

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Krajinné inženýrství

Obsah těžkých kovů a magnetické vlastnosti půd v regionu

Krušných hor

Diplomová práce

Autor: Bc. Pavel Křížek

Vedoucí práce: doc. Mgr. Marek Vach, Ph.D.

Konzultanti: RNDr. Aleš Kapička CSc., Prof. Ing. Vilém Podrázský, CSc.



Fakulta životního
prostředí

Zadání diplomové práce

Česká zemědělská univerzita v Praze
Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: Pavel Křížek
obor: Krajinné inženýrství

Název tématu: Obsah těžkých kovů a magnetické vlastnosti půd v regionu Krušných hor

Název tématu v anglickém jazyce: Amount of heavy metals and magnetic properties of soils
in the Ore Mountains area

Zásady pro vypracování:

- Princip a popis magnetické susceptibility
- Vyhodnocení pedochemických analýz
- Provedení a vyhodnocení magnetometrických měření (ve spolupráci s GFU AV ČR)
- Popisání a zhodnocení antropogenního vlivu na ekosystém



ČESKÁ
ZEMĚDĚLSKÁ
UNIVERZITA V PRAZE

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: min. 40 s.

Seznam odborné literatury:

Dearing, John. Environmental magnetic susceptibility - Using the Bartington MS2 System. 2. vydání. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54 s. ISBN 0 9523409 0 9

Magiera, Tadeusz a kol. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. Geoderma [online]. 2006, 130, č. 3 – 4

Kapíčka, Aleš a kol. Magnetic study of weakly contaminated forest soils. Water, Air and Soil Pollution, 2003, č. 148, s. 31-44.

Němeček, Jan a kol. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. 1. vydání. Praha: ČZU Praha spolu s VÚMOP Praha, 2001. 78 s. ISBN 80-238-8061-6

Petrovský, Eduard a kol. Low – field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. Environmental Geology

Vedoucí diplomové práce: doc. Mgr. Marek Vach, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: RNDr. Aleš Kapíčka CSc., prof. Ing. Vilém Podrázský CSc.

Datum zadání diplomové práce: říjen 2010

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011


Vedoucí katedry




Děkan

V Praze dne

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá využitím magnetických metod pro zkoumání kontaminace lesních půd pevnými depozicemi, které se v různém množství ukládají především ve svrchních půdních horizontech. Metoda využívá měřicí systém Bartington MS2 pro měření magnetické susceptibility.

Magnetická susceptibilita byla měřena v 19 lokalitách v oblasti Krušných hor, odkud byly odebrány vzorky půdních profilů pro laboratorní měření. Pomocí terénního a doplňujícího laboratorního měření byly vyloučeny vzorky s dominantní litogenní příspěvek. Laboratorní měření byla aplikována ke zjištění magnetomineralogie antropogenních ferimagnetik v půdách.

Naměřené hodnoty magnetické susceptibility v půdních horizontech byly srovnány s koncentracemi těžkých kovů (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) a následně porovnána jejich korelace.

Výsledky ukazují možnost využití magnetické metody pro detekování kontaminace půd atmosférickým spadem, jako předběžné monitorovací metody, jejichž výhodami, ve srovnání s klasickými chemickými analýzami, jsou rychlost a menší finanční náročnost.

Klíčová slova: atmosférický spad, kontaminace půd, těžké kovy, magnetická metoda, magnetická susceptibilita, Krušné hory.

Abstract

This thesis deals with the use of magnetic methods for the study of forest soil contamination by solid deposition which it stores above all in the top-soil horizons. The method uses a measuring system the Bartington MS2 for measurement of magnetic susceptibility.

Magnetic susceptibility was measured at 19 sites in the Ore Mountains, where samples of soil profiles for laboratory measurements were taken. Samples with dominant lithogenic influence were excluded with the additional field and laboratory measurements. Laboratory magnetic measurements were used for determination magnetomineralogy of dominant anthropogenic ferrimagnetic in soils.

The values of magnetic susceptibility in soil horizons were compared with concentrations of heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn) and then compared their correlation.

The results show the possibility of using magnetic method for detecting atmospheric contamination of forest soil and when we compare it with conventional chemical analysis, magnetic method is much faster and cheaper.

Key words: atmospheric deposition, soil contamination, heavy metals, magnetic method, magnetic susceptibility, The Ore Mountains

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkovat všem, kteří mě podporovali při tvorbě diplomové práce. Především bych chtěl poděkovat panu RNDr. Aleši Kapičkovi, CSc. za odbornou pomoc při měřeních v laboratoři a za cenné rady při analyzování výsledků. Panu Prof. Ing. Vilému Podrázskému, CSc. za poskytnutá data a vedoucímu diplomové práce panu Doc. Mgr. Marku Vachovi, Ph.D. za vlídné a odborné vedení při řešení této práce. A v neposlední řadě své rodině za jejich podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Obsah těžkých kovů a magnetické vlastnosti půd v regionu Krušných hor* vypracoval samostatně a použil k tomu pouze literaturu, kterou uvádím v seznamu literatury.

V Praze dne

.....

podpis studenta

Úvod

Člověk udělal velký pokrok v rozvoji průmyslu a civilizace, který bezpochyby zlepšil životní podmínky a pohodlí lidského života. V tomto procesu ale narušil křehkou rovnováhu životního prostředí stanovenou přírodou již po tisíce let (Athar et Vohora, 2001). Antropogenní činností dochází ke znečišťování životního prostředí, zvláště v průmyslových oblastech či celých regionech. Proto je velmi důležitý monitoring tohoto znečištění a hledání příčin jeho původu.

V této práci se zaměřím na problematiku kontaminace lesních půd. Pro monitoring půdní kontaminace se používají tradiční chemické analýzy, ty jsou ale časově i finančně náročné. Proto se hledají nové metody, které by zmenšovaly náklady a urychlily proces měření.

Mezi nové metody patří magnetické metody. Tyto metody jsou používány v relativně nové vědní disciplíně "environmentální magnetismus". Magnetické metody mají nespornou přednost v rychlosti měření a relativně malé finanční náročnosti, nevyžadují náročnou přípravu vzorků a umožňují efektivně zpracovat velké množství dat. Používají se pro mapování průmyslového znečištění.

Magnetické metody byly použity pro zkoumání vztahu magnetické susceptibility a koncentrace těžkých kovů v kontaminovaných půdách. Právě magnetická susceptibilita, jako jeden z ukazatelů, nám umožňuje nepřímou detekci těžkých kovů ve zkoumaných půdách Krušných hor.

Nejpřirozenějšími záchytnými místy atmosférického spadu jsou půdní plochy. Svrchní půdní horizonty jsou nejčastěji využívány při vyšetřování kontaminace životního prostředí (Kapička et Petrovský, 2004).

Tato diplomová práce navazuje na bakalářskou práci, ve které jsem popisoval magnetické vlastnosti minerálů a magnetickou susceptibilitu jako hlavní parametr pro znečištění půdy průmyslovým spadem. V diplomové práci se zaměřím na výsledky magnetických analýz a porovnání koncentrací těžkých kovů s hodnotami magnetické susceptibility v lesních půdách, které jsem naměřil v laboratoři GFÚ AV ČR v. v. i.. Chemické analýzy byly zpracovány v laboratoři Tomáš (bývalá laboratoř VÚLHM VS Opočno) a v laboratořích FŽP v Kostelci nad Černými Lesy.

Cílem je zjištění vhodnosti metody při vyšetřování kontaminace půd atmosférickým spadem v oblasti Krušných hor. Předpokladem je výskyt průmyslového spadu díky bohaté průmyslové činnosti v oblasti Severních Čech a

kontaminace půd, která může mít za následek degradaci vývoje lesního ekosystému v daném regionu.

Rešerše z literatury

Magnetismus životního prostředí

Magnetismus životního prostředí je poměrně nový vědní obor. Poprvé byl jednoznačně popsán jako samostatný obor v roce 1980. Od té doby se environmentální magnetismus stal oborem, který nachází uplatnění ve stále rostoucí řadě vědeckých disciplín (Verosup et Roberts, 1995).

Magnetismus životního prostředí je založen na studiu analogických magnetických minerálů jako v paleomagnetismu (včetně minerálů antropogenního původu), pro které využívá přístrojového vybavení a metodických postupů používaných v magnetismu hornin a minerálů (Kapička et Petrovský, 2004). Využívá magnetické vlastnosti materiálů jako parametry odrážející procesy ovlivňující životní prostředí. Mezi tyto parametry patří znečišťování životního prostředí způsobené lidskou činností.

V environmentálním magnetismu, na rozdíl od magnetismu hornin a minerálů, je možno studium rozsáhlých skupin materiálů. Kromě hornin také například sedimenty, půdy, rašeliny, organické materiály (jehličí, listí, kůru stromů) a také atmosférický spad. Magnetické vlastnosti těchto materiálů umožňují zjistit magnetomineralogii, koncentraci a velikost magnetických zrn ve vzorcích. Naměřené údaje jsou použity pro hodnocení kontaminace životního prostředí.

Nespornou předností magnetických metod je vysoká citlivost, relativní rychlost a menší finanční náročnost ve srovnání s jinými fyzikálními nebo chemickými metodami (Verosub et Roberts, 1995).

Při studiu rozsahu zatížení životního prostředí průmyslovým znečištěním je velmi důležité odlišit částice přírodního (vliv geologického podloží, pedogenní procesy) a antropogenního původu. K rozpoznání těchto částic nám pomáhají různé fyzikální parametry.

Jedním z nejdůležitějších parametrů v environmentálním magnetismu je magnetická susceptibilita. Jako makroskopický parament měřených (např. půdních)

vzorků, magnetická susceptibilita zahrnuje diamagnetické (silikáty a karbonáty bez Fe), paramagnetické (silikáty obsahující Fe a Mn), antiferomagnetické (např. hematit) a ferimagnetické minerály (magnetit a maghemit) (Kapička et Petrovský, 2004). Magnetická susceptibilita může být měřena v terénu přenosnými měřicími přístroji nebo v laboratoři použitím citlivějších měřících aparatur (Petrovský et al., 2000).

Významnou otázkou v environmentálním magnetismu je zkoumání vazby mezi koncentrací feromagnetických částic a obsahem těžkých kovů, jelikož přesný fyzikální mechanismus není doposud znám a je předmětem stálého výzkumu. U vysokoteplotních spalovacích procesů dochází k fyzikálním vazbám těžkých kovů na ferimagnetické oxidy železa, lze tedy nalézt relativně silné korelace mezi magnetickou susceptibilitou a koncentrací těžkých kovů v případech dominantních zdrojů kontaminace (Hunt, 1986).

Jelikož se environmentální magnetismus může dotýkat problémů ve spoustě disciplín a některé z těchto problémů mohou být nepřístupné pro jiné metody, je pravděpodobné, že rozsah magnetismu životního prostředí bude pokračovat ve svém rychlém rozšiřování. Environmentální magnetismus je schopný poskytovat důležitá data pro studie globálních změn v životním prostředí, klimatických procesů a dopadu chování člověka na životní prostředí, z nichž jsou všechny hlavní zkoumané iniciativy v mezinárodní vědecké obci. Tyto faktory naznačují, že magnetismus životního prostředí má světlou a rozmanitou budoucnost (Verosup et Roberts, 1995).

Těžké kovy

Těžké kovy jsou přirozenými složkami zemské kůry a mnohé z nich jsou esenciální pro některé živé organismy. Jsou stabilní a nemohou být rozloženy či zničeny, a proto mají tendenci se hromadit v půdě a sedimentech.

Osm nejběžnějších těžkých kovů, které se vyskytují v životním prostředí dle EPA (Environment Protection Agency) jsou: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb a Zn (Athar et Vohora, 2001). U nás neexistují zákonem definované limity pro rizikové koncentrace těžkých kovů pro lesní ekosystémy, zákonem jsou vymezené pouze pro půdy zemědělské. Laboratoře analyzující vzorky lesních půd se řídí doporučením mezinárodního programu ICP Forests (the International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), který poskytuje

základní informace pro řadu kritérií a indikátorů charakterizující trvale udržitelné hospodaření v lesích na evropské a národní úrovni (Boháčová et al., 2010). Ten se však zabývá pouze orientačními limity čtyř těžkých kovů: Cd, Cu, Pb a Zn. Níže jsou popsány zdroje těžkých kovů v půdě.

Arsen

Arsen je přítomen v tuhých částicích emitovaných při spalovacích procesech a při metalurgickém zpracování rud.

Kadmium

Za přírodní zdroje se považují vulkanické emise a zvětrávání matečných hornin. Hranice přirozeného výskytu v půdě je velmi nízká, pohybuje se mezi 0,1 - 1,0 mg . kg⁻¹. Do atmosféry, kde byly ještě nedávno zjištěny koncentrace 2,0 - 4,8 ng . m⁻³, se Cd dostává hlavně z mnoha průmyslových zdrojů, (elektrovýroby, barvy-laky, stabilizace PVC polymerů aj.), spaloven a metalurgického průmyslu.

Chrom

Chrom se dostává do ovzduší zvětráváním hornin a je přenášen i na velké vzdálenosti. K přírodním zdrojům přispívají svou emisí i průmyslové zdroje (pokovování, antikorozivní nátěry, chemický průmysl, úprava kůží aj.).

