a staví si z něj svá hnízda. Dalším příkladem jsou drobní obratlovci, kteří si hloubí nory a zanechávají po sobě tzv. krotoviny. To jsou chodbičky v půdě vyplněné půdním materiálem z povrchu a z organických horizontů.

Disturbance způsobené činností rostlin v půdě jsou označovány jako fytoturbace. Nejlépe prostudovanou fytoturbací jsou stromové vývraty. Dalšími příklady fytoturbací jsou expanze kořenového systému do hloubky a šířky. Růst kořenů jako takový může vést i ke zvyšování půdního povrchu (Schaetzl a Anderson 2005). Odumření kořenů a jejich rozklad pak umožňuje vyplnění pozůstalých kanálků materiálem z povrchu a ze svrchních horizontů. Tímto mechanismem probíhá transport materiálu hlouběji do půdy.

V současnosti je zřejmě nejvýraznějším pedoturbačním činitelem člověk. Půdu přemísťuje a promíchává především v rámci zemědělství. Vlivem těchto procesů došlo ke vzniku nového horizontu – orničního Ap. Další antropoturbace způsobují činnosti související se stavebnictvím či hornictvím. Zajímavostí jsou pak pedoturbace způsobené explozemi výbušnin (*bombturbation*), studované např. na bojištích 2. světové války (Hupy a Schaetzl 2006).

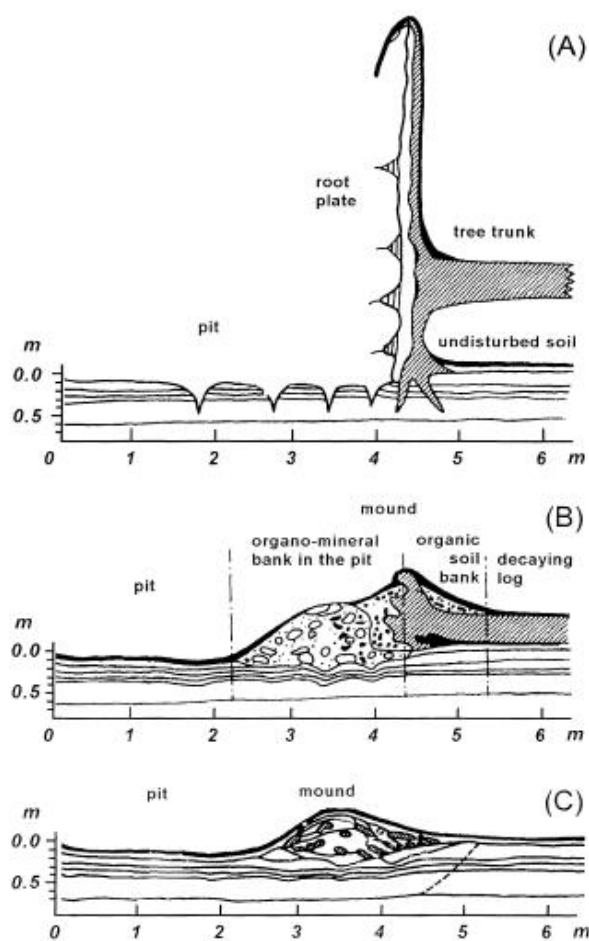
Pro úplnost doplníme ještě tzv. *crystalurbation*, což je pohyb půdy vlivem růstu neledových krystalů (Schaetzl a Anderson 2005).

2.6.1. Vývraty

Vývraty jsou nejdůležitější půdní disturbancí a prvkem tvorby mikroreliéfu v přirozených a v menší míře i v hospodářsky využívaných lesích středních a vyšších zeměpisných šířek. Vývratové disturbance také hrají důležitou roli ve zvyšování stanovištní a biologické diverzity v lesních ekosystémech obecně (Ulanova 2000). Důležitým faktorem jsou vývraty v boreálních jehličnatých lesích, u kterých je vývoj a dynamika mezer ve stromovém zápoji důležitá především pro uchycení a přežití menších a opadavých stromů (Ulanova 2000). V menší míře jsou pak vývraty významné v lesích opadavých (Nichols 1935 in Schaetzel et al 1989).

K vyvrácení stromu dochází nejčastěji z meteorologických příčin, jako jsou bouře a silný vítr. Strom je vyvrácen i s kořeny, na nichž zůstane větší či menší množství půdy spolu s kameny a skeletem (*ang. root plate*). Dochází k vytváření nových forem

mikroreliéfu: kupy (v *anglicky psané literatuře „mound“*) v prostoru kde se akumuluje půdní materiál z kořenů, a deprese (*ang. „pit“*) v místě bývalého kořenového systému (Tejnecký a kol. 2010). Výsledný změněný lesní mikrorelief se v češtině označuje jako vývratiště (Tejnecký a kol. 2010), v *anglicky psané literatuře* se pak vyskytuje jako *„pit and mound microrelief“* nebo *„windthrow“* (Schaetzel 1990, Schaetzel a Anderson 2005, Veneman et al. 1984). Jednotlivé segmenty vývratiště a jeho vývoj v čase je znázorněn na obrázku č. 7.



Obr. 7: Profil a jednotlivé segmenty vývratiště po A) 0-1 roce, B) 30-50 letech, C) více jak 100 letech (Ulanova 2000).

Vývraty vedou nejen k promíchávání půdy, ale často i k úplnému převrácení sledu půdních horizontů. V depresi je normální sled horizontů přerušen, v kupě jsou převráceny či smíchány dohromady a mocnost půdy se zde může až zdvojnásobit (Veneman et al. 1984). Jednotlivá mikrostanoviště nacházející se v tzv. pit-and-mound topography, neboli v lokalitě s velkým množstvím vývrátů, se od sebe pedologicky mohou značně lišit (Ulanova 2000).

Již Schenck (1924, in Schaetzl a Anderson 2005) vývratovou dynamiku označuje jako „přirozené kypření půdy“, při němž se na povrch dostává půda z hlubších horizontů, která je bohatší na minerály a bazické kationty. Toto tvrzení se objevuje i v řadě dalších prací (viz Schaetzl et al. 1989). Beatty (1984) ve své práci došla k závěru, že půda kupy je chudší na živiny a organickou hmotu a má nižší kationtovou výměnnou kapacitu, než půda v přilehlé depresi. Vitousek a Denslow (1986, in Schaetzl et al 1989) také pozorovali nižší hodnoty N, P, C, ale zároveň i vyšší pH a vyšší míry mineralizace N ve vývratišti než v okolní nedisturbované ploše pod zapojeným porostem. To ukazuje na obohacení půdy o živiny z minerálního podloží. Situaci v podzolech se budu podrobněji věnovat níže.

Míru vývratovosti ovlivňuje řada faktorů. Jde především o přítomnost fragipanu, mělké podloží a vysokou hladinu podzemní vody (Schaetzl a Follmer 1990). Tyto faktory zabraňují rostlinám zapouštět kořeny hluboko do půdy a ty proto koření mělce.

Kupky představují vhodné stanoviště pro semenáčky stromů. Collins a Pickett (1982 in Schaetzl et al 1989) statisticky demonstrovali, že více stromků roste na kupkách než v depresích, ačkoli by se předpokládalo náhodné rozložení. Ke stejným zjištěním došla ve své studii i Ulanova (2000), která porovnávala množství a možnosti přežití semenáčků a mladých stromků na různých stanovištích ve vývratišti (v depresi, na kupce a v nedisturbovaném okolí). Stromy, které preferují růst na kupách, jsou pak častěji samy vyvráceny, a to převážně v oblastech se špatně odvodněnými a zamokřenými půdami (Schaetzl a Follmer 1990), což vede k dalšímu zvyšování diverzity v mikrotopografii.



Díky vývrátům se navíc do půdy dostávají dřevěné zbytky z vyvrácených stromů (viz obr. 8), které v ní mohou ve vhodných podmínkách přetrvat století či více a obohacovat ji o živiny (McFee a Stone 1966 in Schaetzl 1989).

Obr. 8: Dřevěné zbytky kmene v čelní straně kupy.

Kmeny mohou, ale nemusí být ve vývratišti přítomné. V hospodářských lesích se většinou odstraňují a dále zpracovávají. V chráněných lesních porostech jsou kmeny naopak ponechány na místě. Jejich následný rozklad příznivě ovlivňuje půdu a celý lokální ekosystém, protože padlé kmeny jsou vhodným stanovištěm pro sukcesi mladých stromků a zároveň se jejich rozkladem se do půdy dostávají bazické kationty.

Z hlediska klimatických poměrů, jsou kupky obecně sušší a teplejší než deprese (Schaetzl 1990). Deprese jsou přirozeně vlhčí díky jejich nižší poloze v mikroreliéfu a také vzhledem k delší perzistenci sněhu v jejich prostoru, než je tomu na kupách a v jejich okolí (Veneman et al. 1984). Toto je patrné i z obrázku 9.



Obr. 9: Zbytky sněhu v depresích vývratiště, kupy jsou bez sněhu jako první.

Mikroreliéf vývratišť ovlivňuje jak rozvoj a prostorovou variabilitu populací rozkladných organismů, tak hrabanky i minerálních horizontů půd (Šamonil et al. 2010). Počty pozorovaných kupek jsou zpravidla vyšší než depresí (Schaetzl a Follmer 1990).

Rozsah plochy ovlivněné vývratem se nejčastěji pohybuje v řádu jednotek až desítek metrů čtverečních (Šamonil et al. 2010). Pokud je vývrát mělký, půda se vrací do původního stavu po 100 až 200 letech. V případě velkoprostorových pedoturbací s komplikovanými projevy označuje Ulanova (2000) návrat do původního stavu dříve, než po uplynutí alespoň 200-300 let, za „nemožný“.

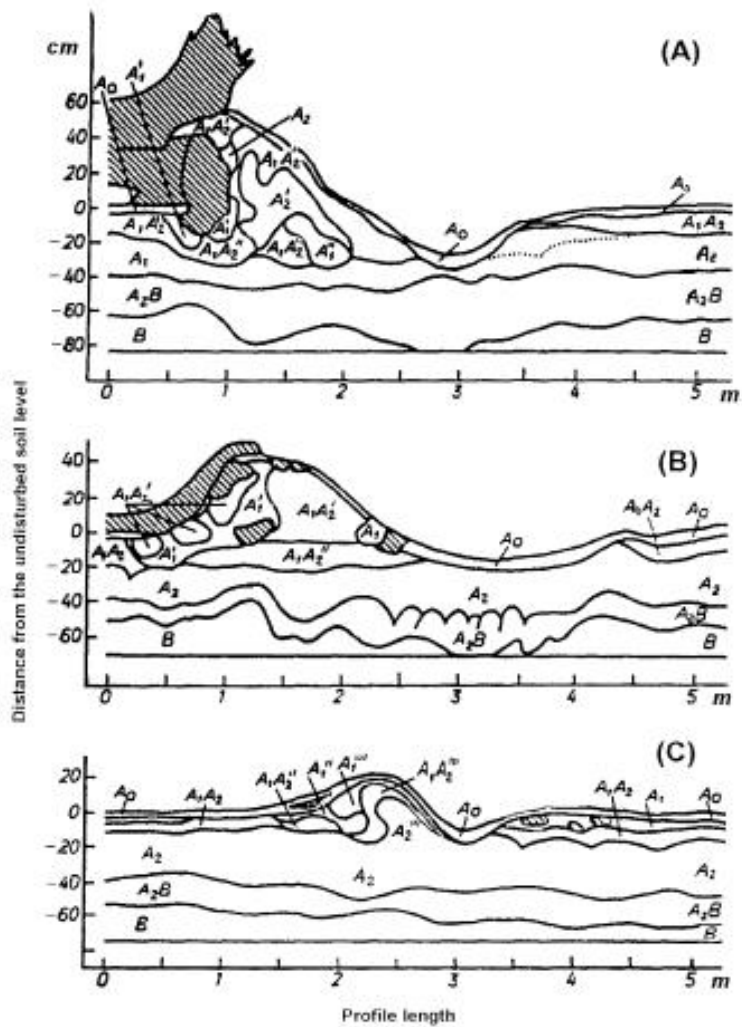
Vyvrácením stromu se lokálně snižuje zápoj lesa, což vede ke změnám v obsahu, kvalitě a distribuci půdního uhlíku (Marek a kol. 2011). Ztráta uhlíku v nadzemní biomase je kompenzována jednak rozvojem přizemní vegetace, a při poklesu zápoje o 10-20 % také světlostním přírůstem stinných dřevin (Marek a kol. 2011).

V obhospodařovaných lesích je snaha vývratovou dynamiku potlačit, aby nedocházelo k ekonomickým ztrátám na dřevě. V původních lesních ekosystémech jsou půdy s podzolovou diferenciací profilu pravidelně rozrušovány vývraty. V průběhu holocénu byl každý bod ekosystému vývratem ovlivněn v průměru 10 až 20krát (Vassenev a Targulyan 1995 in Ulanova 2000), ať už rozkladem padlého kmene nebo nově vzniklým mikroreliéfem.

Vývraty a jejich jednotlivé prvky jsou charakterizovány značnými změnami v půdním profilu. Ulanova (2000) shrnuje procesy v půdě po vývratu takto:

- svrchní část půdního profilu v prostoru deprese je zničena,
- v prostoru kupky je půdní profil pohřben organickým a organominerálním materiálem,
- krátce po disturbanci se taxonomie a stratigrafie půd ve vývratišti výrazně odlišuje od půd původních
- rozkládající se kmeny a akumulace organického materiálu se vytratí za cca 50 až 200 let,
- deprese a organominerální kupky jsou zachovány až do příští disturbance.

Tyto procesy jsou rovněž zachyceny na obr. 10.



Obr. 10: Půda ve vývratišti po A) 20-30 letech, B) 50-60 letech, C) 80-100 letech (Ulanova 2000).²

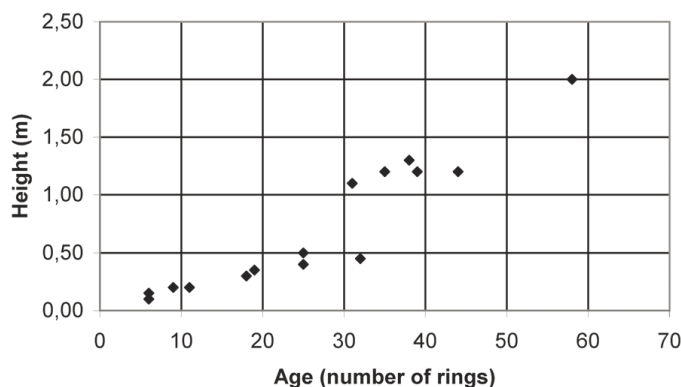
² Vysvětlivky k obr. XY: A₀-opad, A₁-hor. akumulace humusu, A₂-eluviální horizont, B-iluviální horizont, A[']₁- promíchaný horizont, A^{''}₁ – nově vytvořený horizont, šedé části – rozkládající se dřevo

2.6.2. Datování stáří vývrátů

Datování vývrátů a určování jejich stáří bývá obecně problematické. Pokud je přítomný kmen, můžeme stáří události alespoň orientačně odhadnout podle stupně rozkladu kmene a jeho součástí, např. podle přítomnosti menších větví, popř. vegetace rostoucí na kmeni (viz tab. 4). Zielonka (2006) také demonstuje vztah mezi výškou semenáčku smrku (*Picea abies*) a jeho stářím (obr. 11).

Tab. 4: Určení relativního stáří podle stupně rozkladu kmene (Holeksa 1998 in Zielonka 2006)

Stage of decomposition	Surface	Shape	Depth of penetration of knife	Branches	Bark
1	Smooth	Round	Wood hard	All branches present, elevated above ground	Intact
2	Smooth	Round	Surface bends under the pressure of knife	Branches over 2 cm	Partial intact
3	Crevice several mm deep	Round	To 1 cm	Over 3 cm thick present	Remains on upper side of log
4	Crevice ca. 0.5 mm deep	Round,	To 4 cm	Only base part present	Usually lack
5	Crevice ca. 1 cm deep	Round,	To 5 cm	Only thickest base parts present	Lack
6	Several cm thick pieces tear off	Slightly flattened	Solid only in central part of log	Only thickest base parts present	Lack of any remains
7	Whole log cover with several cm deep furrows	Distinctly flattened	Through	Lack of any remains	Lack of any remains
8	Most often covered with vegetation	Flattened, covered with vegetation	Through	Lack of any remains	Lack of any remains



Obr. 11: Vztah věku semenáčku smrku a jeho výšky (Zielonka 2006)

Další možností je datování pomocí radiokarbonové metody. Při použití této metody potřebujeme nějaký organický zbytek, nejčastěji to bývá dřevo vyvráceného stromu, nalezené v prostoru vývratiště. Datací tohoto vzorku zjistíme čas úmrtí stromu, resp. dobu, kdy došlo k vyvrácení. Problémem je, že často nejsme schopni rozeznat, jestli daná část dřeva patří k vnějším, nebo vnitřním letokruhům. To znamená, že bychom nedatovali

nejstarší letokruhy stromu (nejblíže k vývratové události), ale třeba část dřeva, která je o polovinu mladší, než byl strom v době události (Schatzl a Follmer 1990). S tímto je tedy třeba při analýze ^{14}C počítat. Dalšími možnostmi datování vývratů je použití dendrochronologických metod. U starých vývratů se kromě ^{14}C nabízí ještě možnost datování pomocí ^{210}Pb , ^{226}Ra anebo ^{137}Cs (Šamonil et al., nepublikováno).