Měď

Geografická distribuce se shoduje s niklem, je současně esenciálním prvkem. Do prostředí se dostává jednak z přírodních zdrojů (zvětrávání hornin), jednak z průmyslových emisí (výroba slitin s Cu, elektrotechnický průmysl, barviva, sklářský průmysl aj.) a spalovacích procesů.

Nikl

Nikl se nachází převážně v místech lokálního znečištění (metalurgie, kovovýroba, elektrotechnický průmysl). Pro většinu živých organismů je nikl esenciálním prvkem, ale jeho koncentrace v ovzduší nesmí překročit 0,5 mg . m⁻³.

Ve vyšších koncentracích je toxický jak pro rostliny, tak i pro živočichy.

Olovo

Olovo je dalším prvkem přenášeným na velké dálky. Přírodním zdrojem je zvětrávání hornin bohatých na olovo. Z antropogenních zdrojů to jsou především průmyslové emise (výroba autobaterií, aditiv do benzínu, antikorozivních nátěrů, křišťálového skla aj.), dále pak doprava (olovnatý benzin), spalovny, skládky aj.

Rtuť

Rtuť je emitována do ovzduší z přírodních zdrojů i z antropogenních činností (metalurgie, elektrochemické výroby, tepelné elektrárny, spalovny). Rtuť nebyla zatím v lesních ekosystémech systematicky monitorována.

Zinek

Zinek se dostává do prostředí zvětráváním minerálů, vulkanickou činností a také díky lesním požárům. Největšími antropogenními zdroji jsou spalovací procesy, u nás hlavně tepelné elektrárny (Uhlířová et Hejdová, 2000).

Těžké kovy v půdě

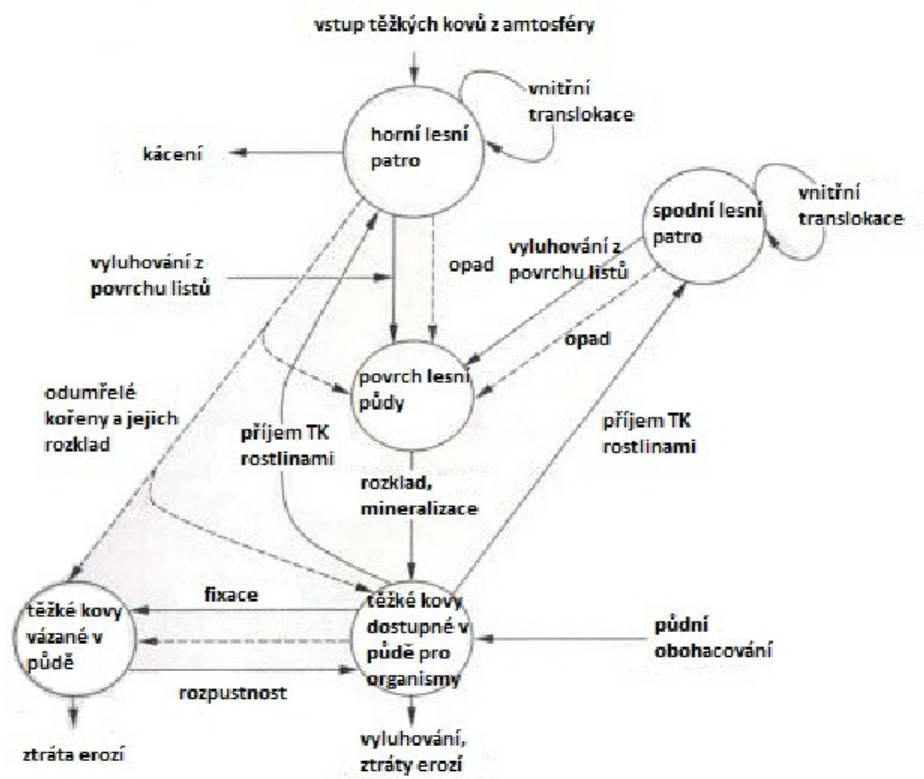
Těžké kovy vyskytující se v půdě mohou být litogenního, antropogenního či pedogenního původu. Prvky litogenního původu vznikají rozpadem mateční horniny, tedy přirozenou cestou, na rozdíl od antropogenních, které vstupují do půdy následkem činností člověka. Pedogenní prvky mohou být antropogenní nebo pedogenního původu, jejich množství a šíření závisí na pedogenních procesech a transformaci minerálů.

Velkou zátěží pro znečištění životního prostředí jsou vstupy magnetických minerálů antropogenního původu ve formě atmosférického spadu, které vznikají většinou při vysokoteplotních spalovacích procesech a také vzrůstající automobilovou dopravou.

Při vyšších koncentracích a za nepříznivých fyzikálně-chemických podmínek mohou kovy představovat významné a dlouhodobé ohrožení složek životního prostředí, zejména podzemních vod a zemin. Kovy, které se v důsledku lidské

činnosti dostávají do životního prostředí, dříve nebo později přicházejí do kontaktu se zeminou nebo horninovým materiálem. Každá zemina (horninový materiál) vykazuje určitou sorpční kapacitu, která je v přirozeném, nekontaminovaném stavu nasycena zejména vápníkem a hořčíkem. Většina důležitých těžkých kovů vykazuje ovšem podstatně vyšší sorpční schopnost a dokáže tyto přirozeně nasorbované prvky vytěsnit. V této fázi tedy zemina kontaminující kovy zadržuje a zásadním způsobem snižuje jejich nebezpečnost vůči okolnímu prostředí. Při pokračující kontaminaci se ovšem v určitém okamžiku sorpční kapacita zeminy těmito kontaminujícími kovy nasytí a jejich další šíření (například do podzemní vody) není již zeminou omezováno. Takto nakoncentrované kontaminující kovy potom navíc představují velké nebezpečí, neboť pouhou změnou okolních podmínek (například snížením pH při kyselém dešti) může docházet k jejich nárazovému vyplachování (Hrdý, 2005).

Atmosférické depozice jsou hlavním zdrojem stopových prvků v lesích. Počáteční zdroj může být až stovky kilometrů daleko od zasažené oblasti. Příkladem je zdokumentovaná kontaminace ledu v polárních oblastech (Pb, Hg, Zn), která dokazuje roli velkých vzdáleností (Adriano, 1986).



Obrázek 1. Koloběh těžkých kovů v lesním ekosystému (upraveno dle Adriano, 1986).

Magnetické vlastnosti pevných látek

Látky mohou být klasifikovány dle jejich reakce na vnější magnetické pole. Elektricky nabitě částice atomů (elektrony) se pohybují v uzavřených proudových smyčkách (drahách), které jsou zdroji magnetických momentů. Dalším příspěvkem k magnetickému momentu je spinový magnetický moment vyvolaný rotací elektronů kolem osy. Výsledný celkový magnetický moment atomu je dán vektorovým součtem spinového a dráhového momentu. Celkový magnetický moment atomu umístěného ve vnějším magnetickém poli je dán součtem vlastního momentu atomu a působícího vnějšího pole.

Atomy s vykompenzovanými momenty, což znamená, že orbity jsou obsazené dvojicemi elektronů s opačnými spiny, mají výsledný magnetický moment nulový, tento stav označujeme jako diamagnetický. Atomy s nevykompenzovanými momenty mají nenulový celkový magnetický moment. O těchto atomech hovoříme, že mají paramagnetické vlastnosti (Lipták et Sedláček, 1996).

Pevné látky lze rozdělit do následujících kategorií dle chování v magnetickém poli:

- Diamagnetika, (magnetická susceptibilita je záporná, řádu 10^{-5} SI)
- Paramagnetika, (magnetická susceptibilita je kladná, řádu $10^{-3} - 10^{-5}$ SI)
- Feromagnetika, Ferimagnetika, Antiferomagnetika (magnetická susceptibilita je kladná řádu až 10^6 SI)

Diamagnetismus

Je základní magnetickou vlastností všech pevných látek. Oproti ostatním magnetickým vlastnostem (paramagnetismus, feromagnetismus) je velmi slabý a tak bývá překryt právě těmito magnetickými vlastnostmi. Diamagnetismus je indukovaný jev. Vzniká při interakci vnějšího magnetického pole s pohybujícími se elektrony. Výsledkem je velmi slabá magnetizace, orientovaná proti směru vnějšího magnetického pole. Je-li odstraněno působení magnetického pole, magnetizace diamagnetik je nulová. Diamagnetická susceptibilita je nezávislá na teplotě a je záporná. Diamagnetickými vlastnostmi se projevuje mnoho běžných přírodních

minerálů jako například křemen, živec, vápenec ale také všudypřítomná voda. V půdním magnetismu diamagnetické projevy půdních komponent nehrají podstatnou roli.

Paramagnetismus

Paramagnetické látky jsou takové, jejichž jednotlivé atomy, ionty nebo molekuly, mají nenulový elementární magnetický dipólový moment. Ve vnějším magnetickém poli se paramagnetické materiály chovají opačně, než se chovají materiály diamagnetické. Elementární magnetické momenty mají tendenci se uspořádat a paralelně se orientovat ke směru aplikovaného pole. Magnetická energie závisí na velikosti vnějšího magnetického pole a je nepřímo úměrná teplotě. Magnetizace paramagnetických látek je sice slabá, ale dominuje nad projevy diamagnetickými. Nezaplněné vnitřní slupky elektronů iontů Mn^{2+} , Fe^{2+} a Fe^{3+} jsou zpravidla zodpovědné za paramagnetické chování přírodních minerálů, jelikož mají nepárové elektrony s volnými spiny. Mnoho přírodních minerálů, jako například olivín, pyroxen, granát, uhličitany železa a magnézia, jsou paramagnetické. Paramagnetické minerály v půdách je třeba brát v úvahu, pouze když koncentrace feri/feromagnetických minerálů (s uspořádanou magnetickou strukturou) je nulová nebo extrémně nízká.

Látky s uspořádanou magnetickou strukturou

Feromagnetismus

Feromagnetické materiály (např. Fe, Ni, Co) jsou charakterizovány existencí spontánní magnetizace tj. samovolného uspořádání elementárních magnetických momentů. U feromagnetik je toto spontánní uspořádání paralelní. Spontánní magnetizace existuje pouze do určité teploty, která je nazývána Curieova teplota (T_C). Nad touto teplotou je feromagnetické uspořádání porušeno tepelnou energií a chová se jako paramagnet.

Další důležitou vlastností feromagnetických materiálů je samovolné uspořádání magnetických momentů v určitých oblastech tzv. doménách.

Ferimagnetismus a antiferomagnetismus

Hlavními přírodními magnetickými minerály, kterými se budu zabývat, patří mezi feromagnetika a antiferomagnetika. Již velmi nízká koncentrace těchto minerálů v půdách charakterizuje jejich magnetické vlastnosti jako celek.

Ferimagnetismus

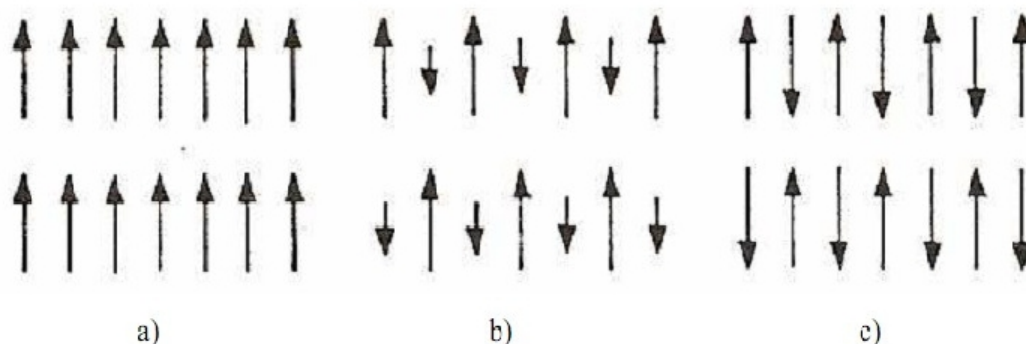
Ferimagnetismus je navenek velmi podobný feromagnetismu. Ferimagnetické materiály mají spontánní magnetizaci pod kritickou (Curieovou) teplotou jako feromagnetika a také jsou paramagnetické nad touto teplotou.

Na rozdíl od feromagnetik je spontánní magnetizace antiparalelní. Ferimagnetika (ferity) jsou tvořena dvěma podmřížkami a antiparalelními a nestejně velikými magnetickými momenty. Nejdůležitějšími přírodními ferity jsou oxidy železa se spinelovou strukturou (magnetit a maghemit). Již jejich velmi malá koncentrace v půdách významně ovlivňuje jejich magnetické vlastnosti.

Antiferomagnetismus

U antiferomagnetických látek existují opět dvě podmřížky. Jejich magnetické momenty jsou antiparalelní, ale i identické. Proto jejich celkový vnější magnetický moment je nulový. Antiferomagnetické uspořádání je také porušeno při zahřátí nad tzv. Néelovou teplotu (T_N).

Při poruše krystalové struktury minerálů může dojít k nedokonalosti antiparalelnímu uspořádání. Minerál hematit (krevet) je příkladem přírodního krystalu s nedokonalou antiferomagnetickou strukturou způsobenou porušenou rovnoběžností magnetických momentů.



Obr. 2: Schematické uspořádání magnetických momentů v krystalové mřížce minerálů s uspořádanou magnetickou strukturou a) feromagnetika, b) ferimagnetika, c) antiferomagnetika, šipky značí velikost a směr momentu. (Thompson et Oldfield, 1986)

Velikost ferimagnetických částic

Magnetické vlastnosti feri/feromagnetických látek závisí ve značné míře na velikosti částic. Velikost ferimagnetických částic obsažených v půdách je rozhodujícím parametrem při vyšetřování jejich původu a odlišení antropogenních a pedogenních ferimagnetik (Kapička, Petrovský, 2004). Rozlišujeme čtyři skupiny dle velikosti:

Multidoménové částice (MD) - magnetické momenty uvnitř jednotlivých oblastí (domén) jsou uspořádány paralelně (resp. antiparalelně), ale výsledné magnetické momenty těchto domén jsou orientovány do různých směrů. Celkový magnetický moment může být nulový.

Pseudojednodoménové částice (PSD) - tvoří přechod mezi multi a jednodoménovými částicemi.

Jednodoménové částice (SD) – jsou tak malé, že je tvoří pouze jedna magnetická doména a jejich rozměr je menší než PSD.

Superparamagnetické částice (SP) - jsou fero/ferimagnetické velmi malé částice, < 0,03 μm (pro magnetit) v průměru. Jejich (tepelné) kmitání je při pokojové teplotě větší než kvantově – mechanická energie výměnné interakce. Částice se chovají

paramagneticky s náhodnou orientací jejich jednotlivých momentů. Celkový magnetický moment je nulový (Thompson et Oldfield, 1986).

Ferimagnetické částice nacházející se v půdách a sedimentech mají různý původ. Dle mechanismu jejich vzniku můžeme charakterizovat jejich velikost částic a tedy i odlišné magnetické vlastnosti.

Primární horninotvorné minerály, vzniklé při magmatických procesech, se do půdy dostávají zvětráváním mateční horniny. Tyto minerály jsou většinou multidoménové, ale vyskytují se také i jako jednodoménové. Ferimagnetika sekundárních minerálů přírodního původu, které vznikly pedogenními procesy či bakteriální činností, jsou supermagnetické a mohou být i jednodoménové. Sekundární minerály antropogenního původu jsou multidoménové a pseudo-jednodoménové velikosti. Jedná se o minerály vzniklé při spalování fosilních paliv, při provozu průmyslových závodů a také ze silného automobilového provozu.

Magnetická hystereze

Magnetizace fero/ferimagnetik je závislá nejen na velikosti vnějšího magnetického pole, ale také závisí na jejich magnetické historii. Tento jev se nazývá magnetická hystereze a je typický pouze pro látky s uspořádanou magnetickou strukturou. Závislost magnetického pole a výsledné magnetizace je patrná na tzv. hysterezní smyčce (Obr. 3), kde na svislé ose je znázorněna magnetizace a na vodorovné ose velikost vnějšího magnetického pole.

Pokud vložíme (demagnetované) ferimagnetikum do magnetického pole s rostoucí intenzitou, výsledná magnetizace vzrůstá podél tzv. panenské křivky magnetizace. Jestliže jsme použili slabé magnetické pole, je magnetizace v počáteční oblasti vratná po stejné křivce. Pokud aplikujeme na látku silnější magnetické pole než je určitá kritická hodnota, začne látka vykazovat hysterezi. V nulovém magnetickém poli si ponechává tzv. remanentní magnetizaci. Při vysokých hodnotách magnetického pole, magnetizace roste až do oblasti magnetického nasycení, tzn., že při dalším růstu magnetického pole je magnetizace ferimagnetik konstantní. Pokles magnetizace při snižování magnetického pole je znázorněn svrchní křivkou. Kompletní hysterezní smyčku získáme aplikováním velmi vysokého magnetického pole, jeho následným poklesem a vzrůstem velmi vysokého magnetického pole v opačném směru a jeho následným poklesem.

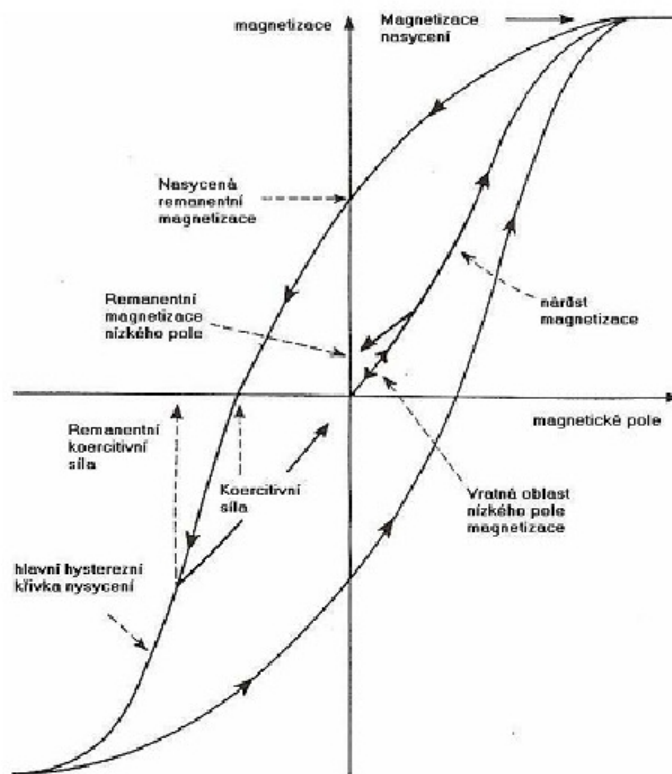
Na základě této hysterezní, cyklicky se opakující smyčky, jsou definovány tyto magnetické parametry, které jsou využívány v půdním magnetizmu:

Nasyčená magnetizace (M_S) – je magnetizace vyvolaná přítomností silného magnetického pole, kdy daný vzorek dosáhne své maximální hodnoty magnetizace a dále se již s rostoucím polem nemění.

Nasyčená remanentní magnetizace (M_{RS}) – když působící magnetické pole odstraníme, magnetizace se nesníží až na nulu, ale na hodnotu remanentní magnetizace.

Koercitivní síla (B_C) – je velikost působícího opačně orientovaného pole, které vyvolává nulový magnetický moment daného vzorku. Jedná se o měření v magnetickém poli.

Remanentní koercitivní síla (B_{CR}) – je velikost působícího opačně orientovaného pole, potřebné k odstranění remanentní magnetizace, dosažené magnetickým nasycením. Velikost B_{CR} je mnohem větší než koercitivní síla B_C .



Obr. 3: Hysterezní smyčka se svými hlavními magnetickými parametry (upraveno dle Thompson et Oldfield, 1986)

Magnetická susceptibilita

Magnetická susceptibilita (κ) je fyzikální veličina, která popisuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli. Patří mezi nejdůležitější magnetické charakteristiky a udává schopnost látek magnetizovat se ve vnějším magnetickém poli. Závisí na druhu materiálu, vnějším poli a také způsobu měření.

Vzhledem k nelinearitě magnetizační křivky fero/ferimagnetik je zřejmé, že velikost magnetické susceptibility závisí na velikosti magnetického pole, ve kterém měření probíhá. V magnetizmu hornin a půd se používá především susceptibilita měřená ve slabém magnetickém poli (κ_{LF}), která se definuje v oblasti vratných změn magnetizace (viz. Obr. 3 - hysterezní křivka). V převážné většině případů se pro jejich měření používá střídavé magnetické pole. Kromě toho se někdy měří též tzv. vysokopolní magnetická susceptibilita (κ_{HF}), v poli větším než je pole saturační.

Magnetická susceptibilita je koncentračně závislý magnetický parametr. Jejím měřením můžeme získat informace o minerálech v horninách, půdách a sedimentech a především informaci o množství silně magnetických (ferimagnetických) minerálů (např. Fe – oxidů). Tato měření poskytují informace podobně jako jiné mineralogické metody.

Objemová magnetická susceptibilita

Je základní magnetickou veličinou měřenou v magnetizmu půd. Je definována vztahem:

$$\kappa = \frac{M}{H},$$

kde M je velikost indukované magnetizace a H je intenzita působícího vnějšího magnetického pole. V soustavě SI jde o bezrozměrnou veličinu.

Hmotnostně specifická susceptibilita

Studie životního prostředí často měří materiály, které mají velmi rozličné hustoty. To může být z několika důvodů. Například vodná část půdy může být velmi proměnlivá. Některé materiály jednoduše leží na extrémních koncích škály hustoty jako například vzorky sušené rašeliny nebo zhutněné půdy.

Aby bylo možné porovnat různé materiály s rozdílnou hustotou, vlhkostí apod. zavádí se tzv. hmotnostně specifická susceptibilita (χ), která je definována vztahem:

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}],$$

kde ρ je hustota měřeného vzorku ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a κ je objemová susceptibilita.

Její měření se provádí v laboratoři a není většinou komplikované. Např. aparatura Bartington používá měřicí nádoby kalibračního objemu (10 cm^3), proto se měřená hodnota pouze vydělí hmotností vzorku.

Frekvenčně závislá susceptibilita

Se vzrůstající frekvencí měřícího pole může velikost magnetické susceptibility klesat. Tato závislost je patrná hlavně u superparamagnetických (SP) a jednodoménoých (SD) částic, kde se projevuje velmi zřetelná závislost na frekvenci. V přírodních materiálech jsou částice zastoupeny širokým spektrem velikostí a projevují se u nich odlišné závislosti susceptibility na frekvenci ve slabém poli. Susceptibilita multidoménoých magnetik vykazuje pouze velmi malé změny, nebo má konstantní hodnotu.

Dvou-frekvenční měření susceptibility se využívá v environmentálním magnetismu ke stanovení dominantní velikosti ferimagnetických částic v půdě. Pomocí frekvenčně závislé susceptibility ($\kappa_{\text{FD}}\%$) můžeme identifikovat velmi malé ($\text{Ø} < 0,03 \text{ }\mu\text{m}$) superparamagnetické ferimagnetické minerály spojené především s pedogenními procesy. Susceptibilita se měří při dvou různých frekvencích:

nízkopolní (LF) 0,465 kHz a vysokopolní (HF) 4,65 kHz (odtud „dvoufrekvenční“ měření). Vzorokly obsahují zmíněné velmi malé částice vykazující nepatrně nižší naměřené hodnoty při vysoké frekvenci. Oproti tomu vzorky, které v rozhodující míře obsahují relativně velké multidoménové minerály mají v obou frekvencích hodnoty stejné.

Frekvenční závislost magnetické susceptibility se udává v procentech a je dána vztahem:

$$\kappa_{FD} = \frac{\kappa_{LF} - \kappa_{HF}}{\kappa_{LF}} \cdot 100 [\%],$$

kde κ_{FD} může být vysvětlena jako změna susceptibility při rozdílu mezi nízkou a vysokou frekvencí dělená nízkou frekvencí, kde nízká by měla mít vždy větší hodnotu. Pokud je κ_{FD} menší než cca 4 % vzorek obsahuje především MD částice, pro κ_{FD} v rozmezí 10-14 % převládají ve vzorku velmi jemné SP částice (Dearing, 1999).

Magneticky významné minerály

Dominujícím prvkem, který nese magnetické vlastnosti přírodních minerálů, je železo, které je zároveň čtvrtým nejrozšířenějším prvkem zemské kůry. Je důležitým prvkem ve většině horninotvorných minerálů. Nejdůležitějšími nositeli magnetických vlastností hornin jsou především oxidy železa (magnetit, titanomagnetit, hematit a maghemit) a sulfidy železa (pyrhotin), tyto dvě skupiny patří mezi hlavní ferimagnetické minerály. Hydroxidy a oxihydroxidy železa (goethit, lepidokrokrit, limonit) řadíme do skupiny antiferomagnetik.

Magnetit (Fe_3O_4)

Magnetit je velmi rozšířeným ferimagnetický minerál vyskytující se v přírodě. Nachází se ve velké většině vyvřelin a v mnoha metamorfovaných a sedimentárních horninách. Má strukturu kubického spinelu. Krystalovou mřížku tvoří osm kyslíkových tetraedrů uvnitř s kationy Fe^{3+} a šestnáct oktaedrů kyslíkových anionů vyplněných polovinou kationů Fe^{3+} a polovinou kationů Fe^{2+} . Curieova teplota magnetitu 580 °C odpovídá přechodu z ferimagnetického

uspořádání na neuspořádané (tedy do paramagnetického stavu). Magnetit má nejvýraznější magnetické vlastnosti z přírodních minerálů zemské kůry. Přeměnou magnetitu může vzniknout hematit nebo maghemit. Magnetit antropogenního původu je také významným konstituentem úletových popílků vznikajících při vysokoteplotním spalování fosilních paliv.

Maghemit ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Maghemit má stejné chemické složení jako hematit, ale spinelovou strukturu podobnou magnetitu. Charakteristickou vlastností je, že po překročení teploty nad 300 °C se přemění na hematit. Díky této vlastnosti nelze přesně určit jeho Curieovu teplotu, jejíž hodnota je zpravidla vyšší. Příměsi jako Na a Al stabilizují strukturu maghemitu a snižují jeho Curieovu teplotu. Velmi často se také, spolu s magnetitem, vyskytuje v úletových popílcích antropogenního původu.

Hematit ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Hematit je významný magnetický minerál vyvřelin a sedimentů vznikajících v oxidačních podmínkách. Hematit má romboedrickou krystalovou strukturu a charakteristickou krvavě červenou barvu. Je antiferomagnetický. Vykazuje však slabý, nenulový, magnetický moment v důsledku tzv. parazitického antiferomagnetismu (magnetické momenty podmřížek nejsou přesně antiparalelní). Curieova teplota hematitu je přibližně 675 °C.