2.6.3. Trvanlivost vývratového mikroreliefu

Nielsen (1963 in Schatzl a Follmer 1990) sestavil seznam faktorů, které ovlivňují četnost a velikost vývratů v dané lokalitě. Jedná se především o hloubku půdy, architekturu kořenového systému, sklon svahu, vegetační historii území nebo půdní texturu. Na snižování kupek po vývratech se podílejí jednak eroze vodní a větrná, účinky mrazu a půdního sesedání, creep, rozklad organického materiálu a norující živočichové (Beatty a Stone 1986 in Schaetzl a Follmer 1990). Trvanlivost mikroreliefu snižují také stanovištní preference živočichů, jako příklad uveďme preferenci kup myšmi a krtky, kupy se pak stávají cílem lišek, hledajících zde svou kořist (Langohr 1987 personal commun. in Schaetzl 1989). Preference kupek je doložena také pro mravence (Troedsson a Lyford 1973 in Schatzl 1989).

Autoři se na problematiku trvanlivosti mikroreliefu vývratišť dívají různých pohledů. Pro některé (Denny a Goodlett 1968 in Schaetzl a Follmer 1990) je nejdůležitějším faktorem snižování kupek sklon svahu, vystavení kupy okolním vlivům a povaha materiálu kupky. Pro jiné (Zeide 1981 in Schaetzl a Follmer 1990) je nejdůležitější výška kupy. Vývratový mikrorelief na písčitéch substrátech v průměru přetrvává déle než na ostatních substrátech (Schaetzl a Follmer 1990). To je dáno především dobrými infiltračními vlastnostmi písčitého podloží a minimálním povrchovým odtokem.

Obecně se dá říci, že erozi kupek spolu s kořenovými baly ovlivňují podle Schaetzl a Follmer (1990) především tyto faktory:

- půdní textura, včetně její skeletovité složky,
- půdní propustnost, porosita a přirozená půdní drenáž,
- velikost a síla půdních agregátů,
- makro a mikro klima,
- pokryv opadem a rostoucí vegetací na kupě,
- počáteční velikost root plate a kupy,

- aktivita fauny,
- odtokové poměry lokality,
- historie požárů lokality,
- stáří vývratu.

2.6.4. Specifika vývratů na podzolech

Ačkoli by pedoturbace, jakožto promíchávání různého materiálu, mělo vést k větší homogenizaci neboli zmenšování rozdílů mezi jednotlivými půdními horizonty, není tomu tak vždy (Schaetzl a Anderson 2005). Příkladem tohoto faktu jsou právě podzoly, na kterých se díky specifické diferenciaci profilu s výrazně odlišnými barvami jednotlivých horizontů dá vývratová dynamika velmi dobře studovat. V osmdesátých a devadesátých letech 20. století se vývraty na podzolech zabývalo hned několik autorů, například Schaetzl (1990), Veneman et al. (1984) anebo Borman et al. (1995).

V případě podzolů bývá půda v depresi zpravidla na vyšším stupni vývoje diferenciacie profilu než půda v kupce a v okolní nedisturbované ploše (Schaetzl a Anderson 2005, Schaetzl 1990, Veneman et al. 1984). V depresích jsou zaznamenány nižší hodnoty kationtové výměnné kapacity a půdní reakce (Veneman et al. 1984) a také kyselější prostředí v důsledku větší akumulace organické hmoty (Šamonil et al. 2010, Borman et al. 1995). Vyšší diferenciacie půdního profilu v depresích je také způsobena větší koncentrací odtoku ze srážek, akumulací a delší perzistencí sněhu v jejich prostoru (jak bylo zmíněno výše, viz obr. 9), než je tomu v přilehlých nedisturbovaných plochách a kupkách (Schaetzl 1990, Schaetzl a Anderson 2005). To vede k většímu promývání půdního profilu a větší migraci organických sloučenin z organických horizontů do hlubších minerálních horizontů. Jinými slovy, proces podzolizace je pod depresemi intenzivnější. V kupě se pak spíše akumulují kameny a skelet, které se dostaly na povrch v kořenovém systému vyvrácených stromů (Schaetzl a Anderson 2005).

Vývraty rovněž mohou být zodpovědné za ostrý, jazykovitý přechod mezi E a B horizontem u podzolů a luvizemí (Schaetzl a Anderson, 2005).

3. Zájmové území a jeho fyzickogeografická charakteristika

Zájmové lokality byly voleny s ohledem na klasifikovaný půdní typ, a to podzol arenický. Protože výskyt tohoto půdního typu je vázán na písčité a minerálně chudé substráty, jsou si jednotlivé lokality z geologického hlediska podobné, nikoli však stejné. Hlavní práce probíhaly v lokalitě Ralsko, pro srovnání byl vybrán podzol arenický v lokalitě Týnec nad Labem.

Terénní průzkum situace vývratů byl zjišťován v okresech Mladá Boleslav a Česká Lípa, opět v závislosti na přítomnosti půdního typu podzol arenický. Lokality s vývraty, popisovanými v této práci, jsou zobrazeny v mapě na obr. 15.

3.1.1. Lokalita Ralsko

Lokalita Ralsko se nachází v okrese Mladá Boleslav ve Středočeském kraji (viz mapa 1 v přílohách této práce). Oblast z geologického hlediska leží na kvádrových pískovcích ze svrchní křídy, z období cenoman až coniak. Tyto pískovce dosahují stáří 85 až 95 mil let (Chlupáč a kol. 2011).

Geomorfologické zařazení lokality je patrné z tabulky č. 5. Klimaticky je dle Quittovy klasifikace pro roky 1901-2000 lokalita řazená do klimatické oblasti MT – mírně teplá, srážkově průměrná (Hrnčiarová a kol. 2009). Teplotní a srážkové charakteristiky této klimatické oblasti jsou shrnuty v tabulce 6.

Tab. 5: Zařazení lokality Ralsko podle geomorfologického členění ČR (Cenia 2013)

System	Hercynský
Provincie	Česká vysočina
Subprovincie	Česká tabule
Oblast	Středočeská tabule
Celek	Jizerská tabule
Podcelek	Středo-jizerská tabule
Okrsek	Bělská tabule

Podle map potenciální přirozené vegetace se lokalita nachází v oblasti brusinkových borových doubrav (Cenia 2013). Tato situace je zde patrná i v současnosti. Nejsilněji zastoupenými rostlinnými druhy jsou právě borovice lesní (*Pinus sylvestris*),

bříza bělokorá (*Betula pendula*), brusnice brusinka a borůvka (*Vaccinium idaeda*, *Vaccinium myrthillum L.*), a vřes (*Calluna vulgaris*).

Tab. 6: Charakteristika mírně teplé oblasti, upraveno podle Hrnčiarová a kol. (2009)

Klimatická oblast	Léto	Přechodné období	Zima
Mírně teplá	20-40 letních dnů, $t_p = 13-15^\circ\text{C}$, 200-400 mm srážek	140-160 mrazových dnů, chladné jaro s $t_p = 5-7^\circ\text{C}$, mírně teplý podzim $t_p = 6-8^\circ\text{C}$	50-60 ledových dnů, mírně chladná zima $t_p = -2 - -3^\circ\text{C}$, 200-400 mm, 50-80 dnů trvání sněhové pokrývky

Lokalita byla v minulosti součástí vojenského výcvikového prostoru Ralsko, v jehož rámci byla vyčleněna jako dělostřelecká střelnice. Proto je možné, že půda v lokalitě může být i antropogenně ovlivněna antropoturbacemi. Ty jsou způsobené explozemi náloží či přemístováním substrátů na kolech a pásech těžké techniky a jejich následnou depozici na jiných místech.

Na tomto profilu probíhaly terénní práce nezbytné pro vizualizaci přechodů horizontů. Dále zde byly odebírány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti a Cox.

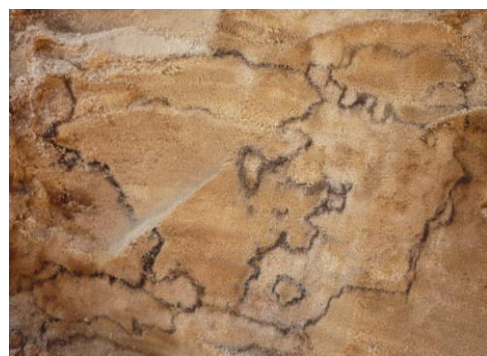
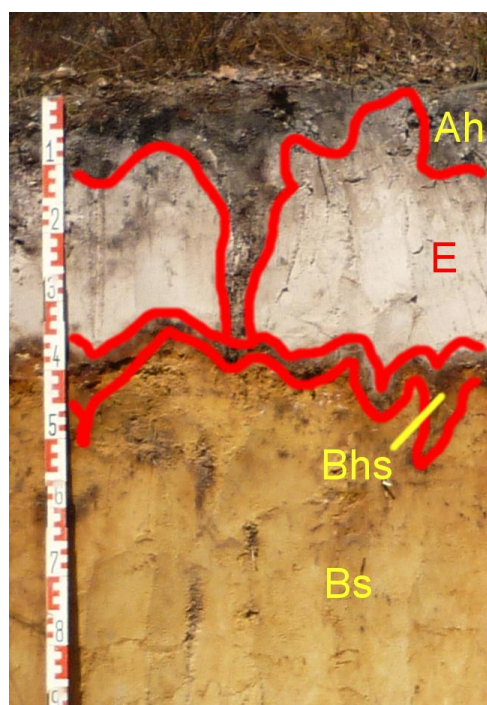
Půdní profil má stratigrafii O-Ah-E-Bhs-Bs, je vyobrazen na obr. 12 a 16. O horizont byl tvořen prakticky pouze opadem okolních stromů – borovice a břízy, na půdním povrchu se vyskytovaly keříčky vřesu. O horizont dosahoval mocnosti max. 1 cm. Ah měl typickou tmavě šedou barvu, dosahoval mocností okolo 10 cm. Mocnost tohoto horizontu byla ovlivněna především disturbancemi (po vývratech), které byly v profilu patrné (obr. 12). E horizont tvořila prakticky pouze bílá křemenná zrna, dosahoval průměrných mocností kolem 30 cm. Bhs je charakteristický tmavou barvou, přítomností ortštejnu a značným množstvím záteků do Bs horizontu. Záteky pozorované v této lokalitě věrně kopírovaly kořenový systém rostlin (viz obr. 12). V Bs se často vyskytovaly žilky s organického materiálu, které měly jak souhlasný, tak i nesouhlasný sklon s průběhem uložení sedimentu (viz obr. 12). Přestože mocnosti jednotlivých horizontů budou rozebrány podrobněji ve výsledcích této práce, jsou pro lepší představu průměrné mocnosti horizontů v profilu shrnuty v tab. 7.

V lokalitě byly ze všech horizontů odebírány vzorky pro zjištění obsahu Cox a objemové hmotnosti. Ty pak sloužily k výpočtu zásob uhlíku v půdě a v

jednotlivých horizontech. Zásoba uhlíku v tomto profilu byla dále různými způsoby vizualizována.

Tab. 7: Průměrné mocnosti horizontů zkoumaného profilu.

horizont	Průměrná mocnost [m]
Ah	0,109
E	0,301
Bhs	0,078
Bs	0,712+



Obr. 12: Profil arenického podzolu na lokalitě Ralsko, s patrnými disturbancemi v Ah a E horizontu (vlevo nahoře). Žilky s organickým materiálem uvnitř Bs (vlevo dole). Formování záteků podél kořenu stromu (vpravo).

3.1.2. Lokalita Týnec nad Labem

Lokalita se nachází v okrese Kolín, ve Středočeském kraji, mezi městy Kolín a Týnec nad Labem (viz mapa 2 v přílohách této práce). Geologické podloží tvoří mezozoické horniny s pleistocenním pokryvem (Chlupáč a kol. 2011). Ten je zastoupen v podobě štěrkopískové terasy řeky Labe. Díky tomu byl půdní profil relativně mělký, pouze 60 cm hluboký. Valounky z podložní říční terasy se od hloubky přibližně 30 cm objevovaly na více místech mezi Kolínem a Týncem. Geomorfologické zařazení lokality je popsáno v tabulce číslo 8. Dle Quittovy klasifikace klimatu pro roky 1901-2000 se tato lokalita řadí do klimatické oblasti T – teplá, srážkově průměrná (viz tab. 9, Hrnčiarová a kol. 2009).

Tab. 8: Zařazení lokality Týnec nad Labem podle geomorfologického členění ČR (upraveno podle Cenia 2013)

Systém	Hercynský
Provincie	Česká vysočina
Subprovincie	Česká tabule
Oblast	Východočeská tabule
Celek	Východolabská tabule
Podcelek	Chlumecká tabule
Okrsek	Krakovanská tabule

Tab. 9: Charakteristika velmi teplé oblasti, upraveno podle Hrnčiarová a kol. (2009)

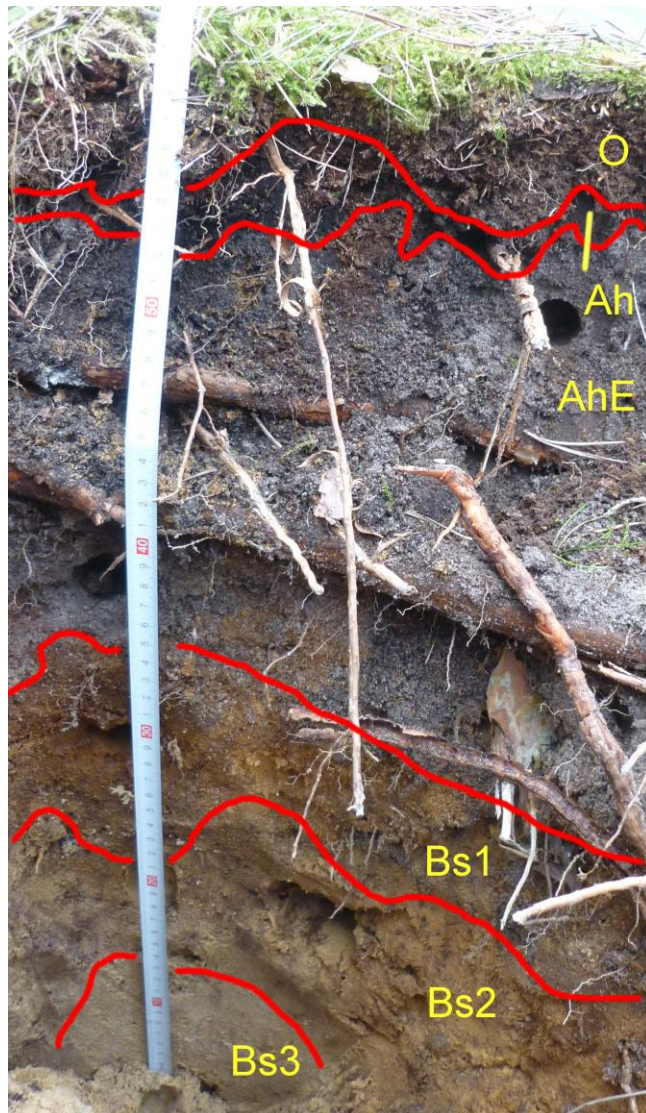
Klimatická oblast	Léto	Přechodné období	Zima
Teplá	40-50 letních dnů, 15-16°C, 200-400 mm srážek	100-140 mrazových dní, mírně teplé jaro s 7-8°C, teplý podzim 8-9°C	50-60 ledových dnů, 0- -2°C, >400 mm, 50-60 dnů trvání sněhové pokrývky

Z rostlin se v lokalitě vyskytovala borovice lesní (*Pinus sylvestris*), rašeliník (*Sphagnum L.*) a rostlina z čeledi lipnicovitých, která byla identifikována jako metlička křivolaká (*Avenella flexuosa*). Lokálně byl přítomný dub (*Quercus L.*) a bříza (*Betula pendula*) Potenciální přirozenou vegetaci by v této oblasti tvořily kostřavové borové doubravy (Cenia 2013).

Půdní profil měl stratigrafii O-Ah-AhE-Bs1-Bs2-Bs3 (viz obr. 14). O horizont se

skládal prakticky pouze rostlinných zbytků rašeliníku (*Sphagnum* L.) a mocnost se pohybovala kolem 5 cm. Přechod mezi O a Ah byl zřetelný. Ah dosahoval mocnosti 2-3 cm, přechod do AhE byl postupný. AhE horizont byl tvořen šedým písčitém materiálem, dosahoval mocností 20-25 cm. Tento horizont byl silně prokořeněný. Přechod mezi AhE a Bs1 byl ostrý. Přechody mezi jednotlivými Bs subhorizonty byly pozvolné, lišily se převážně barvou (Bs1 rezivý, Bs2 s příměsí organiky byl naředlý). Bs3 byl pak tvořen světle žlutým pískem a od ostatních spodických horizontů se lišil i strukturou. V 60 cm se nacházel pevný podklad.

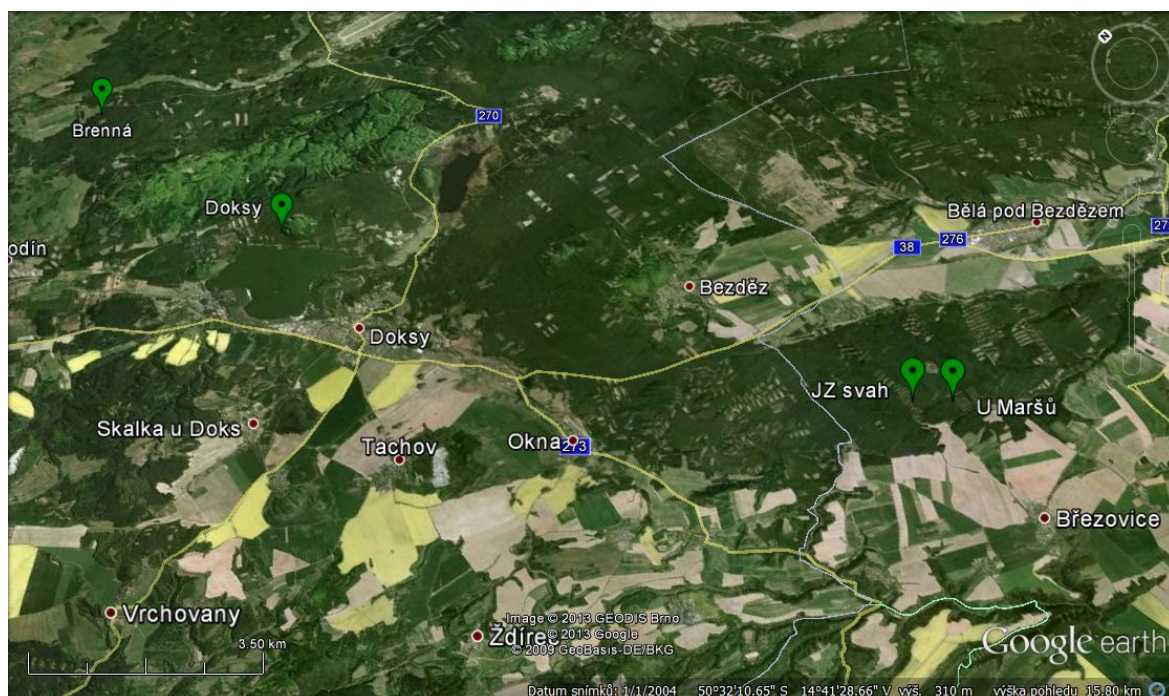
Z profilu byly odebrány vzorky z jednotlivých horizontů pro analýzu obsahu Cox, a dále vzorky pro zjištění objemové hmotnosti. Byla zjištěna průměrná mocnost jednotlivých horizontů. Ze získaných dat byla vypočítána zásoba uhlíku v půdním profilu.