Sulfidy železa

Další velice důležité magnetické minerály po oxidech železa jsou sulfidy železa. Nejdůležitějším magnetickým sulfidem je pyrhotin. Je ferimagnetický s monoklinickou strukturou a přibližuje se složení FeS. Ale většina přírodních ferimagnetických modifikací pyrhotinů má složení Fe_7S_8 nebo Fe_9S_{10} . Fe_7S_8 má Curieovu teplotu 320 °C zatímco Fe_9S_{10} má o něco nižší 290 °C. Jeho susceptibilita dosahuje řádu 10^{-2} SI. Pyrhotin se vyskytuje v bazických hlubinných vyvřelinách zvláště v gabrech.

Hydroxidy a oxihydroxidy železa

Nejsou z magnetického hlediska tak významné jako oxidy železa, ale jsou ve značné míře přítomny v půdních profilech. Hydratací ztrácejí schopnost magnetizace. Jejich význam spočívá v tom, že jejich přítomnost v půdách je významným prekurzorem magneticky významnějších Fe-oxidů v půdách. Nejdůležitějšími minerály této skupiny jsou goethit a lepidokrokit.

Goethit (αFeOOH)

Goethit je žlutohnědé až červené barvy a má ortorombickou strukturu. Je velmi běžným minerálem, typickým produktem procesu zvětrávání. Většina goethitu je antiferomagnetická, ale mohou být i formy slabě magnetické. Néelova teplota je 120 °C. Zahříváním na vyšší teploty okolo 300 až 400 °C goethit dehydruje na hematit.

Lepidokrokit (γFeOOH)

Lepidokrokit je nahnědlé barvy a má ortorombickou strukturu. Je méně častý než goethit. Má Néelovu teplotu od -196 °C, takže nemůže získat remanentní magnetizaci při normálních teplotách. Zvyšováním se přetvoří na maghemit při teplotě mezi 250 a 350 °C.

(Křížek, 2008)

Magnetické vlastnosti půd

Magnetické vlastnosti půd závisí především na půdním typu, přírodních podmínkách, pedogenezi a také na atmosférickém spadu. Hodnoty magnetické susceptibility závisí na koncentraci magnetických minerálů v půdě a také na velikosti částic tvořící tento minerál.

Diamagnetické složky půdy zahrnující například křemen, ortoklas, uhličitán vápenatý, organické materiály a vodu. Ve většině půd, tyto komponenty, lze pokládat pouze za nedůležité prvky, z hlediska magnetismu. Pouze v extrémních případech (čistý křemičitý písek, čisté vápence) budou diamagnetické částice považovány za magneticky důležité. Mnoho půdních minerálů, jak primární tak i sekundární, jsou

paramagnetika. V půdách bohatých na železo ale chudých na feromagnetické minerály, paramagnetika výrazně přispívají k celkové susceptibilitě (Thompson et Oldfield, 1986). Nejvyšší hodnoty magnetické susceptibility vykazují ferimagnetické oxidy železa magnetit a maghemit. Magnetit se vyskytuje v půdě jako primární minerál a sekundárně vznikající pedogenezí a je velmi běžný. Maghemit se vyskytuje v půdě jako sekundární minerál, vzniká zvětráváním či oxidací magnetitu.

Půda se skládá z jednotlivých půdních horizontů. Hodnoty susceptibility se mohou dle jednotlivých horizontů velmi lišit. Převážně nastávají dva případy. Když jsou zvýšené hodnoty magnetické susceptibility v hlubších horizontech, pak mluvíme o dominantním litogenním příspěvku. Antropogenní příspěvek lze identifikovat, tím že svrchní horizonty vykazují vyšší hodnoty magnetické susceptibility než spodní.

Vliv pH na mobilitu těžkých kovů

Hodnota pH má principiální význam při posuzování mobility (a tím i nebezpečnosti) kontaminujících kovů v systému zemina-podzemní voda. Vysoký celkový obsah například těžkých kovů v zemině nemusí ještě znamenat akutní nebezpečí v okamžiku, kdy je tato zemina v kontaktu s třeba s podzemní vodou, jejíž pH je neutrální a schopnost těchto kovů rozpouštět se tak může být výrazně podlimitní. V okamžiku, kdy se ovšem pH podzemní vody snižuje, začnou se přítomné kovy rozpouštět. Při posuzování kontaminace těžkými kovy je tak vedle znalosti celkových obsahů kovů nutné znát koncentrace příslušných vodných výluhů a pH-podmínky na dané lokalitě (Hrdý, 2005).

Metodika

Charakteristika horizontů a půdních typů

Na zkoumaných lokalitách byly zastoupeny tyto typy půd: Kryptopodzol, Podzol, Glej a Organozem. Pro pozorování antropogenního atmosférického spadu pomocí magnetické susceptibility je nejdůležitější sledování prvních několika centimetrů svrchní vrstvy půdy. V našem případě se jedná o anhydrogenní horizonty nadložního humusu (L, F, H), hydrogenní horizonty nadložního humusu a rašelinné horizonty (T).

Anhydrogenní horizonty nadložního humusu

Vznikají na propustných půdách, které nejsou zamokřené. Tudíž tvorba humusu není ovlivněna vysoko ležící hladinou podzemní vody. Pro soubor těchto horizontů L+F+H se také používá souhrnné označení O.

Horizont opadanky – L (OL)

Je tvořen relativně čerstvým rostlinným opadem (jehličím, listím, větvičkami, kůrou, zbytky rostlin) bez zjevného rozpadu. Lze snadno rozpoznat druhy rostlin i orgánů, z kterých opadanka pochází. Je tvořena čerstvě opadlým a málo rozloženým materiálem a starším opadem, na kterém jsou již patrné první známky rozpadu.

Horizont drti (fermentační, fragmentační) – F (OF)

Tvoří jej částečně rozložené organické zbytky, jejichž původ lze ještě rozeznat. Převažují nad humifikovaným materiálem, u kterého původ už nelze určit. Je často prostoupen myceliem hub, kořínky rostlin, vyskytuje se zde i trus půdních živočichů.

Horizont měli (humifikační) – H (OH)

Horizont měli je tvořen rostlinnými zbytky v silném stádiu rozkladu. Proto jejich struktura není již většinou rozpoznatelná, materiál je z velké části amorfní. Výrazně převažuje humifikovaný materiál nad méně rozloženými zbytky, k nimž patří převážně zbytky odumřelých kořenů.

Hydrogenní horizonty nadložního humusu

Vznikají na zamokřených organických půdách nebo také na minerálních půdách, které jsou větší část roku zamokřené. Tvorba humusu je ovlivněna vysokou hladinou podzemní vody nebo vysokou půdní vlhkostí. Organický materiál je v různém stadiu rozkladu.

Hydrogenní horizont fibrický – Of

Je tvořen převážně málo rozloženými rostlinnými zbytky, u nichž lze rozeznat jejich původ.

Hydrogenní horizont mesický – Om

Skládá se z částečně ale také z dobře rozloženého organického materiálu.

Hydrogenní horizont humusový – Oh

Tvoří ho převážně dobře rozložené humusové látky.

Rašelinné horizonty - T

Vznikají rašeliněním organických zbytků rostlin v dlouhodobém převlhčení. Mocnost horizontů T je u organosolů větší než 0,5 m. U organozemě litické stačí mocnost horizontu T alespoň 0,1 m a k určení rašelinného subtypu jiných půdních typů je potřeba mocnost horizontu T větší než 0,25 – 0,3 m. Rašelinné horizonty lze obvykle rozlišit v jednotlivé vrstvy podle původu rostlinného materiálu nebo podle barvy.

Kryptopodzol - KP

Půdní typ patří do referenční skupiny Podzolsoly. Jsou to půdy se seskvioxidickým spodickým horizontem rezivé až žlutorezivé barvy. Je charakteristický nízkou objemovou hmotností a vysokou kyprostí, kterou mu propůjčují zaoblené mikroagregáty. Ty vznikají stmelením částic jílu a prachu uvolněným amorfním oxidem železa. Spodický horizont neobsahuje iluviální

akumulaci železa. Humusovou formou je nejčastěji mor a moder. Tyto půdy jsou silně kyselé ($V_M < 20 \%$) a velmi výrazně uvolňují volné oxidy Fe a Al. Vysoká je nasycenost hliníkem ($V_{Al} > 30 \%$).

Vytvářejí se v horských podmínkách v krycím a v hlavním souvrství přemístěných zvětralin lehčího zrnitostního složení (žul, pískovců apod.) Areál rozšíření v horských podmínkách spadá do chladných a vlhkých oblastí klimatických regionů. Horské kryptopodzoly jsou charakterizovány perudickým vodním a frigidním teplotním režimem. Tendence k tvorbě surového humusu.

Stratigrafie půdního profilu: O-Ah(Ap)-Bsv-C

subtypy – modální, oglejený, glejový, litický, arenický, rankerový

Podzol - PZ

Půdní typ patří také do referenční skupiny Podzolsoly. Výrazně diferencovaný profil s vyběleným (albickým) horizontem Ep a iluviálním seskvioxidickým až humusoseskvioidickým spodickým horizontem. Tento spodický horizont se vyznačuje výplní intergranulárních pórů matrice z hrubozrnných částic amorfními černohnědými (svrchní část) a rezivými (spodní část) koloidy. Humusovou formou je převážně surový humus. Tento půdní typ se vytváří ve dvou ekologicky odlišných oblastech:

- na svahovinách přemístěných zvětralin hornin dávajících lehčí zvětralinu (žuly, pískovce apod.), obsahujících nejen hlavní, ale i krycí souvrství,
- na písčích nižších poloh

Výskyt horských podzolů se vztahuje ke klimatickým regionům s frigidickým teplotním a perudickým vodním režimem, nikdy neprosychají. Podzoly nižších poloh nalézáme v klimatických regionech s mesickým udickým hydrotermickým režimem a občasným prosycháním profilu.

Podzoly jsou půdy s výrazně nenasyceným sorpčním komplexem ($V_M < 20 \%$), s vysokou nasyceností Al a tvorbou sekundárních Al-chloritů, s výraznou migrací komplexu Fe, Mn, Al s organickými kyselinami o malé molekule. Vyznačují

se vysokým podílem KVK závislé na pH. Obsah humusu je vysoký nejen v humusovém horizontu.

Stratigrafie půdního profilu: O – Ah(Ap) – Ep- Bhs – Bs – C

subtypy – modální, oglejený, glejový, litický, arenický, rankerový, nostický

Glej - GL

Půdní typ patří do referenční skupiny Glejsoly. Je charakterizován reduktomorfním glejovým diagnostickým horizontem v hloubce do 0,6 m a zrašeliněnými horizonty akumulace organických látek. Podle relace mocnosti a hloubky výskytu výrazně redukovaného horizontu Gr, glejových horizontů s oxidovanými partiemi a event. znaků hydroeluviování, dále pak podle vývoje hydrogenních až holorganických hydrogenních horizontů identifikujeme rozdíly ve vodním režimu, ke kterému vývoj půdy dospěl. Podle znaků tohoto vývoje rozeznáváme subtypy. Nacházejí se v nivách vodních toků.

Stratigrafie půdního profilu: Ot-At(T)-Gro-Gr

subtypy – modální, fluvický, hydroeluviální, povrchový, kambický, akvický, histický, pelický, planický, arenický, sulfidický

Organozem - OR

Půdní typ patří do referenční skupiny Organosoly. Půdy charakterizované holorganickým horizontem T o mocnosti > 0,5 m s výjimkou případů tvorby hor. Vznikají intenzivní akumulací slabě rozložených organických zbytků v silně zvodnělém prostředí. Jsou dále klasifikovány podle převládající rozloženosti horizontu T.

Stratigrafie půdního profilu: T ubtypy – fibrická, mesická, saprická, humolitová, glejová, litická, sulfidická

(Němeček et al., 2001)

Stav prostředí Krušných hor

Krušné hory jsou zcela specifickou oblastí s půdami silně narušenými dlouhodobou imisní zátěží, odstraňováním humusové vrstvy i přechodnou absencí lesních porostů v horských partiích.

Zdravotní stav lesů není uspokojivý. Lesy jsou dotčeny vysokou imisní zátěží, dochází ke změnám půdního chemismu, projevuje se snížená stabilita lesních porostů.

Mezi nejdůležitější negativně působící faktory na lesní porosty bylo znečištění ovzduší oxidem siřičitým. V oblasti jsou naleziště hnědého uhlí a s tím spojená výstavba elektráren a také chemický průmysl v podkrušnohorských pánvích. Toto škodlivé působení vyvrcholilo v sedmdesátých a osmdesátých letech dvacátého století, kdy docházelo k postupnému odlesnění vrcholových partií Krušných hor. I když se s tímto problémem potýkalo celé pohoří, nejvíce byla zasažena východní část mezi Klínovcem a Cínovcem, zde hodnoty průměrné koncentrace výrazně převyšovaly hodnoty na západě hor. To mělo vliv i na rozdílné poškození lesních porostů a na umístování exhalačních těžeb.

V průběhu devadesátých let došlo vzhledem k odsíření velkých zdrojů znečištění a k celkovému poklesu průmyslové produkce k významnému snížení imisní zátěže. Emise SO_2 v rozmezí let 1989–2000 poklesly o více než 90 %. Na toto zlepšení reagovaly pozitivně imisemi značně poškozené lesní porosty, které se začaly regenerovat. Vzhledem k tomu, že došlo k výraznému poklesu produkce oxidu siřičitého a spolupůsobících plynů v ovzduší, nepředpokládá se v blízké době výskyt plošného, vizuálně patrného poškození lesního porostu těmito plyny.

Přírozený vývoj půd je dlouhodobě ovlivňován jednak změnou porostní skladby dřevin, z původně smíšených porostů na smrkové monokultury, a hlavně pak působením imisních vlivů - dlouhodobou depozicí oxidů síry, dusíku, těžkých kovů aj. Projevem je postupné významné okyselování půd. Dochází k vymývání živin ze všech horizontů a k obohacování o některé těžké kovy spolu s dalšími stopovými prvky.

Významnou roli hrají v komplexu antropogenních stresorů atmosférické depozice, tedy vstup látek se srážkami. Po výrazném snížení koncentrací oxidu siřičitého představují depozice antropogenních látek pravděpodobně největší riziko

pro zdravotní stav lesních ekosystémů v Krušných horách. Za významné považujeme také depozice těžkých kovů, jako je např. olovo, kadmium, chrom a další, která ovlivňuje citlivější složky ekosystémů, především chemické vlastnosti lesních půd. Je tomu tak z několika důvodů:

- na rozdíl od znečištěného ovzduší, které působí přímo na dřeviny, se vliv kyselých depozic v půdě kumuluje,
- úroveň depozic závisí mj. na úhrnech srážek – nejvyšší zatížení je tak ve vyšších nadmořských výškách, kde jsou zároveň přirozeně chudé a k okyselování citlivé půdy,
- v současné době začíná převládat depozice dusíku nad depozicí síry. To do jisté míry podporuje růst dřevin, a zvyšuje tak tlak na půdu a nerovnováhu ve výživě porostů.
- pod lesními porosty je depozice látek vyšší než na volné ploše, protože v nich dochází k zachytávání látek v korunové vrstvě. Tento efekt se bude s odrůstáním porostů na bývalých imisních holinách zvyšovat.

Význam depozice dokládá modelové zpracování, které ukázalo, že na 87 až 90 % území přírodně lesních oblastí (PLO) Krušných hor pokračuje acidifikace jehličnatých porostů. Celkově lze tedy předpokládat relativní nárůst zatížení lesních půd. S ohledem na nízký stupeň odolnosti lesních ekosystémů (včetně lesních půd) může docházet i při relativně nízkém působení stresových faktorů (např. klimatické výkyvy) k náhlým poškozením lesních porostů (Šrámek et al., 2008).

Krušnohorský bioregion

Krušné hory tvoří souvislé horské pásmo táhnoucí se v délce přes 130km a vytváří přirozenou severozápadní hranici s Německem. Jsou široké přes 20 km a mají rozlohu 160 700 ha. Podstatná část tohoto území zasahuje do sousedního Saska. Na německé straně Krušné hory pozvolna klesají do nížiny, na české straně je tento pokles mnohem strmější. Výškový rozdíl mezi vrcholovými plošinami a úpatím Krušných hor je až 500 m a ostře odděluje vlastní hory od příkopové propadliny podkrušnohorských pánví. Nejvyšším vrcholem Krušných hor je Klínovec s 1244 m. Na území Krušných hor se rozkládají dva kraje Karlovarský a Ústecký.

Geologické podmínky

Krušné hory jsou, jako většina naše území České republiky, součástí Českého masívu. Jejich geologická stavba je velmi složitá, rozmanitá a skládá se z řady dílčích jednotek. Krušné hory pokrývají regionálně geologickou jednotku, která se podle nich i nazývá krušnohorskou oblastí. Mezi výchozy horninových komplexů budujících předplatformní základ patří hlavně krušnohorské krystalinikum. Ve východní části jsou nejčastější ortoruly, pararuly, metagranity, v západní části k nim přibývají např. svory a svorové ruly a fylity. Nachází se zde také důležité geologické těleso, známé jako karlovarský pluton žulového složení a prvohorního stáří, vznikla zde některá kaolínová ložiska. Mezi Cínovcem a Teplicemi vzniklo, jako produkt rozsáhlého vulkanismu karbonského stáří, paleoryolitické těleso s obsahem žilných vyvřelin (např. žulové porfyry nebo žulové pegmatity).

Klimatické podmínky

Nejnižší části Krušných hor, oblasti s nadmořskou výškou 300-600 m, jsou řazeny dle Quitta (1975) do mírně teplé klimatické oblasti, charakterizované průměrnou červencovou teplotou vzduchu 16 - 18 °C a průměrnou lednovou teplotou -2 až -6 °C, 20 až 50 dní v roce připadá na letní dny a 110 až 160 dní na mrazové dny.

Vrcholové partie přesahující nadmořskou výšku 600 m řadíme do chladné klimatické oblasti, charakterizované průměrnou červencovou teplotou vzduchu pod 14 °C a průměrnou lednovou teplotou vzduchu -3 až -7 °C, méně než 30 dní v roce připadá na letní dny a 140 až 180 na mrazové dny.

Srážky se vyznačují značnou proměnlivostí. Krušné hory jako celek způsobují tzv. srážkový stín v oblasti podkrušnohorských pánví, srážky pak dopadají až ve středních Čechách. Průměrné roční úhrny atmosférických srážek ve srážkovém stínu se pohybují kolem 500 mm, ale v nejvyšších polohách (okolí Klínovce, Loučná) běžně překračují 1000 mm. Z celkového ročního úhrnu srážek připadá 48 % na srážky sněhové.

Převládají severní a západní větry, které bývají vlhké a studené. Proudění přízemního větru je ovlivněno členitostí terénu, proto se často vychyluje od směru proudění ve volné atmosféře a přináší rychlou změnu počasí, ranní i celodenní mlhy.

Půdní podmínky

Geologická a geomorfologická stavba podmínila vývoj převážně kyselých až silně kyselých podzolů. V nižších polohách se objevuje kryptopodzol nebo kambizem. Většinu rozlohy hydromorfních půd tvoří gleje, které lemují sít' vodních toků nebo pramenišť. Na některém území prolínají či doprovází gleje rašelinné půdy – organozemě. Převážně v západní části Krušných hor se vyskytují velká vrchovištní rašeliniště (např. Velké a Malé jestřábí jezero, Velký močál, Božídarské rašeliniště (Křížek, 2008).

Porostní podmínky

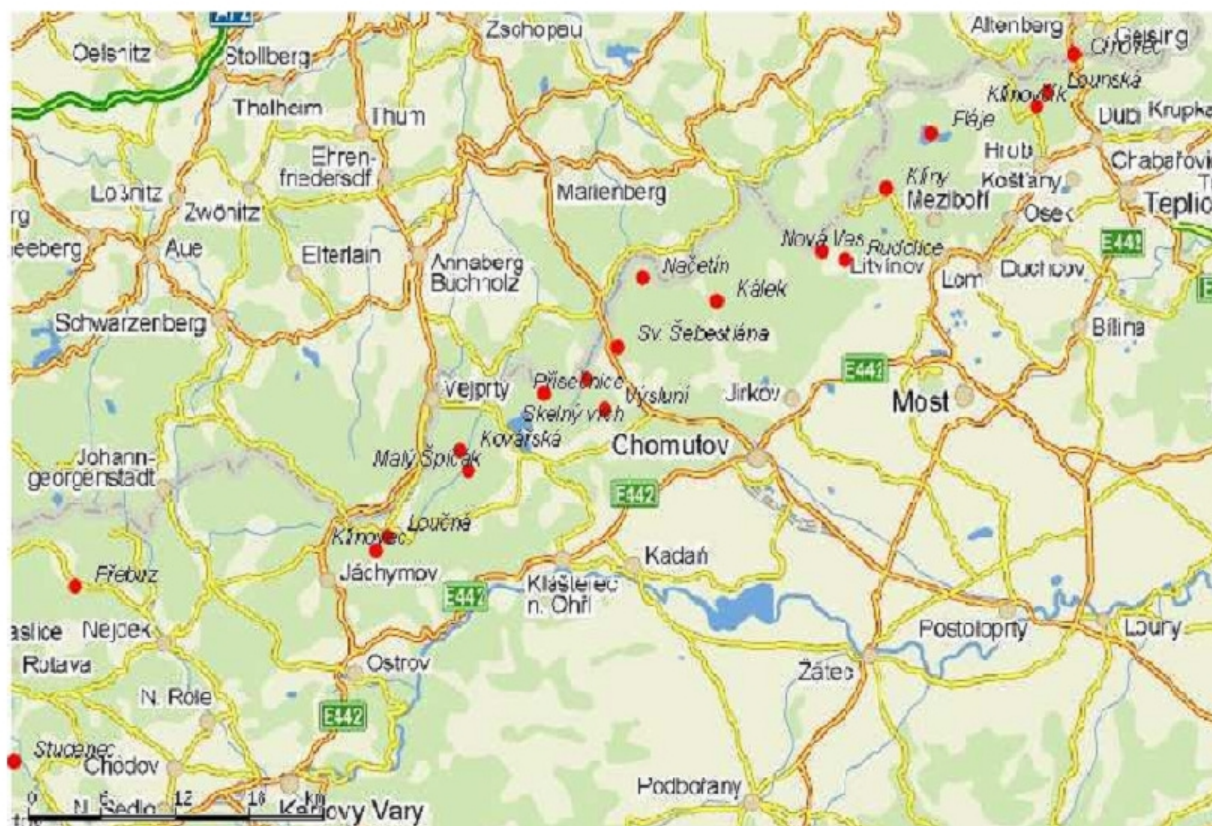
Druhová skladba lesů byla v minulosti změněna ve snaze zvýšit produkci dřeva a uspokojit poptávku po nejčastěji žádaných dřevinách. V důsledku toho dnes neúměrně převládá podíl jehličnatých dřevin nad listnatými.

Karlovarský kraj má jako jediný v republice plochu lesních pozemků větší, než plochu zemědělské půdy. Celková lesnatost kraje činí 43,3 %, což je 1,3 násobek republikového průměru, který činí 33,7 %. Celková lesnatost Ústeckého kraje činí 29,08%. Na Děčínsku je lesnatost nejvyšší 48,82 % a na Lounsku nejnižší 15,26 %. Z jehličnatých dřevin je nejvíce zastoupen smrk 37,89 %, z listnatých bříza 11,56 % a buk, který je zastoupen 7,54 %. (MŽP, 2006a; MŽP, 2006b)

V porostech Krušných hor dominují kulturní smrčiny s občasným výskytem původních bukových porostů, jednotlivých jeřábů nebo javorů. Mezi nejhojněji se vyskytující introdukovaný druh patří smrk pichlavý (*Picea pungens*). Krušné hory se nachází v 3. (dubobukovém) až 8. (smrkovém) lesním vegetačním stupni. Převažují zde kyselá společenstva smrkobukového, bukosmrkového a jedlobukového lesního vegetačního stupně. Na trvale podmačených či rašelinných půdách se vyskytují klimaxové smrčiny s kosodřevinami, borovicí blatkou (*Pinus rotundata*) a břízou trpasličí (*Betula nana*).

Charakteristika jednotlivých lokalit

Vzorky byly odebrány z 19 lokalit Krušných hor. Tyto lokality se nachází po celé délce tohoto pohoří, tak aby pokryly co největší plochu Krušných hor.



Obr. 4: Lokalizace odběrových míst v pohoří Krušných hor

Tab. 1: Přehled a charakteristika lokalit odběru sond

| Lokalita | Nadmořská výška (m n. m.) | * SLT | Půdní typ | Expozice | Číslo sondy |
|----------------------|---------------------------|-------|--------------|----------|-------------|
| Cínovec | 820 | 7K | Podzol | SZ | 1 |
| Lounská | 840 | 7G | Glej | SZ | 2 |
| Klínovčák | 810 | 7K | Podzol | Z | 3 |
| Fláje | 750 | 7K | Kryptopodzol | JZ | 4 |
| Klíny | 800 | 7K | Podzol | 0 | 5 |
| Nová Ves | 680 | 7G | Glej | SZ | 6 |
| Rudolice | 780 | 7K | Podzol | 0 | 7 |
| Kálek | 815 | 7K | Podzol | JZ | 8 |
| Náčetín | 795 | 7K | Podzol | 0 | 9 |
| Sv. Šebestián | 810 | 8R | Organozem | S | 10 |
| Skelný Vrch | 875 | 7K | Podzol | SV | 11 |
| Přísečnice | 875 | 7K | Kryptopodzol | SZ | 12 |
| Výsluní | 810 | 6K | Kryptopodzol | JZ | 13 |
| Kovářská | 800 | 7G | Glej | SV | 14 |
| Malý Špičák | 895 | 7K | Podzol | S | 15 |
| Loučná | 990 | 7V | Glej | SZ | 16 |
| Klínovec | 1230 | 8Z | Podzol | JZ | 17 |
| Přebuz | 885 | 7M | Podzol | 0 | 18 |
| Studenec | 645 | 7G | Glej | S | 19 |

*soubor lesních typů (je vymezen lesním vegetačním stupněm a edafickou kategorií)

Cínovec

Tato lokalita je nedaleko přechodu Cínovec – Altenberg. Typ půdy na dané lokalitě je charakteru typického vysokohorského podzolu s vrstvou surového humusu.