Obr. 13: Profil arenického podzolu z lokality Týnec nad Labem.

3.2. Lokality s vývraty

Jednotlivé lokality jsou znázorněny mapce na obr. 15, na všech byl diagnostikován půdní typ podzol arenický. Bylo vybráno několik vývratů různého stáří, aby bylo postihnuto co největší spektrum půdních profilů. Vybrané vývraty byly seřazeny podle svého relativního stáří dle Holeksa (1998 in Zielonka 2006, viz tab. 4). Převládající vegetací byla vždy borovice lesní (*Pinus sylvestris*), dále se na lokalitách často vyskytovaly brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillum*) a brusnice brusinka (*Vaccinium vitis-idaea*), a rašeliník (*Sphagnum L.*). Stratigrafie půdních profilů ve vývratistích je podrobně popsána ve výsledcích této práce.



Obr. 14: Lokality s vývraty

4. Metodika

Pro tuto diplomovou práci je stěžejní profil podzolu arenického v lokalitě Ralsko (specifikován dále). Na něm byly prováděny veškeré práce. Pro srovnání byl pak použit profil z Týnce nad Labem.

Nejprve byl vyhledán vhodný profil (obr. 16). U něj se začistila čelní strana, která se spolu s měřítkem vyfotografovala. Poté byl profil odkopán o 10 cm směrem od čela, a opět vyfotografován. Tento postup se opakoval, dokud nebylo dosaženo horizontální hloubky profilu 100 cm.



Obr. 15: Čelní strana profilu výkopu podzolu v Ralsku.

Z těchto fotografií bylo dále vybráno sedm, ze kterých se vytvořil výřez zabírající výkop o rozměrech 210x60 cm (čelo profilu x horizontální hloubka). Čelem výkopu se rozumí první profil neboli první fotografie zřepedu. Horizontální hloubkou se rozumí vzdálenost, do které byl profil odkopán, směrem od fotografa.

Fotografie byly dále použity a zpracovávány, a z profilu byly také odebrány vzorky půdy pro další analýzy. Popis těchto postupů je předmětem této kapitoly.

4.1. Objemová hmotnost

Protože jednou z proměnných pro výpočet zásoby uhlíku v půdě je objemová hmotnost, bylo třeba ji stanovit. Pro účely této práce se stanovovala objemová hmotnost redukovaná, která není závislá na momentálním obsahu vody a jiných látek v půdě, na rozdíl od klasické objemové hmotnosti, která se stanovuje z nevysušeného vzorku půdy.

Vzorky pro stanovení objemové hmotnosti byly odebírány z každého horizontu. K odběru nemohly být využity standární Kopeckého válečky o objemu 100 cm³, jelikož vzorkované horizonty nedosahovaly potřebné mocnosti. Proto byly vzorky půdy odebírány do válečků menších rozměrů se známým objemem (obr. 17, tabulka 10).

Po odebrání se půda vysušila na konstantní hmotnost a takto získaný vzorek byl zvážen. Hmotnost vysušené půdy byla dána do poměru s objemem válečku. Výsledkem je redukovaná objemová hmotnost v g.cm⁻³. Pro účely výpočtu zásob uhlíku byla objemová hmotnost přepočtena i na kg.m⁻³.

Z každého horizontu byl odebrán jeden vzorek pro stanovení redukované objemové hmotnosti. Pouze v případě Bhs z Ralska, ve kterém se vyskytovalo velké množství ortšejnu, bylo vzorků odebráno více (šest). Z těchto byla pak vypočtena průměrná objemová hmotnost.



Obr. 16: Válečky pro odběr vzorků půdy na stanovení objemové hmotnosti.

Tab. 10: Objemy použitých válečků

váleček	objem [cm ³]
1	25,740
2	29,926
3	27,939
4	15,551
5	15,771
6	16,431

4.2. Uhlík

Pro stanovení obsahu uhlíku (Cox) v půdě byly odebírány vzorky ze všech horizontů podzolu v Ralsku. V případě Bhs bylo opět odebráno více vzorků z různých míst tohoto horizontu. Obsah uhlíku byl laboratorně stanoven modifikovanou Tjurinovou metodou. Tato metoda využívá oxidace půdní organické hmoty pomocí dichromanu draselného a kyseliny sírové (ČZU 2013). Výsledek je označován jako Cox neboli uhlík získaný mokrou oxidací.

Protože je tato metoda určena primárně pro minerální horizonty, byla pro stanovení obsahu Cox v organických horizontech použita trojnásobné množství chromsírové směsi (Polická, ústní sdělení). Stanovení obsahu Cox probíhalo v laboratořích VÚMOP a ČZU.

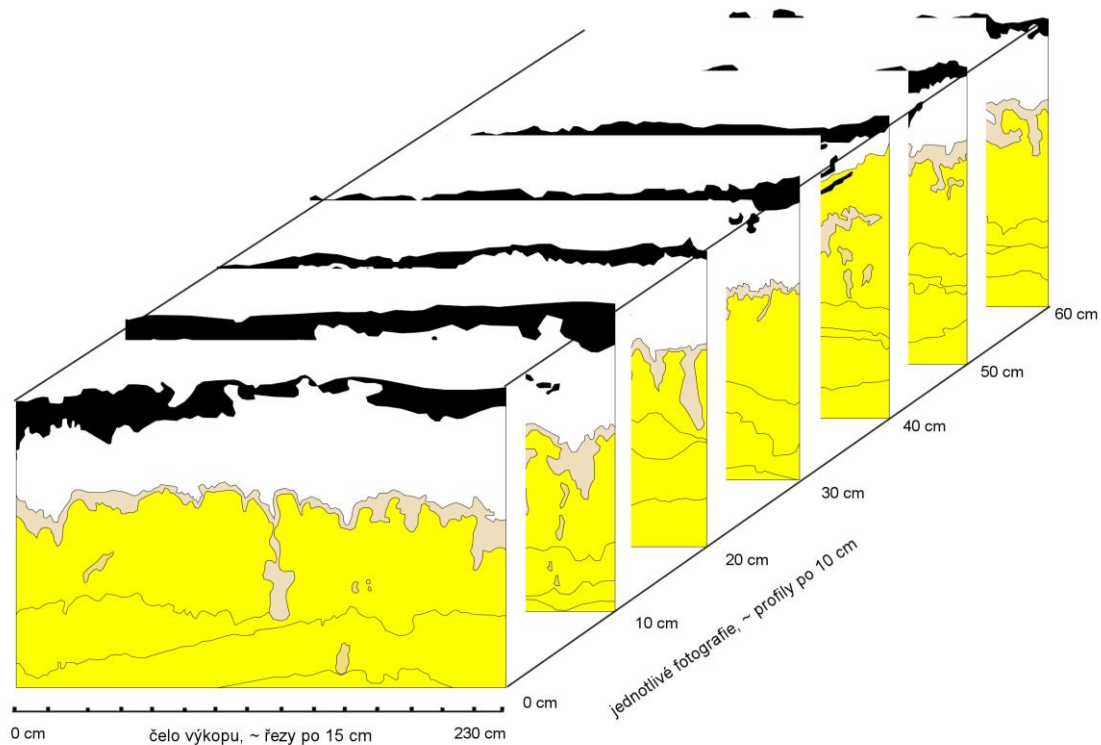
4.3. Mocnosti horizontů

V lokalitě Ralsko byly zjišťovány orientační mocnosti horizontů. Jednalo se však pouze o potřeby schematického nákresu půdního profilu, který skutečnost značně zjednodušoval. Pro další vizualizace však bylo zapotřebí získat co možná nejpřesnější představu o průběhu jednotlivých půdních horizontů. Proto bylo přistoupeno k získání podrobných mocností horizontů, které by dostatečně reflektovaly prostorové rozmístění horizontů v půdním profilu.

Tyto mocnosti byly zjišťovány zpětně z pořízených fotografií, které dokumentovaly jednotlivé půdní profily ve výkopu. Schéma extrapolace ukazuje obr. 18.

Každý půdní profil byl fotograficky zdokumentován. Na každé fotografii byly provedeny řezy po 15 cm, které reprezentují fiktivní půdní sondýrku. V těchto sondách, dále označovaných jako řezy, byly změřeny mocnosti horizontů a dle měřítka přepočítány na skutečnou mocnost. Z fotografií (profilů) a řezů tak byla vytvořena síť „půdních sond“ po 15x10 cm. Tato podrobná bodová data byla dále využita k výpočtům a vizualizacím.

V lokalitě Týnec se zjišťovaly pouze orientační mocnosti horizontů, ze kterých se dále použila průměrná hodnota. Protože pro tento profil nebyly prováděny podrobnější vizualizace, nebylo třeba zjišťovat podrobné mocnosti horizontů.



Obr. 17: Schéma extrapolace mocností horizontů pro jednotlivé profily v Ralsku. Tím vznikla síť „sond“ 15x10 cm. Schéma není ekvidistantní.

4.4. Vizualizace přechodů horizontů

Pro lepší názornost prostorového uspořádání přechodů jednotlivých horizontů a záteků v profilu podzolu byla provedena trojrozměrná vizualizace. Pro tyto účely bylo použito již zmíněných sedm výřezů fotografií půdních profilů podzolu arenického z Ralska. Horizontální hloubka profilu je 60 cm, šířka čelní strany je 215 cm. Výška (z pohledu pedologické terminologie hloubka) celého profilu je proměnlivá a dosahuje maxima ~ 115 cm.

Fotografie byly zpracovány a transformovány v programu Topol. Z takto získaných dat již bylo možné vytvořit grid. Dále byla upravená data zpracována v programu Surfer, kde byly vytvořeny vlastní gridy pro každý horizont. Ty byly následně trojrozměrně vizualizovány, jak ukazují obr. 21 až 24 ve výsledcích této práce.

4.5. Výpočet zásob uhlíku v podzolech a jejich vizualizace

Výpočet zásob uhlíku v této práci probíhal podle vzorce dle Ciencialy a kol. (2006), který jej použil při výpočtu zásob uhlíku v epipedonu lesních půd:

$$SOC = Cox \times BD \times T \times CF \times 10$$

kde SOC je výsledná zásoba uhlíku v kg.m^{-2} , Cox je obsah uhlíku v %, BD je objemová hmotnost v g.cm^{-3} , T je mocnost vrstvy v metrech a CF je koeficient pro stanovení skeletovitosti (pokud skelet není přítomný, $CF=1$). Hodnota se násobí 10 pro dosažení zásob uhlíku v požadované jednotce kg.m^{-2} . Upravený vzorec pro půdy bez skeletu má podobu:

$$SOC = Cox \times BD \times T \times 10$$

V projektu CzechCarbo jsou uváděny zásoby uhlíku v t.ha^{-1} . Aby byly hodnoty srovnatelné, musí se výsledek v kg.m^{-2} vynásobit 10, čímž se převede na t.ha^{-1} .

Ve výpočtech byly použity jak orientační (Ralsko, Týnec), tak extrapolované podrobné mocnosti horizontů (Ralsko). Z těchto podrobných dat z Ralska byla zásoba uhlíku zjišťována pro každý horizont a dále vizualizována (viz příloha 3 a 4). Příprava dat pro tvorbu gridu probíhala v programu MS Excel. Gridy byly vytvořeny metodou krigingu v programu Surfer. V tomto programu také proběhla následná vizualizace, ze které je patrné rozložení zásob uhlíku v jednotlivých půdních horizontech.

Průběh zásob uhlíku v profilu (~ fotografii) byl znázorněn jako graf průběhu zásob uhlíku v jednotlivých horizontech i jako součet zásob v těchto horizontech. Toto zpracování probíhalo v programu MS Excel. Tyto vizualizace jsou v přílohách této práce (příloha 5-11).

4.6. Vizualizace vývratišť

Protože vývraty jsou důležitým faktorem determinujícím prostorovou variabilitu záteků a jazykovitých přechodů horizontů v podzolech, byla provedena i vizualizace a nákres situace několika vývratišť. Ta byla vybrána na základě klasifikace půdního typu

jako podzol arenický podle TKSP ČR. Vývratiště byla vybrána s ohledem na stáří, aby byl postihnout co možná největší soubor půd v různém stupni pedogeneze. Vývraty byly datovány pouze relativně, nikoli absolutně.

Vybraný vývrat byl překopán napříč, ve směru od padlého kmene, přes kupu a depresi, až po nedisturbovanou plochu. Pokud to poloha kmene a pařezu dovolovaly, byla vývratiště prokopána středem. Zjišťována byla mocnost a sled jednotlivých půdních horizontů, všechny vývraty byly fotograficky zdokumentovány a překresleny v programu OCAD. Stratigrafie vybraných vývratů je podrobně popsána ve výsledcích této práce (kap. 5.4.).

4.7. Použité statistické metody

K charakterizování kvantitativních vlastností půdy byly použity následující statistické metody. Výpočty byly prováděny v programu MS Excel.

Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je nejjednodušší charakteristikou polohy. Udává průměrnou hodnotu vyskytující se v souboru dat.

Medián

Mediánem se rozumí střední hodnota datového souboru, která z dat oddělí přesně 50 % nejmenších hodnot.

Modus

Modus označuje hodnotu, která se v souboru dat vyskytuje nejčastěji.

Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je mírou proměnlivosti (rozptýlení) veličiny kolem průměru. Má stejný rozměr jako původní data, proto je vhodnějším vyjádřením variability než rozptyl. Čím blíže je její hodnota k 0, tím nižší je variabilita v souboru dat.

Variační koeficient

Variační koeficient je podíl směrodatné odchylky a průměru, často se vyjadřuje

v procentech. Charakterizuje relativní rozptýlení dat. Dají se s ním porovnávat variability souborů dat s nestejnými průměry, např. mocnosti jednotlivých horizontů.

Šikmost

Šikmost určuje (a)symetrii rozložení datového souboru kolem průměru. Je-li šikmost kladná, je rozdělení protaženo vpravo od průměru. Je-li záporná, vyskytuje se více hodnot nalevo od průměru.

5. Výsledky

5.1. Mocnosti horizontů

Orientační mocnosti horizontů, zjištěné při terénním šetření v lokalitách Ralsko a Týnec, jsou shrnuty v tabulkách 11 a 12.

Tab. 11: Mocnosti horizontů profilu z lokality Ralsko.

horizont	mocnost [m]
Ah	0,04
E	0,25
Bhs	0,03
Bs1	0,13
Bs2	0,55

Tab. 12: Mocnosti horizontů profilu z lokality Týnec nad Labem.

horizont	mocnost [m]
O	0,05
Ah	0,025
Ah/Ep	0,23
Bs1 oranžový	0,11
Bs2 šedý	0,065
Bs3	0,18

Pro co možná nejpřesnější kvantifikaci zásob uhlíku v půdě a další vizualizace půdních profilů je ale nutné mít co nejvíce informací o mocnostech zkoumaných horizontů a jejich variabilitě. V tabulce 13 jsou shrnuty vybrané základní statistické charakteristiky polohy a variability souboru podrobných mocností horizontů. Ty se již od hodnot v tabulce 11 liší.

Vlastnosti horizontu Bs nejsou úplné, protože v profilu nebylo patrné, zda se ještě nacházíme v Bs horizontu, nebo již na podložním C, z důvodu velmi pozvolnému přechodu těchto dvou horizontů. Bs byl tedy změřen jen od kontaktu s Bhs horizontem po spodní hranici výkopu. Charakteristiky tedy nelze považovat za úplně vypovídající, a proto zde nejsou komentovány.

Nejvyšších mocností, po zanedbání Bs horizontu, dosahoval horizont Ep. Dosahoval průměrné mocnosti 0,3 m, maximální mocnost činila 0,508 m a minimální 0,044 m. Tento horizont měl také nejnížší hodnotu variačního koeficientu (30 %), je tedy

ve zkoumaném profilu nejméně prostorově variabilní (pokud pomineme Bs).

Ah horizont je prostorově proměnlivý více, variační koeficient dosahuje hodnoty 55,91 %. Průměrná mocnost Ah je 0,109 m, minimální mocnost byl 0,02 m a maximální mocnosti dosahoval Ah hodnotou 0,296 m.

Druhým v pořadí, co se mocností horizontů týče, byl Bhs horizont. Ten dosahoval maximální mocnosti 0,384 m, průměrná mocnost byla 0,078 m, minimum pak jen 0,008 m. Jak dokládá hodnota variačního koeficientu (85,27 %), a jak je patrné i z výše zmíněných hodnot, tento horizont je prostorově nejvariabilnější. Také při terénních průzkumech bylo objeveno značné množství záteků a jazykovitých přechodů mezi horizontem Bhs a Bs. To samozřejmě komplikuje snahu o co nejpřesnější stanovení zásob uhlíku v půdě, jelikož mocnost horizontu je jedna z proměnných při výpočtu. Proto byly mocnosti pro lepší představu o průběhu horizontů v profilu dále vizualizovány (viz kap. 5.3. ve výsledcích této práce).

Tab. 13: Vybrané charakteristiky polohy a variability mocností jednotlivých horizontů profilu z Ralska. Komentář v textu.

[m]	Průměr	Medián	Modus	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylna	Variační koeficient	Šikmost
Ah	0,109	0,096	0,096	0,02	0,296	0,061	55,91 %	0,964967
Ep	0,301	0,308	0,344	0,044	0,508	0,09	30 %	-0,6111
Bhs	0,078	0,056	0,04	0,008	0,384	0,066	85,27 %	2,092298
Bs	0,712	0,728	0,72	0,332	0,868	0,091	12,72 %	-1,59153

5.2. Objemová hmotnost

Zjištěné objemové hmotnosti z profilu Ralsko jsou shrnuty v tabulce 14. V Ah byla zjištěna objemová hmotnost $1,053 \text{ g.cm}^{-3}$, v E $1,353 \text{ g.cm}^{-3}$. Dle očekávání objemová hmotnost směrem do hloubky v profilu narůstá. Výjimku tvoří některé části Bhs horizontu, kde lokálně objemová hmotnost dosahuje až hodnoty $1,951 \text{ g.cm}^{-3}$. To je způsobeno zvýšenou precipitací organické hmoty a železa, což vede ke vzniku ortšejnu. Proto také bylo z Bhs odebráno více vzorků pro stanovení průměrné objemové hmotnosti, aby nebyl následný výpočet zásoby uhlíku ovlivněn extrémními hodnotami.

Shrnutí vybraných statistických ukazatelů polohy a variability objemové hmotnosti Bhs horizontu je uvedeno v tabulce 15. Průměrná hodnota objemové hmotnosti pro Bhs je $1,306 \text{ g.cm}^{-3}$, hodnoty se pohybují od $1,065$ po $1,951 \text{ g.cm}^{-3}$, rozpětí dat tedy činí 0,886.

Vysokou variabilitu hodnot potvrzuje i hodnota variačního koeficientu (469 %). Hodnoty objemové hmotnosti v Ralsku jsou vyšší ($\rho \sim 0,1 \text{ g.cm}^{-3}$) než u profilu v Týnci (viz níže).

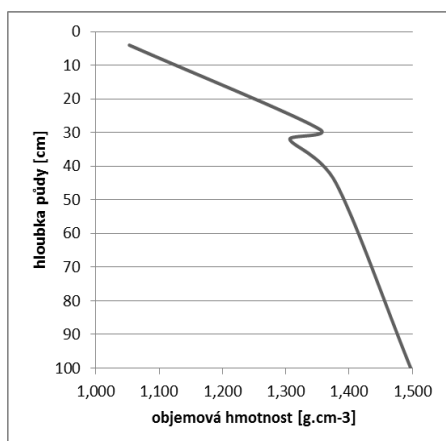
Tab. 14: Redukované objemové hmotnosti jednotlivých horizontů v profilu Ralsko

horizont	objemová hmotnost [g.cm^{-3}]
Ah	1,053
E	1,353
Bhs	1,136
	1,357
	1,321
	1,065
	1,126
	1,951
	1,187
Bs1	1,379
Bs2	1,497

Tab. 15: Výbrané míry polohy pro redukovanou objemovou hmotnost Bhs horizontu z profilu Ralsko [g.cm^{-3}]

průměr	medián	minimum	maximum	směrodatná odchylka	variační koeficient
1,306	1,187	1,065	1,951	0,281	464,9 %

Pokud hodnoty redukované objemové hmotnosti vyneseme do grafu spolu s hloubkou půdy (obr. 19), vidíme naopak v prostoru Bhs pokles objemové hmotnosti oproti přilehlým horizontům. To je způsobeno použitím průměrné hodnoty ($1,306 \text{ g.cm}^{-3}$). U vyvinutých podzolů se naopak v prostoru Bhs oproti přilehlým horizontům předpokládá mírné zvýšení hodnot objemové hmotnosti.

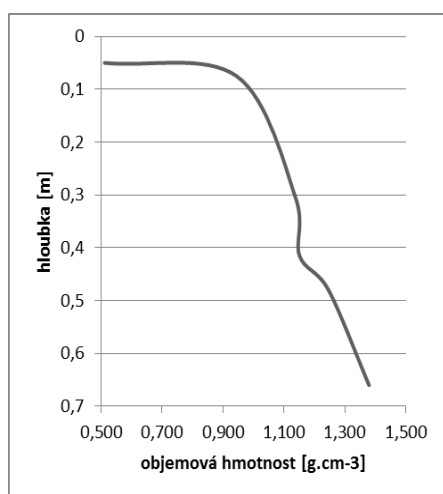


Obr. 18: Průběh obj. hmotností směrem do hloubky půdy v Ralsku.

Hodnoty redukované objemové hmotnosti pro profil z Týnce nad Labem jsou shrnuty v tabulce 16. Jejich průběh je znázorněn na obr. 20. Hodnoty směrem do hloubky opět narůstají, od 0,512 g.cm⁻³ pro O, přes 0,945 g.cm⁻³ až po 1,379 g.cm⁻³ v Bs3 horizontu. Jsou tedy v souladu se standardním průběhem objemové hmotnosti v půdě. Nízká hodnota objemové hmotnosti u O je způsobena velkým podílem organické hmoty, ze které se tento horizont skládá.

Tab. 16: Redukované objemové hmotnosti jednotlivých horizontů z profilu Týnec.

horizont	Objemová hmotnost [g.cm ⁻³]
O	0,512
Ah	0,945
AhE	1,138
Bs1	1,151
Bs2	1,246
Bs3	1,379



Obr. 19: Průběh obj. hmotnosti směrem do hloubky profilu v Týnci

Významnější zvýšení objemové hmotnosti na přechodu mezi E a Bs horizontem nebylo pozorováno (obr. 20). I to dokládá, že Bhs zde není vyvinutý. Vychýlení a mírná změna sklonu funkce od hloubky 40 cm a níže, kde se nachází rozhraní Bs2 a Bs3, může také dokládat přechod Bs do C.

5.3. Vizualizace prostorové variability přechodů jednotlivých horizontů

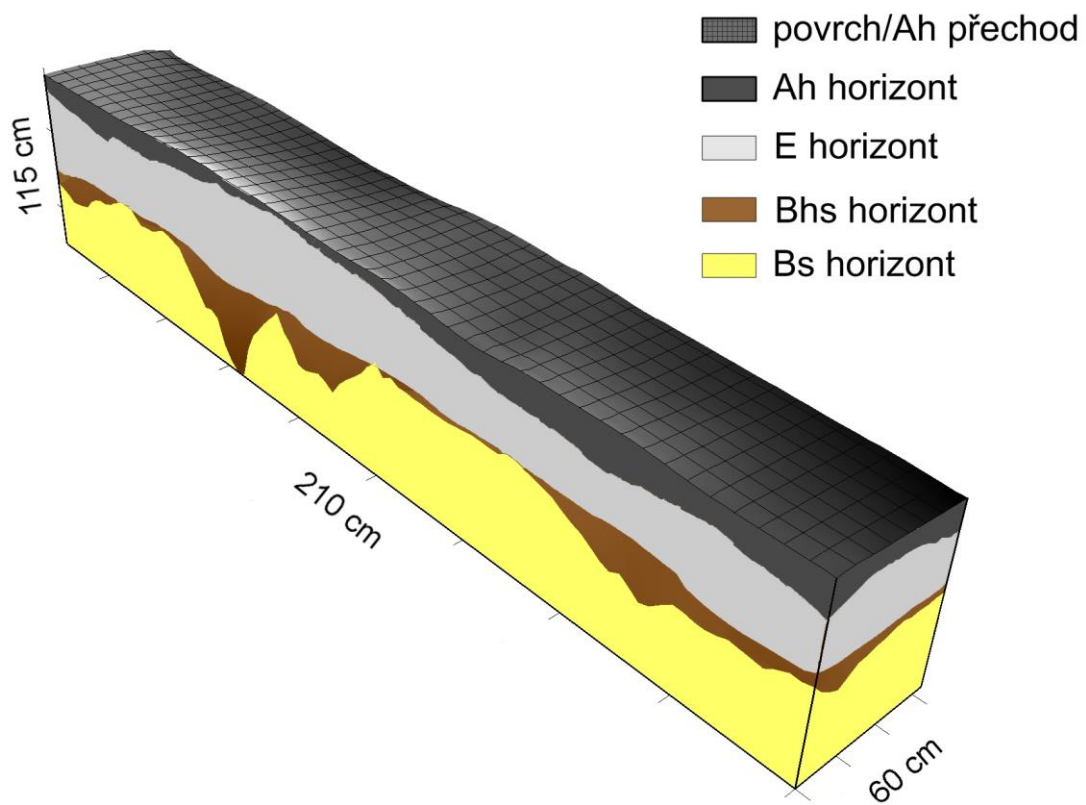
Pro přesnější kvantifikaci zásob uhlíku v půdě je třeba mít co možná nejlepší představu o prostorové variabilitě v přechodech horizontů, zejména pokud jsou dané horizonty bohaté na uhlík. Jedním z charakteristických znaků v profilu podzolu je jazykovitý přechod mezi horizonty Bhs a Bs a jeho značně nepravidelné rozmístění v prostoru. Jak již bylo zmíněno výše, právě tyto přechody způsobují značnou variabilitu v mocnostech horizontů. Při terénním průzkumu je možné narazit na úsek, který je prostorově zcela homogenní, stejně tak jako na úsek, který vykazuje značný počet záteků.

Na následujících obrázcích (21-24) jsou vizualizovány prostorové přechody jednotlivých horizontů. Jednotlivé osy nejsou ekvidistantní, šířka profilu je 210 cm (osa y), horizontální hloubka je 60 cm (osa x), výška je proměnlivá v závislosti na počtu horizontů, v případě přítomnosti celého profilu dosahovala maxima ~ 115 cm (osa z).

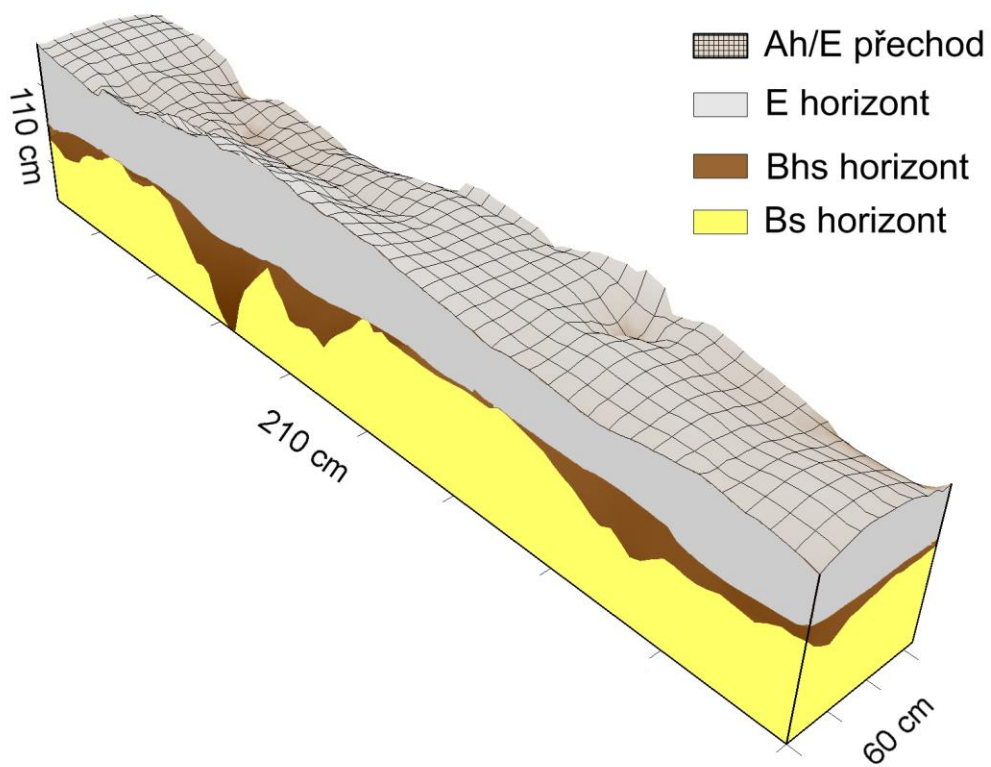
Jak je patrné z obrázků, nejvíce proměnlivý je přechod Bhs do Bs horizontu. Tento přechod (obr. 24) je charakterizován značným množstvím záteků a depresí v „povrchu“ horizontu. Za záteky jsou, podle našeho pozorování v terénu, v největší míře zodpovědné kořeny stromů (viz. také obr. 12). Kolem kořenů se akumuluje značné množství organické hmoty, která kořen věrně kopíruje. K tomu dochází jednak kontaktem kořenového systému s půdou a mechanickým transportem organické hmoty podél kořenů. V neposlední řadě se jedná o pozůstatky organiky z rozloženého kořenu. Dalším faktorem, který ovlivňuje morfologii půdního profilu, jsou vývraty. V případě úzkých a hlubokých záteků se ale zdá pravděpodobnější „kořenová teorie“.

Dalším značně proměnlivým přechodem je rozhraní mezi horizonty Ah a E. Zde je variabilita způsobena především disturbancemi v podobě vývratů, popř. antropoturbacemi. Ty, vzhledem k minulosti lokality v Ralsku, nesmí být opomíjeny.

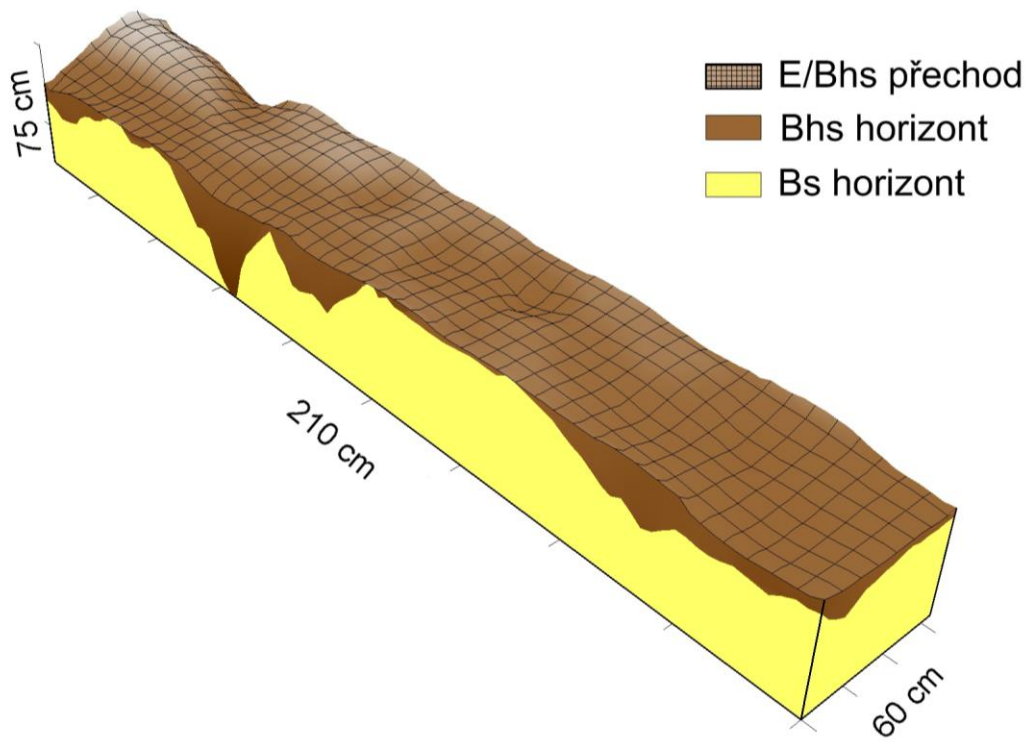
Oproti očekáváním se výraznější variabilita přechodů neprojevila mezi E a Bhs horizontem (obr. 23). Tento přechod, u kterého bylo předpokládáno výrazné kopírování přechodu Bhs/Bs, se ve výsledku jeví poměrně ploše.



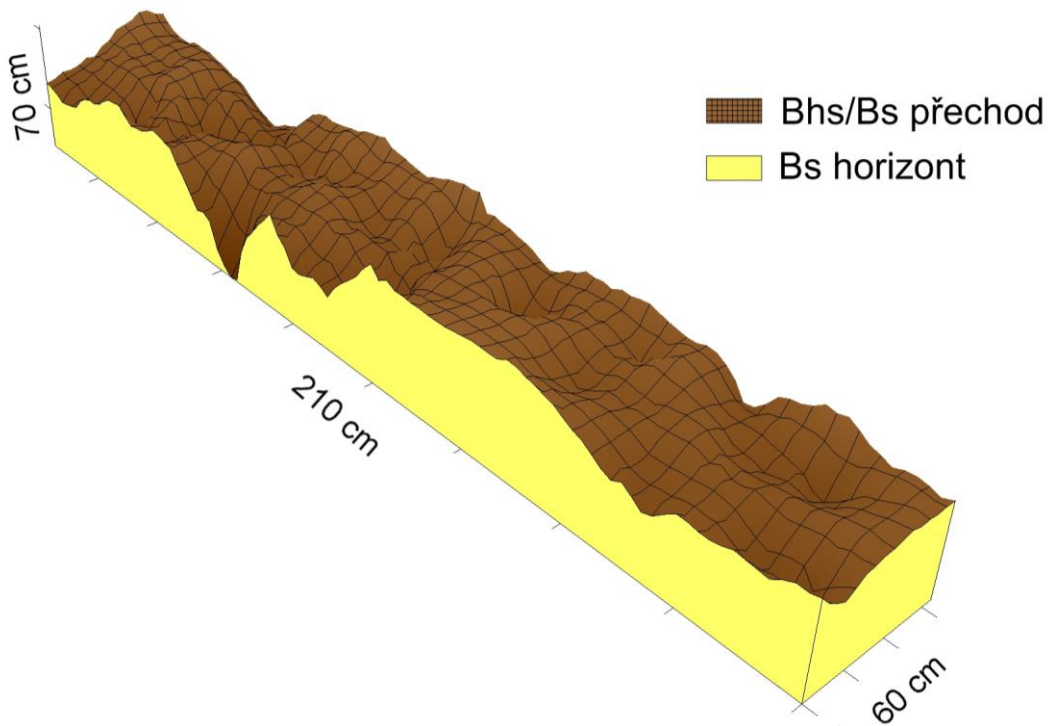
Obr. 20: Přechod mezi povrchem a Ah horizontem. Pozn. do Ah byl zahrnut i nadložní humus.