Geologické podloží tvoří vulkanické horniny zčásti metamorfované proterozoické až paleozoické amfibolity, diabasy, melafyry, porfyry.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně.

Lounská

Typ půdy je glej s rašelinovými horizonty.

Geologické podloží tvoří vulkanické horniny zčásti metamorfované proterozoické až paleozoické amfibolity, diabasy, melafyry, porfyry.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně, ale podmáčené půdy.

Klínovčák

Půdní typ - podzol.

Geologické podloží tvoří vulkanické horniny zčásti metamorfované proterozoické až paleozoické amfibolity, diabasy, melafyry, porfyry.

Spadá do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Fláje

Sonda byla odebrána poblíž vodní nádrže a zásobárny pitné vody Fláje.

Typ půdy je kryptopodzol, u kterého tvoří humusovou část převážně mor.

Geologické podloží tvoří hlíny, spraše, písky, šterky z období kvartéru.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Klíny

Půdní typ – podzol.

Geologické podloží tvoří paleozoické horniny zvrásněné a metamorfované (fylity, svory).

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Nová Ves

Typ půdy – glej.

Geologické podloží tvoří ortoruly, granulity a migmatity.

Spadá do 7. lesního vegetačního stupně, ale podmáčené půdy.

Rudolice

Půdní typ – podzol.

Geologické podloží tvoří ortoruly, granulity a migmatity.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Kálek

Půdní typ – podzol.

Geologické podloží tvoří ortoruly, granulity a velmi pokročilé migmatity v moldanubiku a proterozoiku.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Načetín

Půdní typ – podzol.

Geologické podloží tvoří granitoidy (žuly, granodiority).

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Svatý Šebestián

Půdní typ je rašelinou tvořená organozem.

Geologické podloží tvoří ortoruly, granulity a velmi pokročilé migmatity v moldanubiku a proterozoiku.

Patří do 8. lesního vegetačního stupně, kde se vyskytuje vrchovištní smrk.

Skelný vrch

Půdní typ - podzol.

Geologické podloží tvoří granitoidy (žuly, granodiority).

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Přísečnice

Půdní typ je kryptopodzol – silně kyselý.

Geologické podloží tvoří ortoruly, granulity a velmi pokročilé migmatity v moldanubiku a proterozoiku.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně.

Výsluní

Půdní typ je kryptopodzol – silně kyselý.

Geologické podloží tvoří granitoidy (žuly, granodiority).

Patří do 6. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Kovářská

Půdní typ – glej.

Geologické podloží tvoří kvarcitický svor, muskovitický až dvojslídový svor.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně, ale podmáčené půdy.

Malý Špičák

Půdní typ – podzol.

Geologické podloží tvoří deskovitě břidlicová, drobně až středně zrnitá muskovitická ortorula, granulity a velmi pokročilé migmatity v moldanubiku a proterozoiku.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s kyselou půdou.

Loučná

Půdní typ – glej.

Geologické podloží tvoří muskoviticko – biotický svor a svorová rula.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně vlhké půdy.

Klínovec

Půdní typ – podzol.

Lokalita Klínovec je nejvýše položená v nadmořské výšce 1230 m n. m.

Geologické podloží tvoří paleozoické horniny zvrásněné a metamorfované (fylity, svory).

Patří do 8. lesního vegetačního stupně. Svoji nadmořskou výškou tvoří extrémní podmínky, na kterých rostou pouze zakrslé smrky.

Přebuz

Půdní typ – podzol.

Geologické podloží tvoří žuly, středně zrnitá muskoviticko – biotická, místy porfyrická žula autometamorfovaná

Patří do 7. lesního vegetačního stupně s chudými půdami.

Studeneč

Půdní typ – glej.

Geologické podloží tvoří žuly, muskovitický až dvojslídový svor.

Je nejnižší položena z výše uvedených lokalit. V blízkosti se nachází Přírodní památka

Studeneč, který tvoří mokřadní a zrašeliněné louky s ostřicovými porosty.

Patří do 7. lesního vegetačního stupně, ale podmáčené půdy.

Magnetická měření

Měření magnetické susceptibility probíhalo pomocí měřicího systému Bartington MS2. Bartington MS2 systém pro měření magnetické susceptibility se skládá z měřicího přístroje a řady volitelných senzorů jak pro měření v laboratoři, tak přímo v terénu. Každý senzor je navržený pro speciální účel. Citlivost přístroje při měření (objemové) magnetické susceptibility je 10^{-5} SI. Měření lze provádět také na citlivějším rozsahu (10^{-6} SI), značně se však prodlužuje měřicí doba. Měřené hodnoty magnetické susceptibility jsou udávány jak v (cgs), tak v (SI) jednotkách. Kalibrace

přístroje je prováděna pomocí etalonu, resp. vzorku o známé a stabilní hodnotě magnetické susceptibility.

Měření v terénu

Pro měření v terénu jsou určeny senzory MS2D a MS2F. Oba tyto senzory obsahují kruhovou sondu (různého průměru), která se připojuje k měřicí jednotce MS2B. Měřicí jednotka je napájena z akumulátoru. Sonda MS2D má průměr 185 mm, hloubka penetrace měřicího magnetického pole je cca 10 cm. Používá se pro měření a mapování magnetické susceptibility povrchových půdních vrstev. Měření je poměrně jednoduché a lze rychle získat rozsáhlý soubor dat.

Dále byla měřena magnetická susceptibilita půdního profilu stratigrafickou sondou MS2F. Sonda má průměr 1,5 cm, hloubka penetrace měřicího magnetického pole je cca 1-2 cm. Využívá se především při proměřování půdních hloubkových profilů v odkrytých půdních sondách. Vzhledem k menší hloubce penetrace měřicího pole je třeba dbát na dobrou úpravu měřených půdních povrchů.

Pro změření hloubkového profilu magnetické susceptibility byl použit také přístroj SM400 (ZH Instruments), který je schopen měřit vertikální distribuci magnetické susceptibility v reálném čase přímo v terénu. Přístroj je propojen s počítačem a je schopný měřit až do hloubky 40 cm s přesností 10^{-5} SI.

Měření v laboratoři

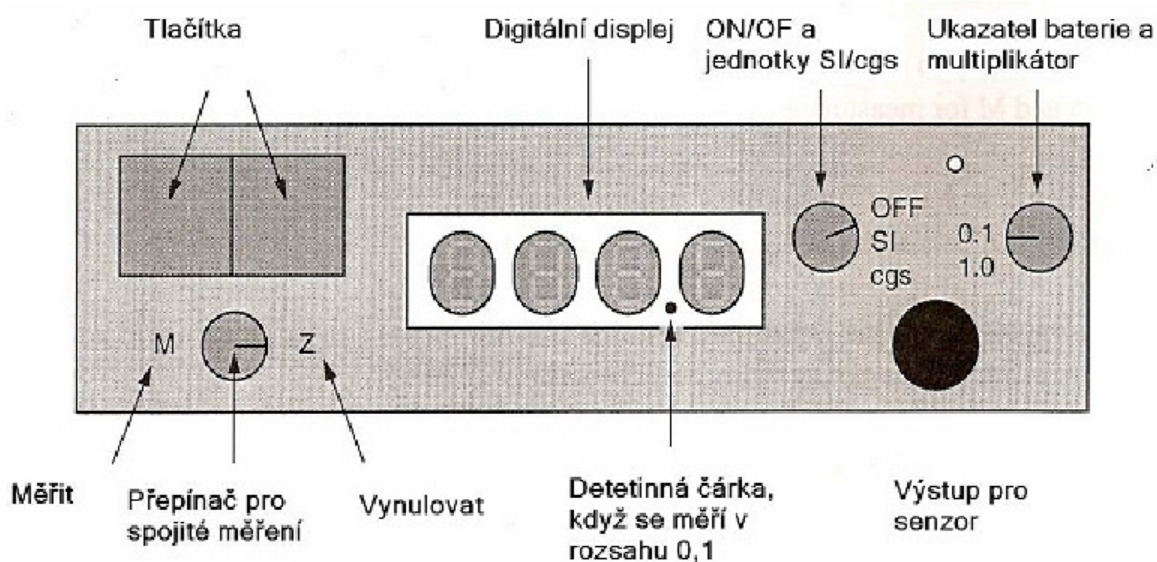
Vzorky byly upraveny pro magnetická měření a chemické analýzy. Z jednotlivých půdních horizontů byly odebrány dílčí vzorky pro laboratorní magnetometrická stanovení, které byly zbaveny hrubých částic (kořenů a kamenů), vysušeny na vzduchu a dány do mikroténových sáčků.

Vzorky z jednotlivých horizontů byly prosety sítím se zrnitostní frakcí < 2 mm (jemnozem). Z této připravené frakce jsem odebíral vzorky do plastových kelímků o objemu 10 cm^3 a posléze zvažil. Hmotnost spolu se známým objemem mi umožnila určit i hmotnostně specifickou magnetickou susceptibilitu.

MS2B je přenosný laboratorní senzor, který umožňuje měření magnetické susceptibility při dvou různých frekvencích měřicího magnetického pole. Vzorky jsou umístěny v plastových kelímcích o objemu 10 cm^3 . Vzhledem ke konstantnímu objemu měřeného vzorku, lze pomocí MS2B měřit jeho hmotnostně specifickou

susceptibilitu. Vlastní měření probíhá při nízké frekvenci κ_{LF} (0,46 kHz) a vysoké frekvenci κ_{HF} (4,6 kHz). Měření při dvou frekvencích a výpočet frekvenčně závislé magnetické susceptibility κ_{FD} umožňuje specifikovat podíl ultrajemných feromagnetik v půdách. Hodnoty frekvenčně závislé susceptibility pomáhají indikovat velikosti feromagnetických zrn.

Pomocí přístroje Bartington MS2C jsem změřil magnetickou susceptibilitu z vertikálních půdních profilů. Kruhová cívka snímacího senzoru MS2C je navržena pro měření magnetické susceptibility v odebraných jádrech materiálů o průměru 4 cm. MS2C senzor je používán především pro měření v laboratoři, v nezbytných případech může být měření jader provedeno také přímo v terénu.



Obr. 5: Bartington MS2 měřící digitální panel

Termomagnetické měření

Pro účely magnetomineralogie byla vyšetřována teplotní závislost susceptibility pomocí CS-3 aparatury ve spojení s můstkem KLY-3 (fa Agico) v teplotním rozsahu 0 – 800 °C. Pomocí této aparatury lze měřit susceptibilitu pevných materiálů s velkou citlivostí 10^{-8} SI. Přístroj umožňuje měřit krátkou dobu a ovládá se přes počítač pomocí specializovaného softwaru. Výstupem z termomagnetického měření jsou dvě křivky – zahřívací a chladicí. Dle jejich průběhu lze určit Curieovu teplotu (T_C) feromagnetických oxidů, která jsou součástí zkoumaných vzorků.

Tab. 2: Přehled Curieovi teploty pro vybrané minerály

| Minerál | Chemický vzorec | Magnetické zařazení | T _c (°C) |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Oxidy železa | | | |
| Magnetit | Fe ₃ O ₄ | Ferimagnetika | 580 |
| Hematit | α-Fe ₂ O ₃ | Antiferomagnetika | 675 |
| Maghemit | γ-Fe ₂ O ₃ | Ferimagnetika | 590-675 |
| Sulfidy železa | | | |
| Pyrhotin | Fe ₇ S ₈ | Ferimagnetika | 320 |
| Greigit | Fe ₃ S ₄ | Feromagnetika | 330 |
| Hydroxidy železa | | | |
| Goethit | α-FeOOH | Antiferomagnetika | 120 |
| Lepidokrokit | γ-FeOOH | Paramagnetika | -196 |

Nemagnetická měření

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Tyto analýzy byly prováděny v laboratoři Geologického ústavu AVČR. Byl použit přístroj SX100 CAMECA s možností až 30.000 násobného zvětšení.

Tato metoda umožňuje studium povrchu částic a jejich morfologie pomocí analýzy sekundárních nebo zpětně odražených elektronů. Zároveň umožňuje stanovit prvkové složení mikročástic. Elektrony dopadají na pozorovaný preparát a interakcí s hmotou vyráží ze vzorku elektrony. Tyto elektrony jsou pomocí vhodného potenciálu přitahovány na detektory, které vytváří signál upravený pro zpracování v zobrazovacím systému. Zobrazovacím systémem může být obrazovka, na které se vytváří příslušný obraz vzniklý rastrováním elektronového paprsku po snímané ploše. Výsledným obrazem je snímek, který zachycuje povrchovou strukturu preparátu.

Vzorky je potřeba nejprve potáhnout tenkou vrstvou vodivého materiálu (uhlík, zlato či jiný kov nebo slitina) před začátkem pozorování, aby se odváděl povrchový náboj generovaný měřicím elektronovým paprskem.

SEM analýza je nedestruktivní, nevede ke ztrátě objemu vzorku, takže je možné analyzovat stejný materiál opakovaně.

Cílem tohoto pozorování bylo identifikovat antropogenní ferimagnetické částice, které se vyznačují specifickou morfologií, a jejich výskyt v půdních horizontech. Tyto částice se nazývají sférule.

Chemické analýzy

Chemické analýzy byly prováděny v laboratořích FŽP v Kostelci nad Černými lesy. Zjišťovalo se množství těžkých kovů v odebraných půdních vzorcích.

Atomová absorpční spektrometrie

Atomová absorpční spektrometrie (AAS) využívá jako analytickou vlastnost absorpci záření volnými atomy sledovaného elementu. Jejím principem je absorpce záření volnými atomy v plynném stavu, které vznikají v atomizátorech. Volné atomy v plynném stavu absorbují fotony určité energie, záření o určité vlnové délce. Pro tvorbu volných atomů se nejčastěji používá plamen, který podle druhu paliva a oxidovačla dosahuje teploty 2000 – 3150 K (Komínková et Mestek, 1997).

Specifický paprsek světla, jehož zdrojem je dutá katodová výbojka, je vyzařován do atomizační a měrné komory, kde analyzovaný kapalný vzorek je ve formě aerosolu nejdříve vypařován a tepelně atomizován plamenem (získání volných atomů). Plamen je vytvářen palivem a oxidačním plynem. Pomocí monochromátoru je určitá vlnová délka procházejícího světla vyfiltrována z čárového spektra prvku. Úbytek intenzity procházejícího světla je přímo úměrný počtu volných atomů stanovovaného prvku v analyzovaném vzorku. Dle změněné absorpce v dané vlnové délce lze absorbující látku identifikovat a stanovit její množství.

Metoda umožňuje stanovení více než 60 prvků, kovových prvků a metaloidů. Významný je podíl této metody při sledování nízkých obsahů toxických prvků ve vzorcích životního prostředí, kde se velmi dobře uplatňuje pro svou vysokou citlivost a selektivitu.

Výsledky

Frekvenčně závislá susceptibilita

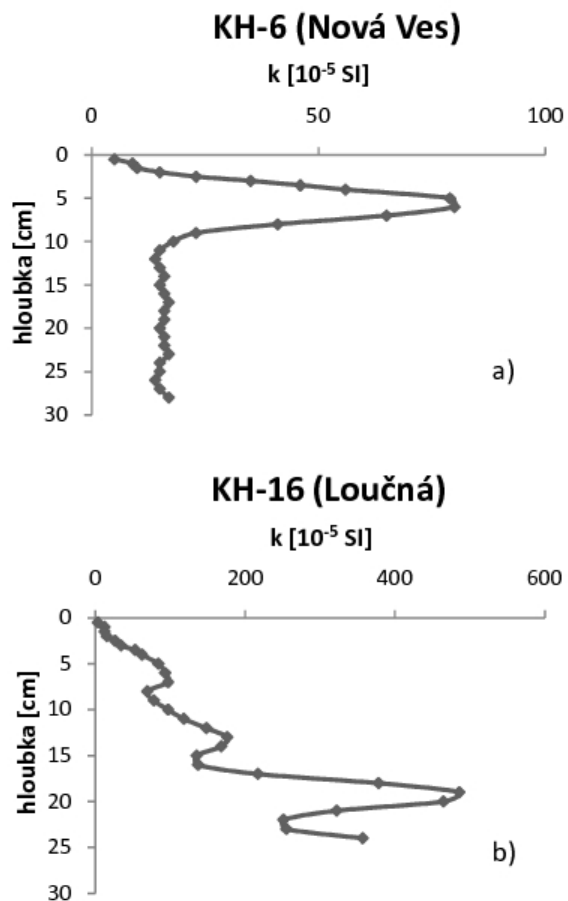
Celkem bylo proměřeno 102 odebraných vzorků z jednotlivých horizontů a 40 vzorků pro získání hloubkového profilu magnetické susceptibility. Pro spolehlivé stanovení frekvenčně závislé susceptibility jsme limitováni určitou velikostí absolutní hodnoty magnetické susceptibility. Hodnoty objemové magnetické susceptibility $\leq 20 \times 10^{-7}$ SI nedávají věrohodné výsledky a jsou zatíženy velkou chybou měření, proto jsou v Příloze č. 1 uvedeny hodnoty frekvenčně závislé susceptibility pouze pro hodnoty větší než 20×10^{-7} SI.

U svrchních horizontů jednotlivých lokalit nepřesahují hodnoty κ_{FD} 4 %, což svědčí o dominanci MD částic. Pouze jen na některých lokalitách ukazují hodnoty vyšší než 4 % a to ve spodních horizontech. To poukazuje na přítomnost SD a SP částic.

Průběh magnetické susceptibility ve vertikálních profilech

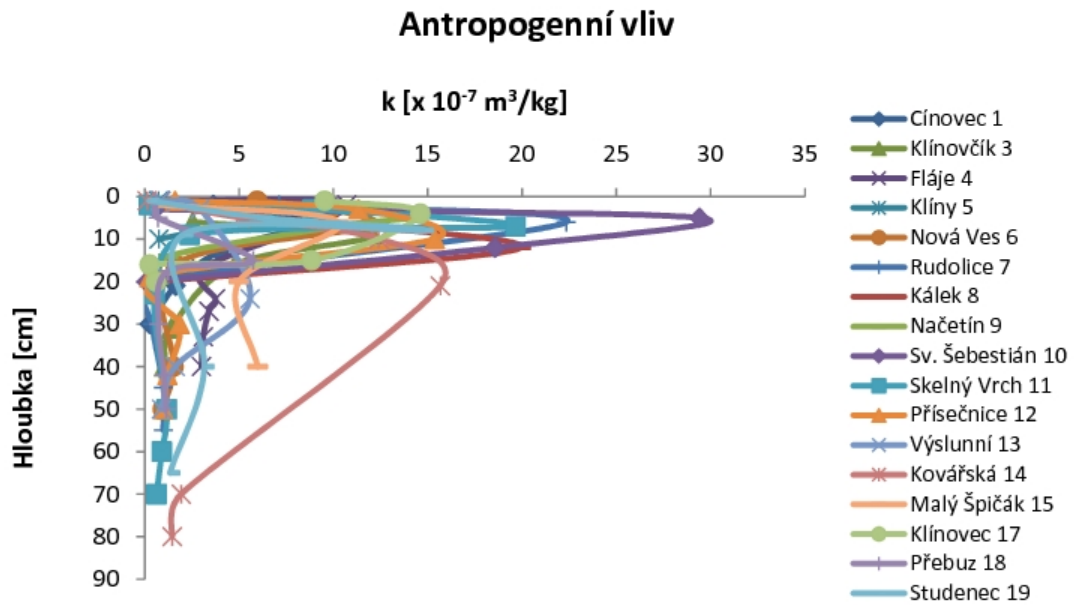
Z lokalit byly odebrány vzorky horizontů půd, z kterých byly sestrojeny hloubkové průběhy hmotnostně-specifické magnetické susceptibility, které braly v úvahu různé vlhkosti a hustoty materiálů. Grafy byly vytvořeny pomocí programu Microsoft Office Excel. Vertikální půdní profily byly také měřeny stratigrafickou sondou MS2F, přístrojem SM 400 a byla odebrána jádra pro měření objemové magnetické susceptibility. Jedním z cílů bylo vyloučit lokality s dominantním litogenním příspěvkem.

Charakteristický průběh magnetické susceptibility kontaminovaných půd je znázorněn na Obr. 6 a), kde magnetická susceptibilita nabývá maxima ve svrchních horizontech a poté s hloubkou klesá. Převažuje-li v půdě litogenní příspěvek nad antropogenním hodnota magnetické susceptibility s přibývajícím hloubkou vzrůstá a je zde patrný vliv mateční horniny Obr. 6 b).

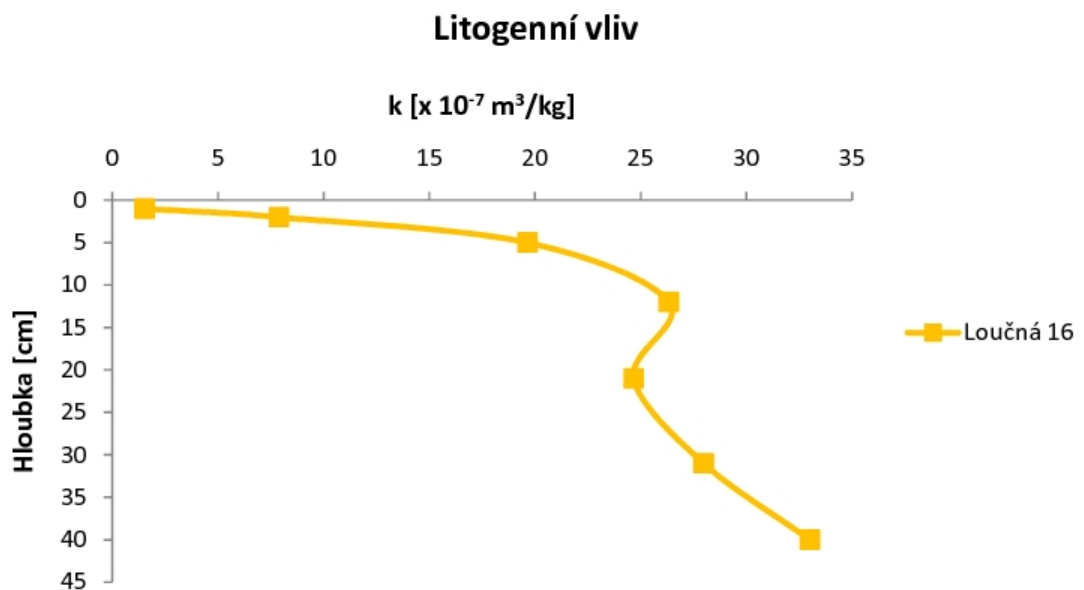


Obr. 6: Charakteristické průběhy magnetické susceptibility (objemové magnetické susceptibility) v půdním profilu s převažujícím antropogenním a) a litogenním b) příspěvkem.

U všech lokalit vyjma lokality č. 16 (Loučná), která je charakteristická litogenním příspěvkem, převažoval antropogenní příspěvek. U lokality č. 2 (Lounská), která měla netradiční průběh křivky, jsem musel porovnat s dalšími měřeními, abych určil jaký příspěvek je dominantní.

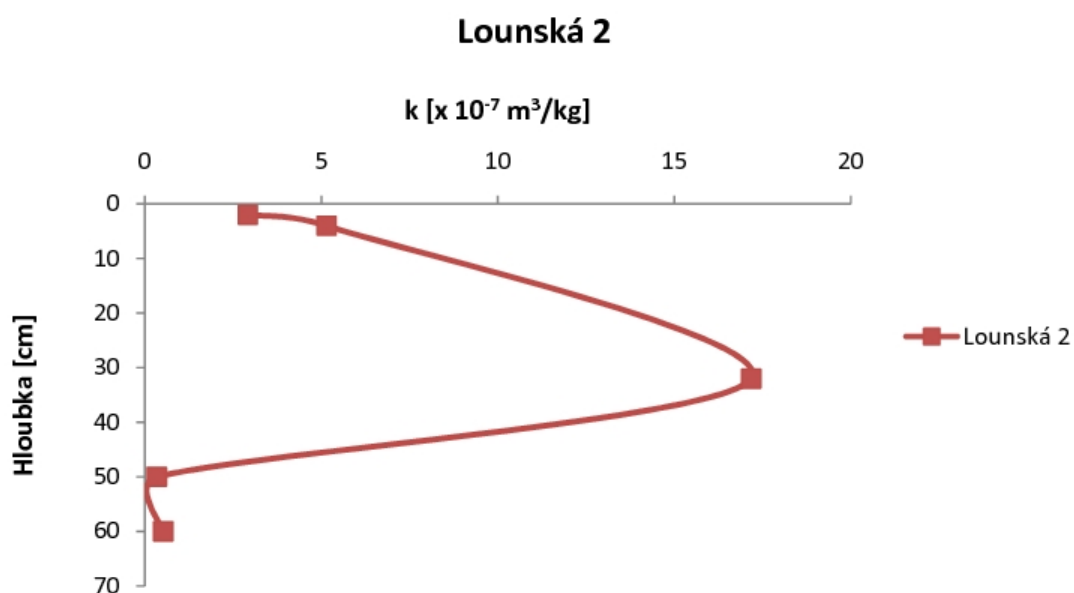


Obr 7: Průběhy křivek magnetické susceptibility (hmotnostně-specifické magnetické susceptibility) pro hloubkové profily s antropogenním příspěvkem.

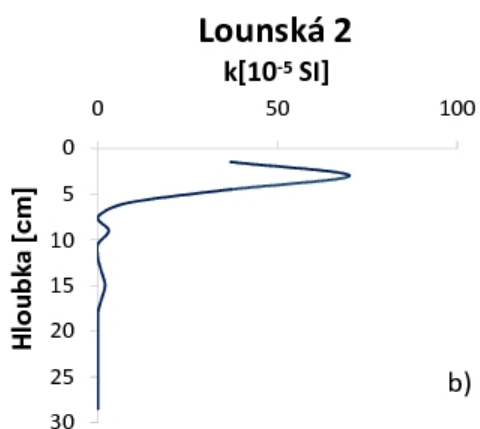
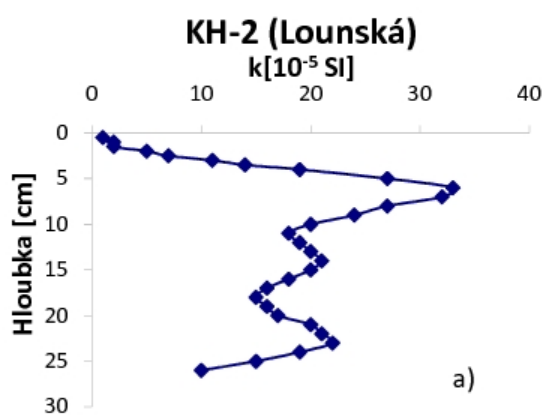


Obr. 8: Průběhy křivek magnetické susceptibility (hmotnostně-specifické magnetické susceptibility) pro hloubkové profily s litogenním příspěvkem.