Obr. 21: Přechod mezi Ah a E horizontem.



Obr. 22: Přechod mezi E a Bhs horizontem.



Obr. 23: Přechod mezi Bhs a Bs horizontem.

5.4. Vizualizace vývratů

Vývraty ovlivňují distribuci organické hmoty v půdním profilu. V případě podzolů jsou navíc významným činitelem pedogeneze, protože vedou k větší diferenciaci stratigrafie profilu v prostoru deprese. Proto bylo provedeno orientační terénní šetření a vybraná vývratiště byla vizualizována. Lokalizace vybraných vývratů je na mapce na obr. 15 ve fyzickogeografické charakteristice této práce (kap. 3.2.).

Aby bylo postiženo pokud možno co nejvíc stadií pedogeneze v prostoru vývratišť, bylo vybráno několik vývratů rozdílného stáří. Následující popsané vývraty byly seřazeny podle svého relativního stáří od nejstaršího k nejmladšímu.

5.4.1. Brenná

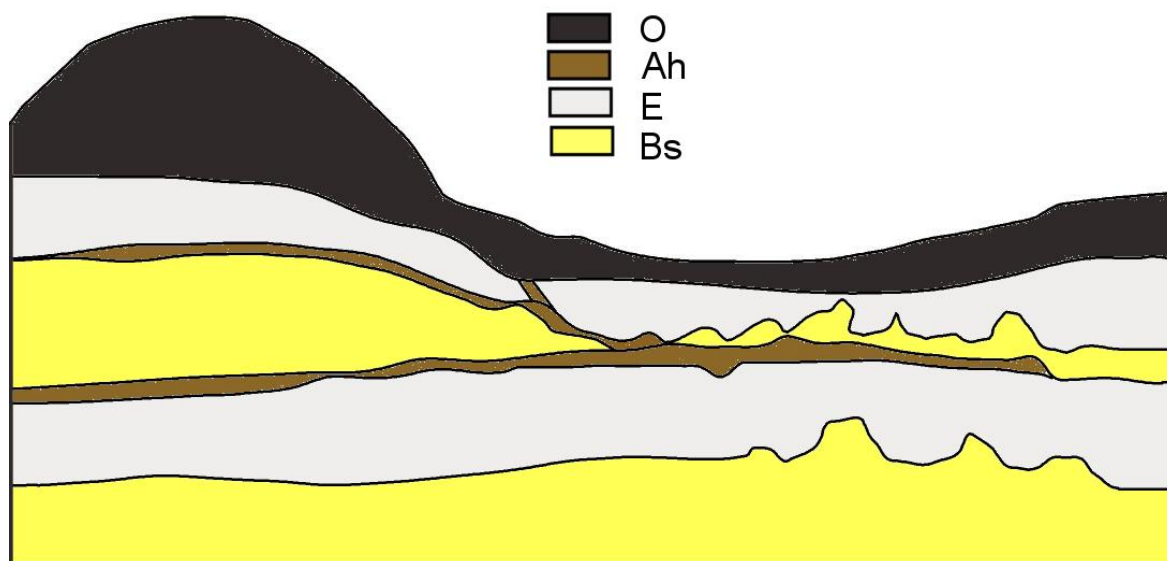
Nejstarší vývrát v Brenně se nacházel v mírném svahu s jižní orientací. V místě již nebyl přítomný kmen, pouze značně zetlelé torzo pařezu. Stáří vývratu se předpokládá na několik desítek let. V okolní vegetaci dominovala borovice lesní (*Pinus sylvestris*), vyskytovaly se i mladé stromky dubu (*Quercus*), rašeliník (*Spaghnum L.*) a brusnice brusinka (*Vaccinium vitis-idaea L.*). Schéma tohoto vývratu je na obr. 25.

V místě byla patrná kupa, méně už deprese, která byla skoro zarovnána s okolním povrchem. V tomto profilu se nenacházel ortštějn a nebyl zde patrný ani Bhs horizont. Namísto něj se celým profilem táhla tmavá 1 cm silná linie, která svým vzhledem odpovídala spíše Ah. Nejspíše se jedná o horizont, který se dříve nacházel v blízkosti povrchu.

Stratigrafie profilu pod kupou vykazovala značně změněný sled horizontů, a to: O-E-Ah-Bs-Ah-E-Bs. V E horizontu se vyskytovalo několik tmavších proužků, patrně částí Ah. Přejít mezi E a Bs byl ostrý a zvlněný, přechod spodní částí Bs do dalšího E byl zřetelný a rovný. E a Bs oddělovala linií tmavší barvy o mocnosti 1 cm. Pravděpodobně se jedná o dřívější Ah horizont, který se nacházel při povrchu a byl převrstven materiálem z kupy.

V prostoru deprese byla tato stratigrafie půdního profilu: O-E-Ah nebo Bs-Ah-E-Bs. E a Bs horizont byly značně promíchané a přechody mezi nimi byly zvlněné. V části deprese blíže ke kupě se vyskytovaly linie Ah, směrem ke konci depresi mizely a byl zde jen Bs.

Profil v koncové části deprese měl stratigrafii O-E-Bs-Ah-E-Bs. Přechod mezi Bs a E byl hodně zvlněný a horizonty byly značně promíchány. Přechod E a Bs byl oddělen tmavou linií Ah a byl rovný a ostrý.



Obr. 24: Schéma průřezu vývratištěm, lokalita Brenná, délka profilu jsou 2 m, rozdíl mezi vrcholem kupy a dnem deprese je 30 cm.

5.4.2. Jihozápadní svah

Tento vývrát se nacházel na vrcholu mírného svahu, orientovaného na jihozápad. Na místě se nacházely zbytky kmene, které byly ve značném stadiu rozkladu. Stáří tohoto vývratu bylo odhadnuto na první desítky let. Uvnitř kupy byly nalezeny dřevěné zbytky kmene, které již byly poměrně sypké, kompaktní byla pouze kůra. Vegetaci v okolí zastupovala borovice lesní (*Pinus sylvestris*), brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus L.*) a mladé semenáčky břízy bělokoré (*Betula pendula*). Schéma průřezu vývratištěm je na obr. 26.

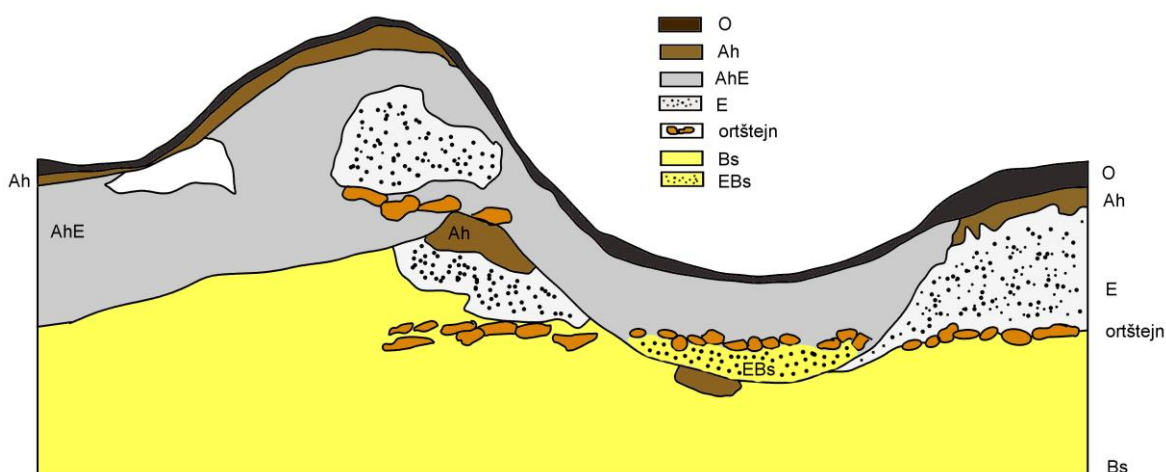
Mocnost vrstvy opadu byla u celého vývratu velmi malá, dosahovala pouze 1-2 cm. V celém vývratu se nacházely ortštějnové konkrece, které tvořily souvislou vrstvu. Byly obalené organikou, a to především na svrchní straně. Tuto vrstvu lze považovat za ekvivalent Bhs horizontu.

V nejvyšší části kupy měla půda velmi komplikovanou stratigrafii: O-Ah-AhE-E-

Ah/Bs-E-Ah-Bs. V hloubce 60 cm se vyskytoval ortštejn, který byl obalem velkým množstvím organiky. Poté následoval Bs, ve kterém byla uzavřená kapsa Ah. Bs byl vystřídán opět E, který v hloubce 86 cm následoval opět ortštejnový úsek, pod kterým byly opět malé kapsy Ah. Pod tímto se pak vyskytoval Bs horizont.

Stratigrafie půdního profilu v depresi: O-AhE-ortštejn-EBs-Bs. V hloubce 20 cm se nacházel ortštejn, ve 25-27 cm se nacházel výrazně prokořeněný horizont Bs. V něm se v hloubce okolo 43 cm vyskytovaly kapsy Ah a E, a opět ortštejn obalený organickou hmotou převážně na své svrchní straně.

Na konci deprese již měla půda relativně jednoduchou stratigrafii, a to O-Ah-E, s výskytem ortštejnu v hloubce 50 cm. Přechod O-Ah byl ostrý a zřetelný, přechod Ah-E postupný a zvlňný.



Obr. 25: Schéma vývratiště „Jihozápadní svah“. Bílé místo značí dřevěné zbytky kmene v čelní straně kupy. Délka vývratu je 270 cm, rozdíl mezi vrcholem kupy a dnem deprese je 70 cm.

5.4.3. U Maršů

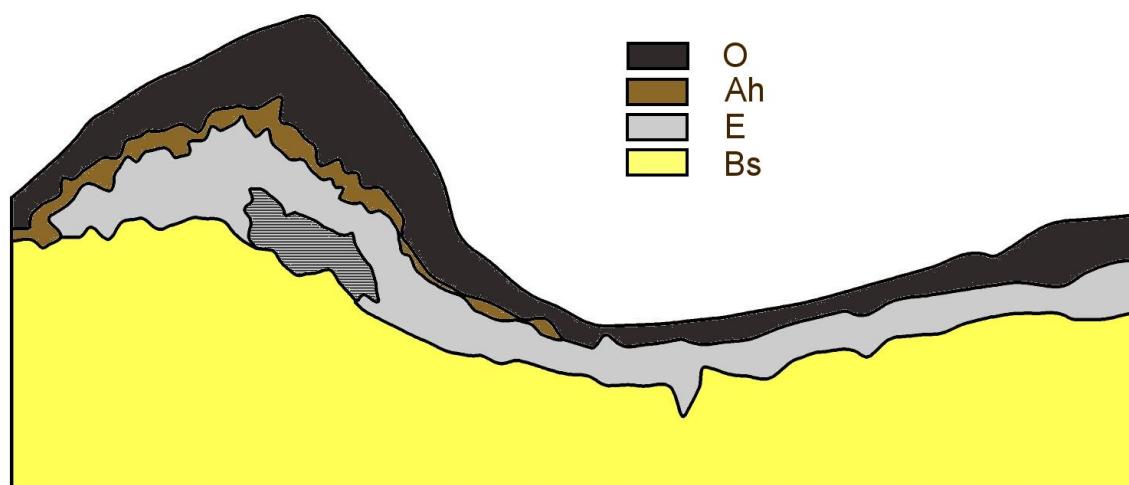
Vývrat z lokality „U Maršů“ byl starý několik let. Byl z něj odtěžen kmen. Kupa i deprese již byly zarostlé vegetací. Stáří tohoto vývratu předpokládáme v jednotkách let. V okolí se vyskytovala borovice lesní (*Pinus sylvestris*), smrk ztepilý (*Picea abies*), rašeliník (*Sphagnum L.*) a brusnice borůvka (*Vaccinium myrtilum L.*). Vývrat je zakreslen na obr. 27.

Stratigrafie profilu v kupě odpovídala O-Ah-E-Bs. V kupě se nacházel velmi mocný E horizont, který byl místy značně promíchán s Ah a organikou. Na druhou stranu byl

pouze v kupě patrný samostatný Ah horizont nebo jeho náznak, který v ostatních částech vývratiště zcela chyběl. V zadní straně kupy se nacházela dutina po části kmene nebo kořenu. Přechody horizontů byly poměrně jasné a zřetelné, sled horizontů nebyl přerušen ani převrácen.

V depresi měl půdní profil stratigrafii O-E-Bs. Přechod mezi horizonty O a E byl zřetelný, mezi E a Bs zvlněný a jazykovitý. Bhs nebyl v profilu vizuálně patrný, Bs měl však poměrně tmavou, hnědo oranžovou barvu.

V koncové části deprese měl půdní profil stratigrafii O-E-Bs, S velmi pozvolným přechodem mezi posledním i dvěma jmenovanými horizonty (7 cm).



Obr. 26: Schéma průřezu vývratištěm, lokalita „U Maršů“, délka profilu je 2,2 m, rozdíl mezi vrcholem kupy a dnem deprese je 60 cm. Šrafovaný prostor označuje dutinu v kupě.

5.4.4. Doksy

Pravděpodobně nejmladším vývratem v této práci byl vývrat na svahu kopce Borný u Doks, předpokládané stáří je maximálně několik let. Tento vývrat je schematicky nakreslen na obr. 28. Jednalo se o vyvrácenou borovici v mírném svahu se SZ orientací. Půda v lokalitě byla velmi mělká, skalnaté podloží se nacházelo již v hloubce 25-47 cm.

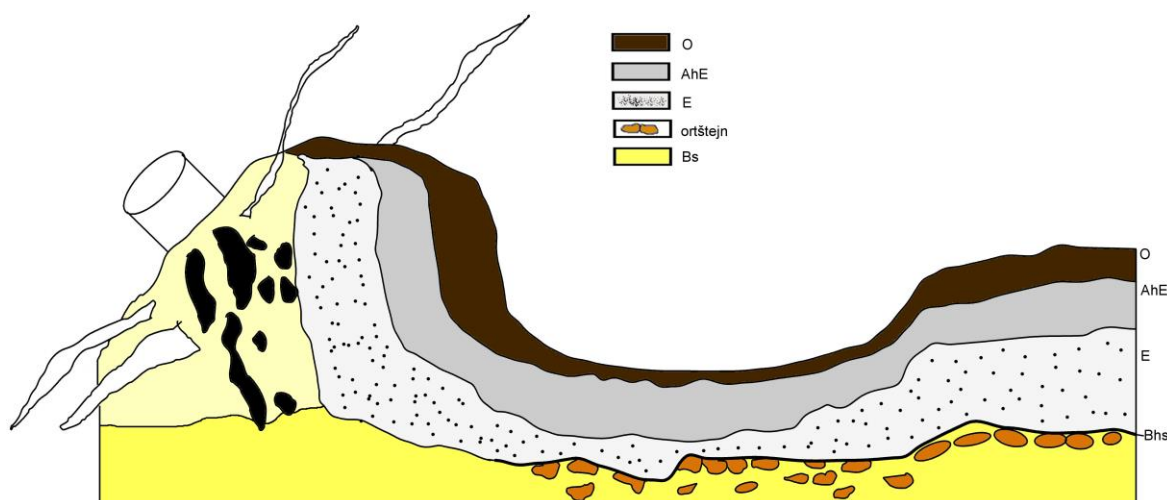
Kupa se skládala z pařezu s kořeny. Zde se vyskytující horizonty v pravé části kořenového balu byly převráceny o 90° oproti normálnímu stavu, ale byly jasně rozlišitelné. V levé části byly pouze kořeny a skelet.

Stratigrafie odpovídala OAh-AhE-E-Bs. V kořenech se nacházelo velké množství skeletu (ve schématu znázorněný černě) a písčitého materiálu. Bhs nebyl pro kořeny a

přítomný skelet patrný. Kupa byla porostlá vegetací, kterou tvořila brusnice brusinka (*Vaccinium vitis-idaea*).

Stratigrafie profilu v depresi odpovídala O-AhE-E-Bhs-Bs. V Bs horizontu bylo opět přítomno značné množství skeletu a v hloubce 25 cm se nacházelo pevné skalní podloží. Přechody mezi horizonty byly zvlněné, předchod Bhs do Bs byl pozvolný. Deprese byla oproti okolí spoře zarostlá brusnicí borůvkou (*Vaccinium myrtillus L.*).

Stratigrafie profilu na konci deprese byla O-Ah-AhE-E-Bhs-Bs. Bhs se skládal prakticky pouze z ortštejnu, V hloubce 47 cm se nacházel skalní podklad.



Obr. 27: Schéma vývratiště v lokalitě Doksy. Oranžovou barvou je znázorněn ortštein, černou skelet v kořenovém balu. Délka profilu vývratiště je 130 cm, hloubka deprese 25 cm.

5.5. Obsah uhlíku v půdě

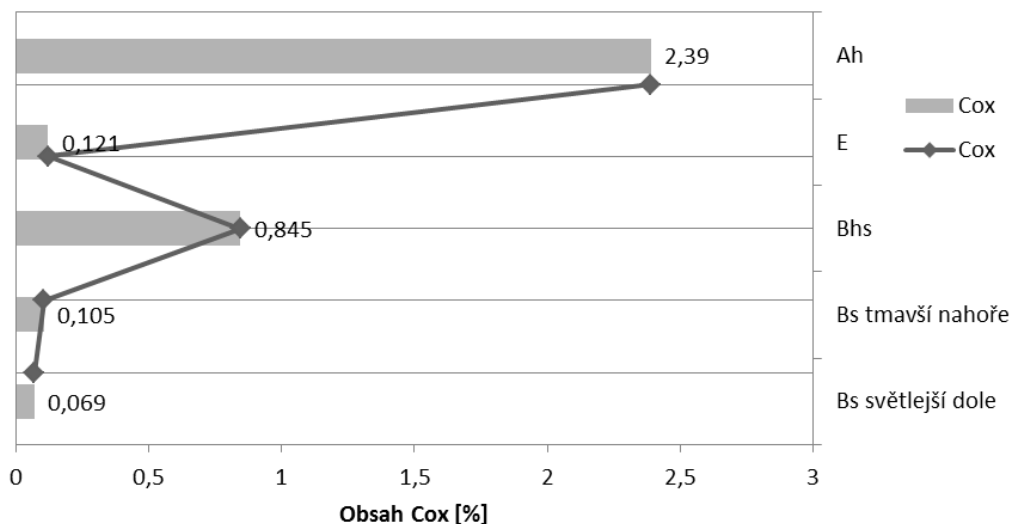
Obsah uhlíku byl v lokalitě Ralsko a Týnec zjišťován pro potřeby výpočtu zásob uhlíku v půdě.

Zjištěné hodnoty pro lokalitu Ralsko jsou shrnuty v tabulce 17. Na obrázku 29 je dobře patrný typický průběh Cox v profilu podzolu. Nejvíce Cox se nachází v Ah horizontu (2,39 %), poté následuje prudký pokles na hodnotu 0,121 % v E horizontu. Poté obsah C opět narůstá na 0,75-0,94 % v Bhs horizontu, což ukazuje akumulaci uhlíku v tomto horizontu. Dále směrem do hloubky již obsah uhlíku dle očekávání klesá. V Bs je patrná diferenciace na Bs1 (tmavší část), kde je obsah Cox vyšší (0,105 %), a Bs2, která je světlejší s obsahem Cox 0,069 %.

Tab. 17: Obsahy Cox v různých částech profilu PZr z Ralska.

horizont	Cox [%]
Ah	2,39
AhE vývrat	1,77
E	0,121
Bhs	0,75
Bhs zátek	0,94
Bs1 tmavší	0,105
Bs2 světlejší	0,069
org. žilka	0,12

Protože se v Ralsku v Bs poměrně často vyskytovaly i tmavé žilky s organickou hmotou, byl odebrán vzorek pro stanovení Cox i z tohoto prostoru. Zjištěná hodnota Cox (0,12 %) je sice poměrně významná, jelikož však žilky nedosahovaly velkých mocností, nebyly do dalšího hodnocení a výpočtů zařazeny.



Obr. 28: Obsah Cox [%] v jednotlivých horizontech podzolu z lokality Ralsko. Pro Bhs je použita průměrná hodnota (0,845 %).

V profilu z Týnce nad Labem bylo v jednotlivých horizontech v porovnání s profilem z Ralska dosahováno vyšších obsahů uhlíku, hodnoty jsou v tabulce 18. Hodnoty Cox dosahovaly maxima v Ah horizontu (22,906 %). Tato hodnota je pro Ah horizont netypická, spíše odpovídá organickým horizontům. Může tedy být způsobena nezřetelným přechodem mezi Ah a O, kdy mohlo dojít k záměně těchto dvou horizontů a odběru většího množství vzorku pro Ah z O horizontu.

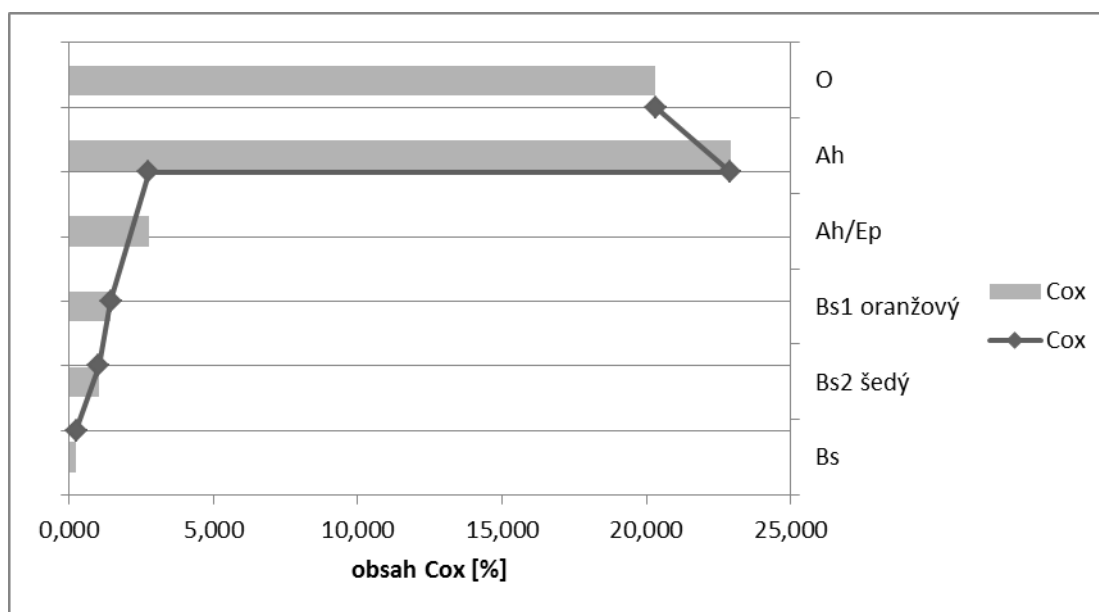
Hodnota Cox zjištěná v horizontu Ah/Ep je 2,764 %. Tato hodnota odpovídá spíše Ah horizontu a je pravděpodobně způsobena nevyvinutostí půdního profilu. V profilu nejsou ještě vyvinuty jasně diferencované horizonty Ah-Ep-Bs. AhEp je charakteristický šedou barvou, která většinou bývá až v Ep horizontu, a vypadá jako smíchaný Ah a Ep dohromady.

Hodnoty Cox pro Bs1 a Bs2 již odpovídají těmto horizontům (1,442 % resp. 1,021 %). Hodnoty Cox rovněž reflektují jejich barevnou diferenciaci.

V Bs3 hodnota Cox dosahovala již jen 0,246 %, jde tedy nejspíše o C horizont.

Tab. 18: Obsah Cox v horizontech PZr z Týnce.

horizont	Cox [%]
O	20,312
Ah	22,906
Ah/Ep	2,764
Bs1 oranžový	1,442
Bs2 šedý	1,021
Bs3 žlutý	0,246



Obr. 29: Obsah uhlíku v jednotlivých horizontech profilu podzolu arenického z lokality Týnec n. L.

O nevyvinutosti podzolové stratigrafie hovoří i graf na obrázku 30. V prostoru mezi AhEp a Bs1 by měl být patrný nárůst hodnoty Cox. Ten zde však přítomný není, nedošlo

tedy ještě formování Bhs horizontu s převahou organické hmoty. Rezivá barva Bs1 však hovoří o možné formaci horizontu s iluviací seskvioxidů.

5.6. Zásoba uhlíku v půdě a její vizualizace

5.6.1. Zásoby pomocí jedné hodnoty mocnosti

Nejprve byla vypočítána zásoba půdního uhlíku s využitím hodnot mocností horizontů, které byly zjištěné při terénním šetření. Tyto výsledky jsou v tabulce č. 19.

V Ah dosahují zásoby uhlíku $10,065 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Následuje E s hodnotou $4,108 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Tato poměrně vysoká hodnota je dána především tím, že E horizont dosahuje značných mocností. V Bhs byla zjištěna zásoba $3,311 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Pro úplnost byla spočítána i zásoba v Bs1 a Bs2, ale tyto hodnoty jsou spíše orientační, protože přechod mezi těmito dvěma horizonty byl plynulý a v případě Bs2 je spodní hranice omezena výkopem. Nicméně v případě Bs1 byla zásoba uhlíku $1,890 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, pro Bs2 pak $5,689 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. To je dáno především velkou mocností tohoto horizontu. Celkově se v profilu nachází $25,064 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

V případě Ah i Bhs se jedná o relativně nízkou hodnotu zásob uhlíku. Proto bylo přistoupeno k využití podrobných mocností horizontů. Tím by mělo dojít k postižení poměrně velké variability v mocnostech horizontů ve výpočtu, a ke zpřesnění odhadu zásob uhlíku.

Tab. 19: Zásoba uhlíku získaná prostým aplikováním vzorce na jednu hodnotu mocnosti horizontu, bez zjišťovaných podrobných hodnot mocností horizontů. Ralsko.

horizont	mocnost cm	Cox	zásoba C $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	t C $\cdot\text{ha}^{-1}$
Ah	4	2,39	1,007	10,065
E	25	0,121	0,411	4,108
Bhs	3	0,845	0,331	3,311
Bs1	13	0,105	0,189	1,890
Bs2	55	0,069	0,569	5,689
celkem	100		2,506	25,064

V Týnci nad Labem (viz tabulka 20) je zásoba uhlíku v O a Ah horizontu, a to $5,198$ resp. $5,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. V AhEp dosahuje zásoba uhlíku svého maxima hodnotou $7,236 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. V Bs1 je obsaženo $1,826 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$, směrem hlouběji již zásoby klesají až k $0,61 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ v Bs3.

V případě profilu z Týnce je celková zásoba uhlíku 21,107 t.ha⁻¹. Jedná se takřka o stejnou zásobu jako v případě Ralska, i když pouze s poloviční mocností profilu. Tato hodnota je však dána tím, že v profilu z Ralska nebyly zahrnuty svrchní organické horizonty a také tím, že v Týnci má nevyvinutý profil poměrně vysoký obsah uhlíku Cox v rámci celého profilu, protože ještě není významněji diferencován. Pro další hodnocení a porovnávání již tento profil nebyl použit.

Tab. 20: Zásoba uhlíku v profilu podzolu z Týnce.

horizont	mocnost [m]	Cox [%]	zásoba uhlíku [kg.m ⁻²]	t.ha ⁻¹
O	0,05	20,312	0,520	5,198
Ah	0,025	22,906	0,541	5,410
Ah/Ep	0,23	2,764	0,724	7,236
Bs1	0,11	1,442	0,183	1,826
Bs2	0,065	1,021	0,083	0,827
Bs3	0,18	0,246	0,061	0,610
celkem	0,66		2,111	21,107

5.6.2. Zásoby uhlíku v půdě z podrobných mocností horizontů

Hodnoty zásob uhlíku v horizontech Ah a Bhs s využitím podrobných mocností tohoto horizontu z celého výkopu jsou shrnuty v tabulce č. 21. Jedná se o hodnoty v kg.m⁻², pro získání hodnot v t.ha⁻¹ stačí tuto hodnotu vynásobit 10.

Průměrná zásoba uhlíku v Ah horizontu arenického podzolu z profilu Ralsko je 2,753 kg.m⁻². Tato hodnota je vyšší než průměrná hodnota zásoby uhlíku, která byla získána aplikací pouze jedné hodnoty mocnosti horizontu (1,007 vs. 2,753 kg.m⁻²). To ukazuje na značné podhodnocení zásob v tomto horizontu při orientačním šetření. Ty se pohybovaly mezi 0,503 a 7,448 kg.m⁻² v závislosti na mocnosti tohoto horizontu. Na značnou proměnlivost ukazuje i hodnota variačního koeficientu (55,9 %). Vyšší mocnosti Ah jsou v tomto profilu způsobeny převážně disturbancemi, které zapříčiňují pronikání organického materiálu do větších hloubek v půdě.

Průměrná zásoba uhlíku v E je 0,494 kg.m⁻². Tento horizont dosahoval nejmenší variability (var. koeficient 30 %). Záporná hodnota šikmosti nám ukazuje, že nejčastěji se zásoba pohybovala napravo od průměru. Horizont není tedy z hlediska uhlíkové bilance nijak významný, nicméně nelze jej zanedbat.

V případě Bhs je velmi významné rozpětí hodnot zásob uhlíku, od 0,088 po 4,239 kg.m⁻², s průměrnou hodnotou 0,857 kg.m⁻². Variační koeficient byl u tohoto horizontu nejvyšší, a to 85,3 %. Hodnota modusu (0,442 kg.m⁻²) nám říká, že v Bhs převládají spíše zásoby uhlíku kolem 0,4 kg.m⁻², ale vyskytují se zde i výrazné extrémy, které ovlivňují celkový průměr (např. 4,239 kg.m⁻²). Obsah uhlíku v Bhs je oproti Ah zhruba 30%.

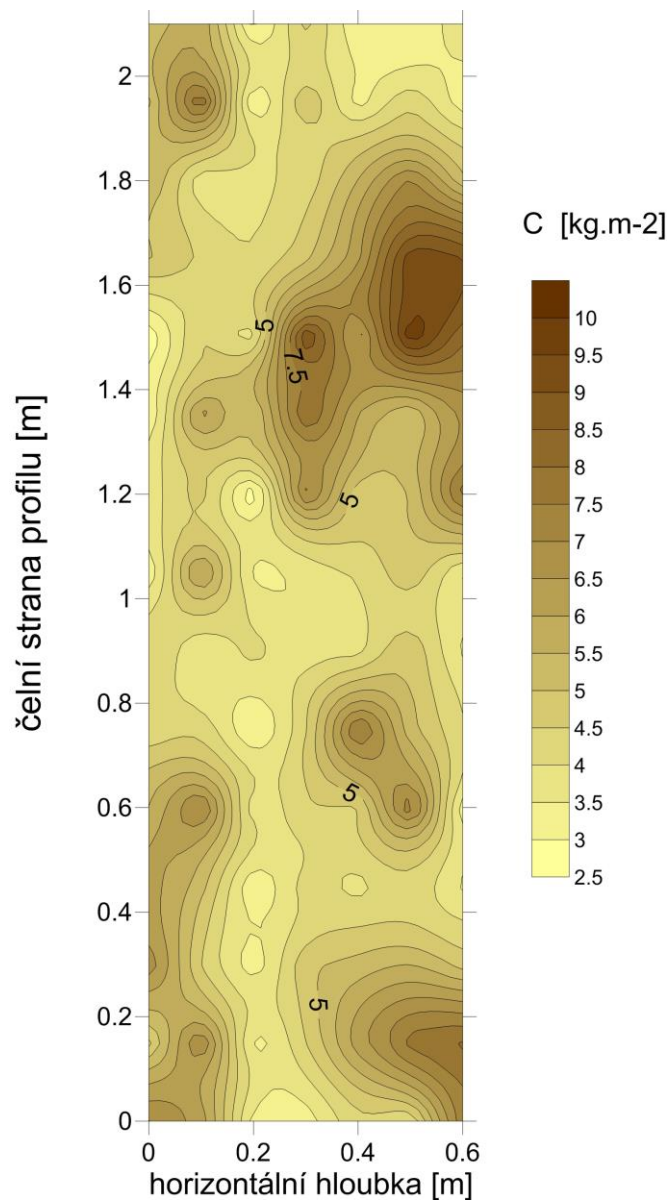
I hlouběji v půdě se nachází velké množství zásob uhlíku, i když jejich množství klesá spolu s narůstající hloubkou. Pro úplnost dodejme i průměrnou zásobu v Bs v našem výkopu, jež činí 0,894 kg.m⁻².

Tab. 21: Zásoba uhlíku v horizontech PZr z Ralska, aplikováním podrobných mocností z celého výkopu. Uvedené zásoby jsou v kg.m⁻²

Kg.m ⁻²	průměr	medián	modus	minimum	maximum	šířkost	směrodatná odchylna	variální koeficient
Ah	2,753	2,416	2,416	0,503	7,448	0,965	1,539	55,9 %
E	0,494	0,506	0,565	0,072	0,835	-0,611	0,148	30 %
Bhs	0,857	0,618	0,442	0,088	4,239	2,092	0,730	85,3 %
Bs	0,894	0,913	0,903	0,417	1,089	-1,592	0,114	12,7 %

Pro znázornění prostorového rozmístění zásob uhlíku v půdě byla provedena její vizualizace pro jednotlivé horizonty (příloha 3 a 4) a pro celý profil (obr. 31). Vizualizace znázorňuje pohled na celý výkop, resp. vybrané horizonty, shora. Na obr. XY jsou velmi dobře patrné záteky v Bhs horizontu a disturbance v Ah horizontu.

Celková zásoba uhlíku ve zkoumaném půdním profilu v Ralsku činí v průměru 4,997 kg.m⁻².



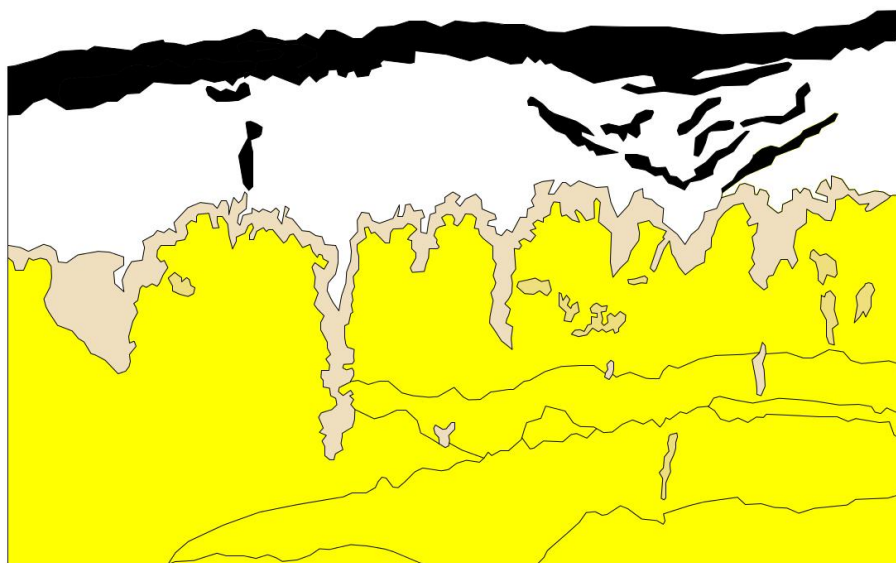
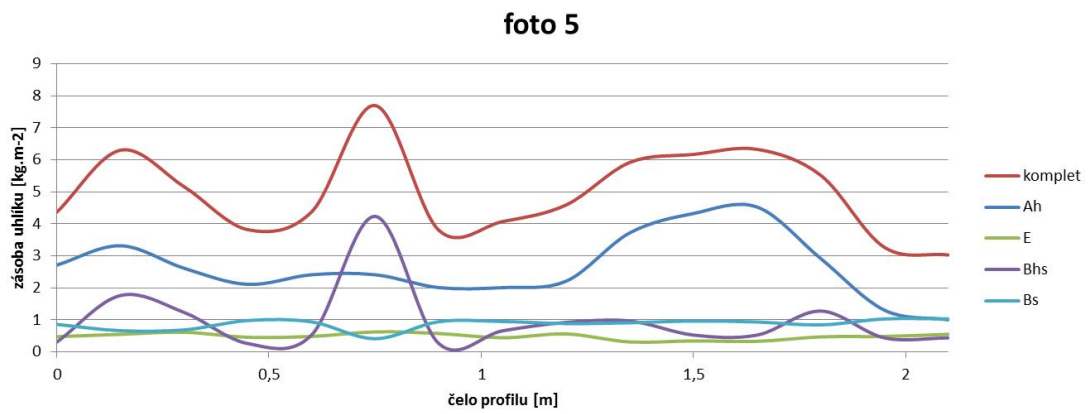
Obr. 30: Vizualizace zásob uhlíku v celém prostoru výkopu z Ralska ve všech horizontech (v kg.m⁻²).

5.6.3. Průběh zásob uhlíku v půdním profilu

Další možností zobrazení proměnlivosti v prostorovém rozložení zásob uhlíku v půdním profilu je znázornění jejich průběhu v horizontech. Ten byl vytvořen pro všech 7 půdních profilů z celého výkopu. Ukázka je na obr. 32, všechny průběhy jsou pak součástí příloh této práce (příloha 5 – 11).

Graf znázorňuje průběh zásob uhlíku v jednotlivých horizontech (v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$). Pod položkou „komplet“ se pak nachází součet zásob ve všech horizontech, takže reprezentuje kompletní zásobu uhlíku v daném bodě. Na ose x je vynesena vzdálenost v metrech, odpovídající půdnímu profilu na obrázku pod grafem, na ose y pak odpovídající zásoba uhlíku v daném bodě.

Pro každý profil z celého výkopu byl tedy vizualizován průběh zásob C v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Z toho je vidět, že zásoba C je primárně ovlivněna zásobou uhlíku v Ah horizontu. Nejvyšších hodnot dosahuje v místech se zvýšenou mocností Ah. Ta je patrně způsobena pedoturbacemi – vývraty. Značně zvýšená je pak zásoba uhlíku i v prostoru, kde se nachází zátek v Bhs horizontu.



Obr. 31: Průběh zásoby uhlíku [kg.m⁻²] v jednotlivých horizontech a celková zásoba („komplet“) v pátém profilu

6. Diskuze

Zjištěné hodnoty Cox, objemové hmotnosti, mocnosti horizontů a zásob uhlíku v půdách byly porovnány s několika pracemi. Ve výběru prací byl zohledněn zkoumaný půdní typ a jeho geografická poloha. Aby bylo možné srovnání zásob uhlíku v půdě, byly hodnoty vypočítané v rámci této práce převedeny na $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Degórski (2007) ve své práci analyzoval vybrané půdní vlastnosti a znaky podzolů a kryptopodzolů Střední a Severní Evropy (objemová hmotnost viz tab 1, organický uhlík obr. 33). Mokma et al. (2004) srovnával podzoly různého stáří a jejich vybrané vlastnosti na glaciálních sedimentech ve středním a jižním Finsku (tab. 23). Výzkum Schultze et al. (2009) se zabýval organickou hmotou v podzolech v pohoří Fichtelgebirge v nadmořské výšce 770 m.

6.1. Porovnání objemových hmotností

Prostorová a vertikální variabilita objemové hmotnosti (BD) je závislá na rozložení kořenů rostlin, stejně tak jako na obsahu organické hmoty a intenzitě podzolizace (Degórski 2007). Hodnota regresního koeficientu této závislosti pro podzoly je $r = -0,522$. „Relativně nízká hodnota korelace, ač statisticky významná, potvrzuje komplexní povahu faktorů ovlivňujících objemovou hmotnost. Nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti byly dosaženy ve stejných profilech, ve kterých byly i vysoké obsahy organické hmoty. To může být považováno za jeden z nejdůležitějších faktorů determinující vertikální a horizontální rozložení hodnot objemové hmotnosti“ (Degórski 2007).

Dle Degórski (2007) narůstají hodnoty BD v organických horizontech podzolů Severní a Východní Evropy směrem do hloubky (viz.tab. 1). V organických horizontech od $0,152 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v horizontu opadanky (O), po $0,251 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v Oh. V minerálních horizontech z písčitých substrátů se objemová hmotnost také zvyšuje směrem do hloubky, od $1,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v humusovém horizontu (Ah v profilu Krucz v Polsku) až k $1,76 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v matečné hornině (profil Baranowicze v Bělorusku). Průměrné hodnoty BD v rozdílných horizontech podzolů se pohybují mezi $1,30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v AEes horizontu a $1,58 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v C horizontu.

V porovnání s těmito hodnotami se redukované objemové hmotnosti z profilu Ralsko (Ah $1,053 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a Bhs $1,306 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) jeví jako průměrné a jsou podobné zjištěným

hodnotám v severní a východní Evropě.

Tab. 22: Vybrané půdní vlastnosti podzolu z Německa. Upraveno podle Schultze et al. (2009).

Horizont	mocnost [cm]	obj.hmotnost [g.cm ⁻³]	C [%]
EA	5,2	0,6	8,3
Bsh	5,3	0,75	6
Bs	11,4	0,79	3,6

Nižší objemovou hmotnost zjistil u podzolu v pohoří Fichtelgebirge Schultze et al. (2009, viz tabulka 22). To je pravděpodobně způsobeno faktem, že podzol se nacházel v nadmořské výšce 770 m n. m. Horské podzoly a kryptopodzoly dosahují nižších objemových hmotností a jsou charakteristické kyprými B horizonty.

6.2. Organický uhlík

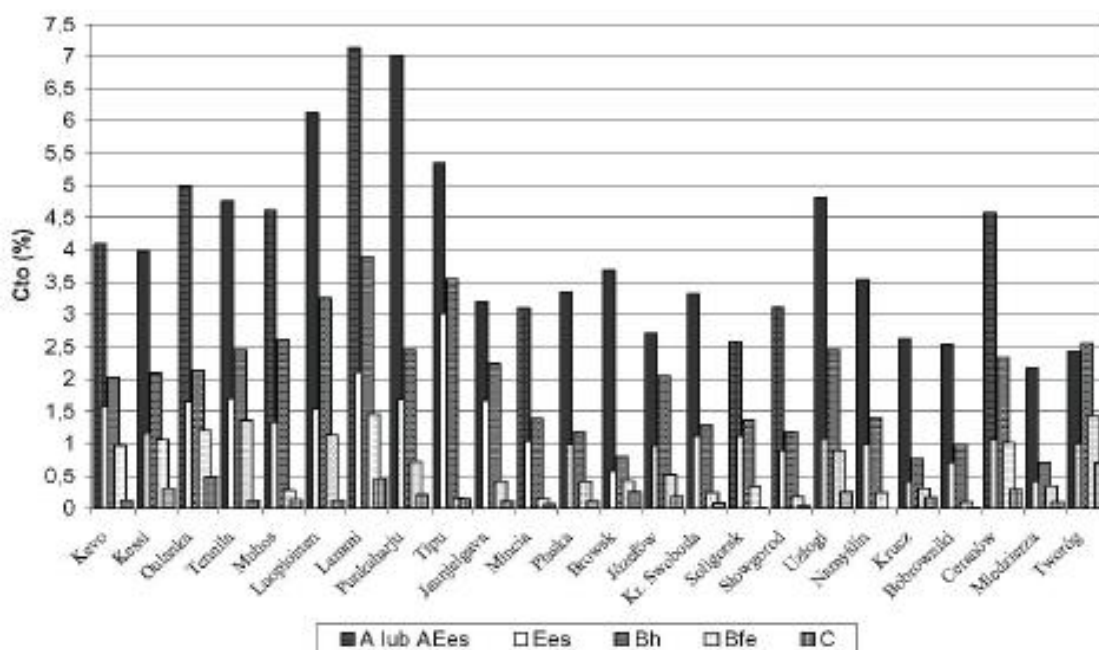
Stejně jako v práci Degórskeho (2007) a u starších profilů v práci Mokmy et al. (2004, viz tabulka 23) klesá obsah uhlíku (C_{ox}) v profilu v Ralsku v půdě směrem do hloubky, s výjimkou nárůstu jeho množství v Bhs horizontu. To je patrné i v obr. 29 ve výsledcích této práce. Stejný nárůst pro profil Týnec patrný není (obr. 30), protože Bhs horizont není ještě vyvinut. To je v souladu se zjištěním Mokmy et al. (2004), který u mladých podzolů nepozoroval nárůst C_{ox} v prostoru Bhs a naopak našel relativně vysoké hodnoty C_{ox} v prostoru E horizontu, kde organická hmota ještě není přesunuta hlouběji do půdy (viz tabulka 23 a tabulka 18). To dokládá, že profil z Týnce je mladší než profil z Ralska.

Nejvyšších hodnot (až 7 % C₁₀) dosahoval v práci Degórskeho (2007) obsah celkového uhlíku (C₁₀) v organických horizontech v profilech „Finnish Lakelands“ a „Berezina-Desna Lowland“. To svědčí o velké akumulaci organické hmoty v těchto oblastech, pro které je charakteristické chladné klima a krátká vegetační doba. Nejčastěji ale hodnoty C₁₀ pro Ah nabývaly hodnot 2,5 – 4,5 %. V případě Bh se hodnoty C₁₀ pohybovaly mezi 1-4 % (viz obr. 33).

V Ralsku byly zjištěné hodnoty 2,39 % pro Ah a 0,845 % pro Bhs, jsou tedy průměrné či spíše podprůměrné. To je v souladu s tvrzením Degórskeho (2007), že v podzolech směrem k jihu klesá obsah organické hmoty.

Ze srovnání s prací Mokmy et al. (2004) vyplývá, že vzhledem k obsahu organické

hmoty se profil v Ralsku řadí ke starším podzolům.



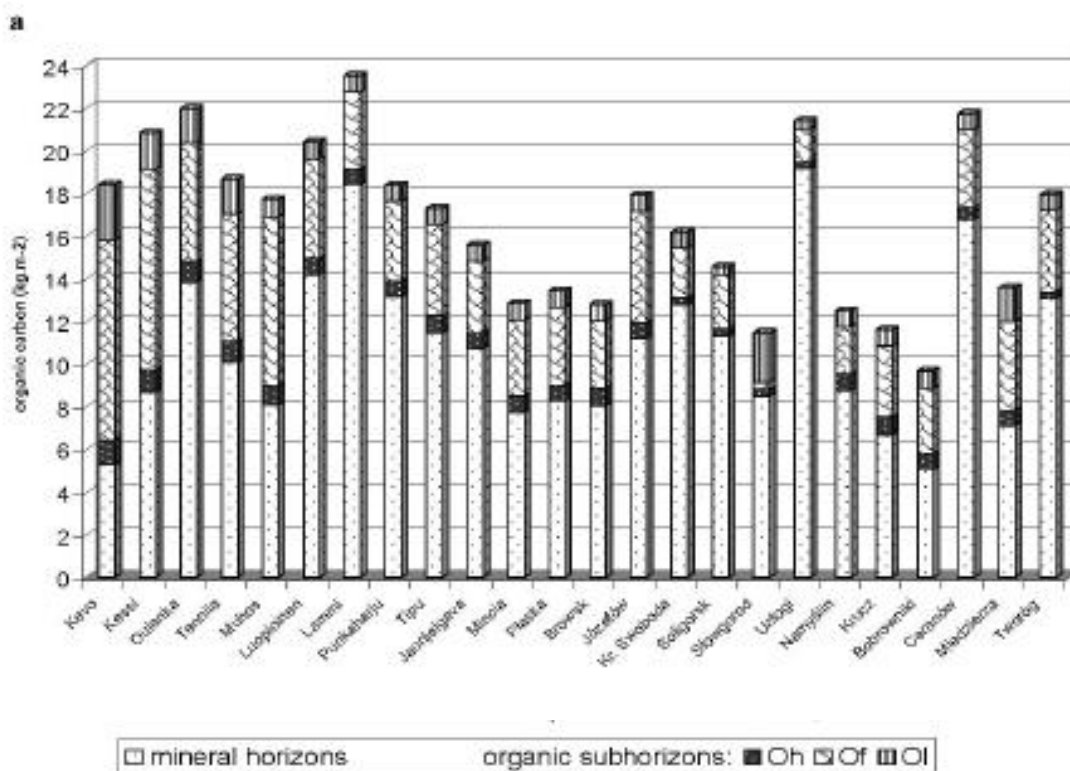
Obr. 32: Množství celkového uhlíku Cto (%) v minerálních horizontech podzolů severní a východní Evropy. Nejvíce uhlíku se nachází v organických horizontech (Degórski 2007).

Tab. 23: Množství organického (Corg, %) ve vybraných horizontech podzolů různého stáří. Upraveno podle Mokma et al. (2004)

stáří	horizont	C _{org} (%)	stáří	horizont	C _{org} (%)
230	E	0,5	8300	E	0,1
	Bs	0,2		Bhsm	1,6
340	E	0,4	9100	Bs	1,4
	Bs	0,3		E	0,8
450	E	0,3	10700	Bhsm	2,8
	Bs1	0,3		Bs	3,2
	Bs2	0,3		E	0,2
	Bs3	0,2		Bhsm	2,7
560	E	0,4	11300	Bs1	1,5
	Bs	0,4		Bs2	0,7
670	E	0,7	1800	Bs3	0,8
	Bs	0,2		A1	6,8
900	E	0,3	11300	A2	4,5
	Bs1	0,2		E	0,4
	Bs2	0,2		Bs	1,4
	Bs3	0,1			
1800	E	0,3			
	Bs1	0,7			
	Bs2	0,6			

6.3. Zásoby uhlíku v půdě

Kvantifikace C_{ox} v lesních půdách v ČR se opírala o data z ÚHUL, který mezi lety 1993-2001 zjišťoval obsah uhlíku ve svrchních 30 cm půd, a to včetně nadložního humusu. Těchto 30 cm je pro uhlíkovou bilanci lesa dle Marka a kol. (2011) rozhodující, a proto nebyly hlouběji ležící horizonty do hodnocení projektu CzechCarbo zahrnuty. Nadložní humus je však sám o sobě poněkud nestálou složkou lesního ekosystému. Zásobu uhlíku v něm ovlivňují managementové postupy úpravy lesů a jejich druhová skladba, které jsou zároveň zodpovědné i za stabilitu C v nadložních horizontech. Přitom nejen výsledky Degórského (2007) ukazují, že velké množství zásob uhlíku se nachází i v minerálních horizontech (viz obr. 34).



Obr. 33: Zásoby uhlíku v podzolech ve svrchním 1 m ukazují, že velká část uhlíku (> 50 %) je alokována i v minerálních horizontech (Degórski 2007)

Degórski (2007) zkoumal zásoby uhlíku v podzolech seskupených podle geografického regionu. Jeho výsledky jsou shrnuty v tabulce 24. Průměrně se v celém profilu podzolu nachází 11,6 až 19,9 kgC.m⁻².

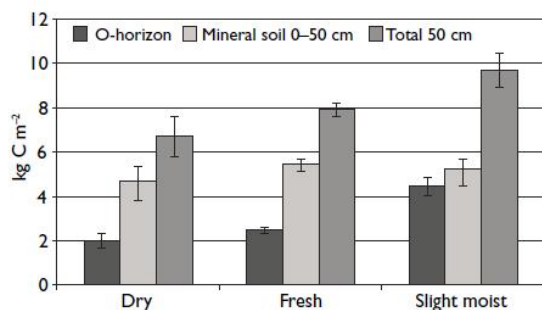
Tab. 24: Průměrné zásoby uhlíku (MC) v profilech o ploše 1m² (1m hlubokých). Rozděleno dle geografické polohy půdních profilů, upraveno podle Degórski (2007)

No. of group	Number of profile	Organic horizon		Mineral horizons to 1 m deep		Whole profile	
		MC _m	d	MC _m	d	MC _m	d
kg m ⁻²							
podzolic soils							
I	5	10.3	3.2	9.2	3.4	19.5	5.4
II	4	5.6	0.5	14.3	4.0	19.9	5.9
III	10	4.3	1.2	11.5	4.3	15.8	4.5
IV	1	3.7	0.0	8.8	0.0	12.5	0.0
V	4	5.2	0.7	6.4	0.8	11.6	1.4

Podzolic soils, groups:

- I. Lappland (profiles: 1, 2, 3, 4, 5);
- II. Finnish Lakelands (profiles: 6, 7, 10) and Eastern Baltic Coastland (profile 11);
- III. Southern Baltic Lakelands (profile: 12, 13, 15), Podlasie-Byelorussian Plenteous (profile: 16, 19, 32), Berezina-Desna Lowland (profiles: 20, 22, 24), Northern Podkarpacie (profile 17);
- IV. Western Baltic Lakelands (profile 26);
- V. Eastern Baltic Lakelands (profiles: 28, 29), Silesian-Cracovian Upland and Central Małopolska Upland (profiles: 35, 38);

Ollson et al. (2009) kvantifikoval zásobu uhlíku nejen pro epipedon, ale i pro O horizont a následujících 50 cm minerální půdy v podzolech s různým hydrologickým režimem (obr. 35). Průměrná hodnota zásob uhlíku v podzolech Švédska je 8,2 kg.m⁻².



Obr. 34: Zásoba uhlíku v podzolech s různým hydrologickým režimem ve Švédsku. Průměrná zásoba činí 8,2 kg.m⁻². Celková zásoba je počítána pro O horizont a 50 cm minerální půdy (Olsson et al. 2009)

Také Fröberg et al. (2006) zjišťoval ve své práci mimo jiné zásoby uhlíku v podzolech Švédska. Jím zkoumané podzoly tvořily transekt s klimatickým gradientem, nacházely se v maximální nadmořské výšce 320 m n. m. a měly rozdílné hydrologické režimy. Zásoby ve svrchních 50 cm profilu se pohybovaly od 5 kg.m⁻² v suchých profilech po 10,2 kg.m⁻² v zamokřených profilech.

Batjes (1996) ve své kvantifikaci zásob uhlíku v půdách střední a východní Evropy uvádí pro podzosoly hodnotu $29,6 \text{ kg.m}^{-2}$ pro hloubku profilu 1 m, resp. $49,8 \text{ kg.m}^{-2}$ pro půdu typu „carbic podzol“, která je ekvivalentem nížinných podzolů ve FAO klasifikaci.

Dle práce Baritze et al. (2010) se v podzolech oceánických oblastí a střední Evropy vyskytuje ve svrchních 20 cm $30\text{-}70 \text{ t C.ha}^{-1}$, pro podzoly v ostatních částech Evropy se pak hodnoty pohybují mezi 20 a 40 t C.ha^{-1} . To odpovídá $3\text{-}7 \text{ kg.m}^{-2}$ resp. $2\text{-}4 \text{ kg.m}^{-2}$.

Možnost porovnat zásoby uhlíku v ČR nabízí práce Ciencialy a kol. (2006), kteří zkoumali zásoby uhlíku v epipedonu lesních půd v jihozápadních Čechách v lesních oblastech „Český les“ a „Západočeská pahorkatina“. Průměrná hodnota zásob uhlíku v minerální půdě dosahovala $7,22 \text{ kg.m}^{-2}$, resp. $9,33 \text{ kg.m}^{-2}$ pro svrchních 30 cm (O+minerální půda do hloubky 30 cm). Půdy v oblasti patřily především do referenčních tříd kambisoly, podzosoly, luvisoly a glejsoly.

Ideální pro porovnání by byly hodnoty z Národní inventarizace lesa, ty však až do jejího skončení v roce 2014 nebudou dostupné (ÚHUL). Inventarizační síť je dostatečně hustá, ale šetření neprobíhají tak detailně, jak by mohla, takže Cienciala a kol. (2006) označuje její potenciál jako „nevyužitý“. Ani v případě Monitoringu lesa v ČR (2004) nejsou dostupná data pro srovnání. Bohužel neprobíhalo žádné zjišťování na arenických podzolech, ani v Severočeské pískovcové oblasti, kde se nachází lokalita Ralsko. Pouze pro přírodní lesní oblast Polabí, kde je lokalizován Týnec nad Labem, jsou k dispozici data pro regozem arenickou. Data však neobsahují informace o množství uhlíku v půdě.

Musíme se tedy spokojit porovnáním s mapou uhlíkových zásob (Macků et al 2007 in Marek a kol. 2011). Z mapy zásob uhlíku v epipedonu lesních půd vyplývá, že zásoba se pohybuje v kategorii 2 pro Ralsko ($51\text{-}60 \text{ tC.ha}^{-1}$), resp. kategorie 1 (do 50 tC.ha^{-1}) pro Týnec nad Labem (viz tab. 3 v kapitole 2.5.1.). Dle šetření ÚHUL z let 1993-2001 je v lesních půdách ČR průměrně $62,1 \text{ tC.ha}^{-1}$ (Marek a kol. 2011). To jsou zajímavá zjištění, neboť v této práci vyšla zásoba uhlíku pro Ralsko $49,97 \text{ t.ha}^{-1}$, resp. $21,107 \text{ t.ha}^{-1}$ pro Týnec nad Labem. Hodnoty zjištěné v této práci jsou ale hodnotami pro celý půdní profil, a nikoli jen pro svrchních 30 cm. V Ralsku může být nižší hodnota způsobena nezahrnutím O horizontu, který se v dané lokalitě vyskytoval pouze minimálně. Podle výpočtů v této práci by profil z Ralska byl zahrnut do první kategorie (do 50 t.ha^{-1}).

V případě Týnce by bylo vhodnější podrobnější členění intervalů, protože kategorie do 50 tC.ha^{-1} je poměrně široká. Hodnota zjištěná v této práci ($21,107 \text{ t.ha}^{-1}$) do tohoto

intervalu zapadá.

Také hodnota zjištěná pro svrchních 30 cm půdy do nadmořské výšky 400 m v projektu CzechTerra (IFER 2009) je vyšší, a to $6,6 \text{ kg.m}^{-2}$. Nicméně tento projekt nerozlišoval lesní a zemědělské půdy, ani půdní typy, proto je tato hodnota velmi zkreslená.

Pokud porovnáme zásobu ve svrchních 30 cm a zásobu uloženou hlouběji v půdě, zjistíme, že nezahrnutím hlouběji položených horizontů přichází kvantifikace až o 53 - 76 % zásob uhlíku v případě profilu z Ralska (viz tab. 25, 26), a o 18 % u profilu z Týnce (tab. 27). Nesmíme zapomenout, že u profilu z Ralska má větší vypovídající hodnotu zásoba uhlíku zjištěná pomocí podrobných mocností, takže hodnotou 76 % můžeme považovat za horní extrém.

Tab. 25: Kvantifikace zásob uhlíku pro hranici nad a pod 30 cm. Ralsko, upraveno podle tab. 18

Hloubka půdy	Zásoba uhlíku t.ha^{-1}
Svrchních 30 cm (Ah+E)	14,173
Následujících 70 cm	10,89
Ztráta nezahrnutím hlubších partií	76 %

Tab. 26: Kvantifikace zásob uhlíku pro hranici nad a pod 30 cm. Týnec, upraveno podle tab. 19

Hloubka půdy	Zásoba uhlíku t.ha^{-1}
Svrchních 30 cm (O+Ah+AhEp)	17,934
Následujících 33 cm	3,236
Ztráta nezahrnutím hlubších partií	18 %

Tab. 27: Kvantifikace zásob uhlíku pro hranici nad a pod 30 cm. Ralsko pomocí podrobných mocností horizontů, upraveno podle tab. 20

Hloubka půdy	Zásoba uhlíku t.ha^{-1}
Svrchních 30 cm (Ah+E)	32,47
Zbytek půdního profilu	17,51
Ztráta nezahrnutím hlubších partií	53 %

7. Závěr

V této práci byly charakterizovány vybrané vlastnosti nížinných podzolů vyskytujících se v Česku. Pro tyto účely byl vybrán typický profil arenického podzolu v Ralsku a profil arenického podzolu z Týnce nad Labem. U obou lokalit byla zjišťována mocnost horizontů, objemová hmotnost a obsah Cox. Byla rovněž vypočítána zásoba uhlíku v půdě. Ačkoli jsou obě půdy dle TKSP ČR klasifikovány stejně, značně se od sebe odlišují, a to jak stratigafií a vyvinutostí půdního profilu, tak mocností horizontů i fyzikálními a chemickými charakteristikami.

Dále byla vizualizována prostorová variabilita přechodů jednotlivých horizontů. Jako prostorově nejvariabilnější se jeví přechod Bhs do Bs, velmi variabilní je taktéž přechod Ah do Ep. Ačkoli byla očekávána značná variabilitu přechodu Ep do Bhs horizontu, ta se ve výsledku nijak výrazněji neprojevila a spodní hranice E horizontu se tedy jeví poměrně ploše. Prostorová variabilita jednotlivých horizontů je pravděpodobně důsledkem pedoturbací, a to konkrétně stromových vývrátů. V lokalitě Ralsko je třeba vzít v úvahu i možnost anropoturbací. Záteky v Bhs horizontu kopírují kořenový systém stromů.

Pokud zjišťujeme zásoby množství uhlíku v půdě, nezahrnutím minerálních horizontů pod epipedonem se připravíme až o 53 – 76 % $tC \cdot ha^{-1}$. V případě podzolů z lokality Ralsko, jejichž Bhs horizonty se nacházejí pod hranicí těchto 30 cm (jak je patrné z obrázku 12), je výsledná hodnota menší až o 17,51 $t \cdot ha^{-1}$.

Zásoby uhlíku v jednotlivých horizontech podzolu v lokalitě Ralsko byly dále vizualizovány. Průměrná zásoba uhlíku je nejvyšší v Ah horizontu, nezanedbatelná část a velké extrémy se nacházejí také v Bhs horizontu. Nelze jej tedy z kvantifikace vyloučit, především u starších a vyvinutějších profilů.

8. Použitá literatura

BARITZ, R. et al. (2005): Soil carbon default values relevant for evaluations of the carbon status of forest soils in Europe. Final report for Deliverable, CarboInvent, 3.2, 36 s.

BARITZ, R. et al. (2010): Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest ecology and management*, 260, s. 262-277.

BATJES, N. H. (1996): Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European journal of soil science*. 47, s. 151-163.

BATJES, N. H. (2002): Carbon and nitrogen stock in the soils of Central and Eastern Europe. *Soil use and management*, 18, s. 324-329.

BEATTY, S. W. (1984): Influence of microtopography and canopy species on spatial patterns of forest understory plants. *Ecology*, 65, č. 5, s. 1406-1419.

BLÁHOVÁ, Š. (2009): Dynamika obsahu C v půdách. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK, Praha, 2009. 81 s.

BORMAN, B. T. et al. (1995): Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests. *Journal of ecology*, 83, s. 747-757.

BUURMAN, P. et al. (2005): Spatial and temporal variation in podzol organic matter studied by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and micromorphology. *European journal of soil science*, 56, s. 253-270.

BUURMAN, P. et al. (2007): Selective depletion of organic matter in mottled podzol horizons. *Soil biology & biochemistry*, 39, s. 607-621.

BUURMAN, P., JONGMANS, A. G. (2005): Podzolisation and soil organic matter dynamics. *Geoderma*, 125, s. 71-83.

CIENCIALA, E. a kol. (2006): Forest topsoil organic carbon content in Southwest Bohemia region. *Journal of forest science*, 52, 9, s. 387-398.

DEGÓRSKI, M. (2007): Spatial variability in podzolic soils of Central and Northern Europe. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Washington, 175 s.

FRÖBERG, M. et al. (2006): Concentration and fluxes of dissolved organic carbon (DOC) in three Norway spruce stands along a climatic gradient in Sweden. *Biogeochemistry*, 77, s. 1-23.

HRNČIAROVÁ a kol. (2009): Atlas krajiny České republiky. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, Průhonice: Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i., 332 s. ISBN: 978-80-85116-59-5.

HUPY, J. P., SCHAETZL, R. J. (2006): Introducing „bombturbation“, a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil science*, 171, č. 11, s. 823-836.

CHLUPÁČ, I. a kol. (2011): Geologická minulost České republiky. Praha: Academia, 442 s.

KEMPEN, B. et al. (2011): Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. *Geoderma*, 162, s. 107-123.

LISKI, J., WESTMAN, C. J. (1995): Density of organic carbon in soil at coniferous forest sites in southern Finland. *Biogeochemistry*, 29, č. 3, s. 183-197.

LISKI, J., WESTMAN, C. J. (1997): Carbon storage in forest soil of Finland. *Biogeochemistry*, 36, s. 239-260.

LUNDSTÖM, U. S., VAN BREEMEN, N., BAIN, D. (2000): The podzolization process. A

review. *Geoderma*, 94, s. 91-107.

MAREK, M. V. a kol. (2011): Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. Praha:Academia, 255 s.

MINASNY, B. et al. (2002): Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Australian journal of soil research*, 44, s. 233-244.

MOKMA, D. L., YLI-HALLA, M., LINDQUIST, K. (2004): Podzol formation in sandy soils of Finland. *Geoderma*, 120, s. 259-272.

NĚMEČEK, J. kol. (1990): *Pedologie a paleopedologie*. Praha:Academia. 552 s.

NĚMEČEK, J. a kol. (2001): *Taxonomický klasifikační systém půd ČR*. Praha: ČZÚ, VÚMOP, 78 s.

NIEROP, K. G. J., BUURMAN P. (1999): Insoluble organic matter fractions in incipient podzol, B horizons: preservation of aliphatic biopolymers from roots. *Abstrakt. Humic Substances in the Environment*, 1, č. 2, s. 29-37.

OLSSON, M. T. et al. (2009): Organic carbon stocks in Swedish podzol soils in relation to soil hydrology and other site characteristics. *Silva Fennica*, 43, 2, s. 209-222.

PEARSON, T. R. H. et al. (2005): *Integrating carbon benefit estimates into GEF projects*. United Nations Development Programme, Global environment facility. 64 s.

POLÁKOVÁ, Š. a kol. (2011): *Monitoring zemědělských půd v České republice 1992-1997*. Brno : Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, 118 s.

POST, W. M. et al. (1990): The global carbon cycle. *American scientist*, 78, s. 310- 326.

RUMPEL, C. et al. (2002): Vertical distribution, age, and chemical composition of organic

carbon in two forest soils of different pedogenesis. *Organic geochemistry*, 33, s. 1131-1142.

SÁŇKA, M., MATERNA, J. (2004): Indikátory kvality lesních a zemědělských půd ČR. Ministerstvo životního prostředí: Planeta, 12,11, 84 s, ISSN 1213-3393.

SEMENOV, V. M. et al. (2008): Mineralization of Organic matter and the Carbon Sequestration Capacity of Zonal Soils. *Eurasian Soil Science*, 48, s. 717-730.

SCHAETZL R. J. (1990): Effects of tree throw microtopography on the characteristics and genesis of Spodosols, Michigan, USA. *Catena*, 17, s. 111-126.

SCHAETZL R. J., ANDERSON, S. (2005): *Soils. Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press, 817 s. ISBN 0-521-81201-1.

SCHAETZL R. J. et al. (1989): Tree uprooting: review of impacts on forest ecology. *Vegetatio*, 79, s. 165-176.

SCHAETZL, R. J., FOLLMER, L. R. (1990): Longevity of tree throw microtopography: implications for mass wasting. *Geomorphology*, 3, s.113-123.

SCHULTZE, K. et al. (2009): Stock, turnover time and accumulation of organic matter in bulk and density fractions of a podzolic soil. *European journal of soil science*, 60, s. 567-577.

STOLBOVOI, V. Carbon in Russian Soils. *Climatic Change*. 2002, vol. 55. s 131-156.

SCHWARTZ, D., NAMRI, M. (2002): Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. *Global and planetary change*, 33, s. 77-93.

ŠAMONIL, P. a kol. (2010): The role of tree uprooting in soil formation: A critical literature review. *Geoderma*, 157, s. 65-79.

ŠAMONIL, P. a kol.: Cross-dating of tree-uprooting events and its ecological implications along 1 gradient of soil weathering and leaching. Nепublikováno

TEJNECKÝ, V. a kol. (2010): Změny forem Fe a Al v rámci pedogeneze vývratišť v přirozeně se vyvíjejícím jedlo-bukovém pralesě. Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, s. 209-211.

NĚMEČEK, J. a kol. (2001): Taxonomický klasifikační systém České republiky. Praha : VÚMOP, 78 s.

ULANOVA, N. G. (2000): The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review. Forest Ecology and Management, 135, s. 155-167.

VAN BREEMEN, N., BUURMAN, P. (2002): Soil formation. Kluwer Academic Publisher, 404 s. ISBN 1-4020-0718-3.

VENEMAN, P. L. M. et al. (1984): Soil formation as affected by pit and mound microrelief in Massachusetts, USA. Geoderma, 33, s. 89-99.

WILCKEN, H. et al. (1997): Molecular composition and chemometric differentiation and classification of soil organic matter in Podzol B-horizons. Geoderma, 76, s. 193-219.

ZIELONKA, T. (2006): When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement. Journal of vegetation science, 17, s. 739-746.

8.1.1. Internetové zdroje

CENTRUM VÝZKUMU GLOBÁLNÍ ZMĚNY AV ČR CZECHGLOBE. ForChange [online]. 2008-2010 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=SP%2F2D1%2F70%2F08>

ČZU: Stanovení obsahu humusu modifikovanou Tjurinovou metodou [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z http://pedologie.cz/postupy/rozbory/obsah_humusu.pdf

CENIA: Národní portál INSPIRE 2010-2013. [online] Dostupné z : <http://geoportal.gov.cz>

ROHOŠKOVÁ, Marcela. ČZU. Půdní genetika a systematika: Studijní materiály [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://soil.ic.cz/>

IFER. CzechTerra [online]. 2009 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: www.czechterra.cz

ÚHUL. Výsledky Národní inventarizace lesa. [online]. [cit. 2013-04-15] Dostupné z: <http://www.uhul.cz/nil/uvod/>

ÚSBE. CzechCarbo [online]. 2003-2007 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.usbe.cas.cz/czechcarbo/index.htm>

8.1.2. Ostatní

Ústní sdělení, Bc. Petra Polická, studentka PřF UK a ČZU, dne 9.4.2013.