U lokality Lounská (sonda č. 2) nebylo zcela jasné z průběhu křivky, jestli nárůst hodnot magnetické susceptibility má antropogenní či litogenní příčinu. Proto jsem porovnal křivku s dalšími měřeními (stratigrafickou sondou a s odebraným jádrem profilu).



Obr. 9: Průběh křivky magnetické susceptibility (hmotnostně-specifické magnetické susceptibility) pro sondu č. 2 (Lounská).



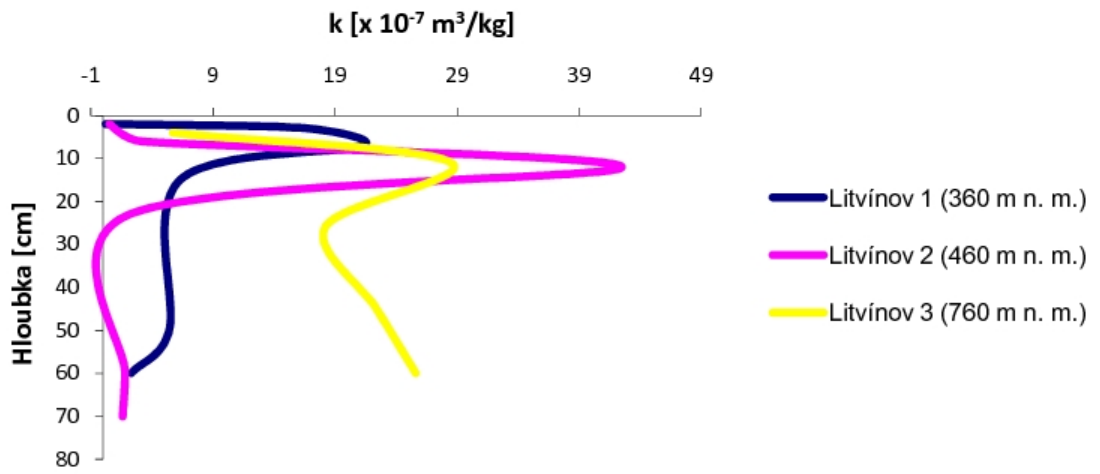
Obr. 10: Průběhy křivky magnetické susceptibility (objemové magnetické susceptibility) pro sondu č. 2 (Lounská), a) odebrané jádro o průměru 4 cm a b) stratigrafická sonda.

Po porovnání s ostatními měřeními se jeví zvýšení magnetické susceptibility jako důsledek antropogenních částic.

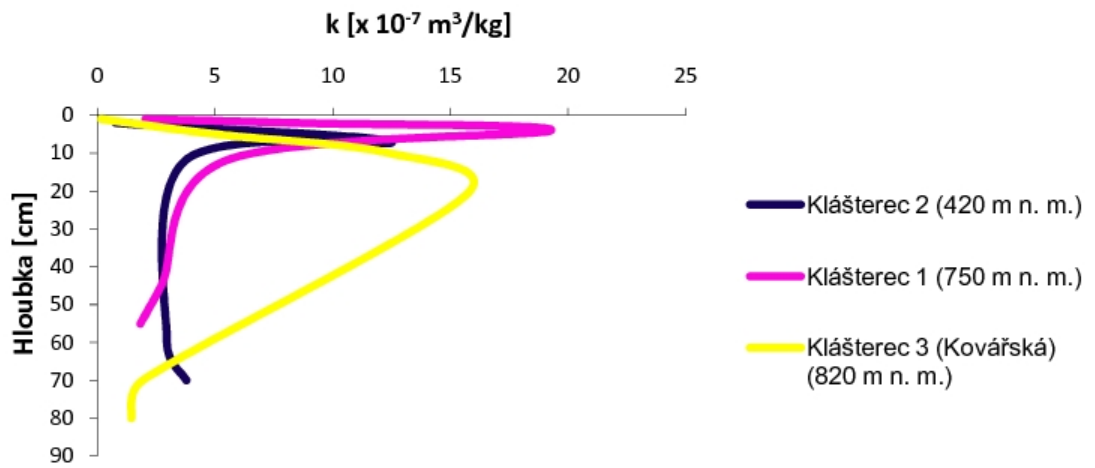
Výškové profily

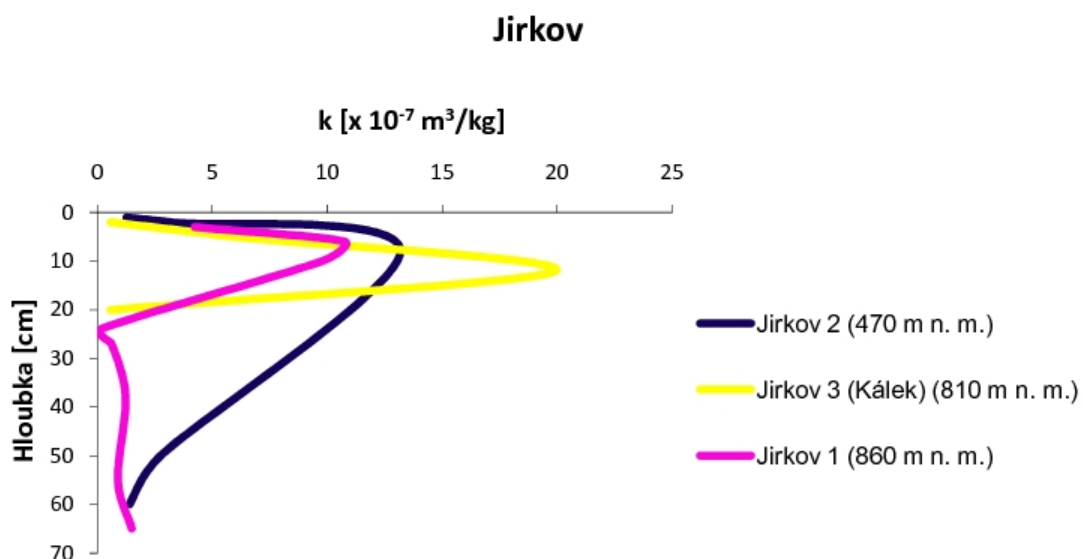
Výškové profily byly měřeny v lokalitách kolem Litvínova, Jirkova a Klášterce, pro znázornění průběhu změny hodnot magnetické susceptibility na nadmořské výšce. V sondě Litvínov 3 převažuje litogenní příspěvek částic. U jednotlivých bodů je uvedena orientační nadmořská výška.

Litvínov



Kláštorec



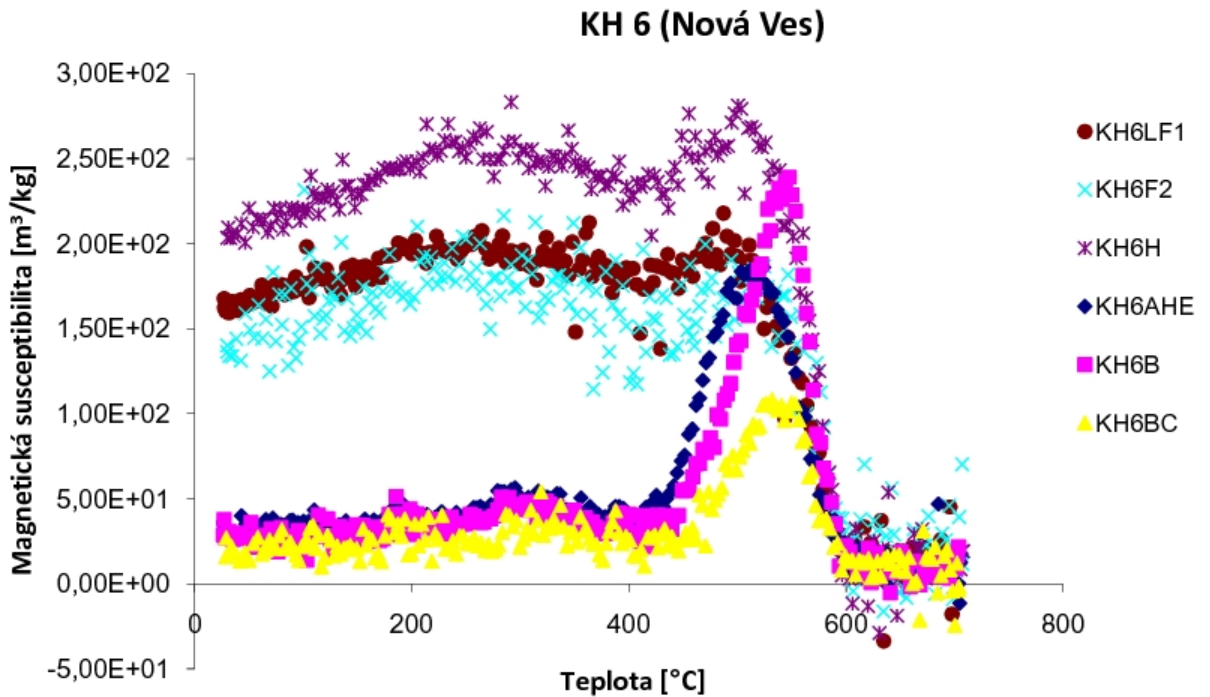


Obr. 11: Průběhy křivek magnetické susceptibilitě (hmotnostně-specifické magnetické susceptibilitě) u výškových profilů Litvínov, Klášterec a Jirkov.

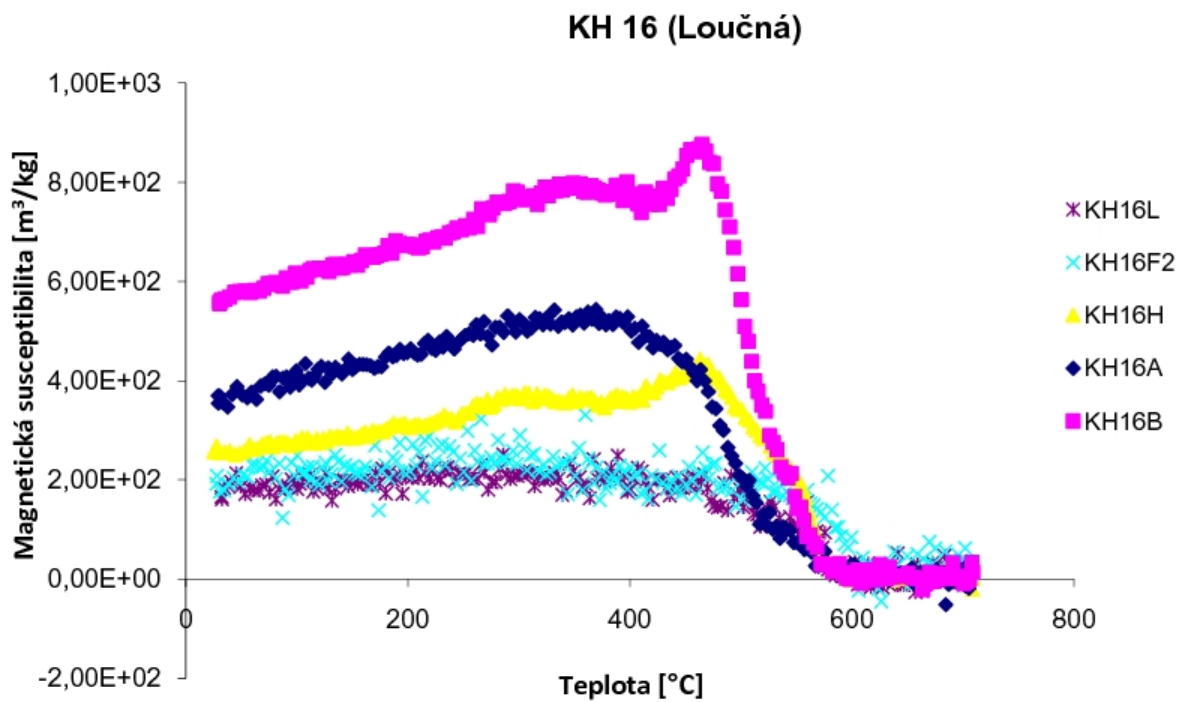
Termomagnetické měření

Pro měření magnetické susceptibilitě v závislosti na teplotě byly vybrány vzorky z těch půdních horizontů, které vykazovaly nejvyšší hodnoty magnetické susceptibilitě. Vysokoteplotní měření probíhalo v rozsahu 20 - 800 °C. Bylo vybráno celkem 7 vzorků, 5 s antropogenním příspěvkem a 2 s litogenním. Z průběhů jednotlivých křivek lze určit dominantní přítomnost magnetického minerálu magnetitu, který po překročení Curieovy teploty 580 °C získává paramagnetické vlastnosti. Jelikož většina detekovaného magnetitu se nacházela ve svrchních vrstvách, můžeme s velkou pravděpodobností hovořit o magnetitu antropogenního původu.

Pro vykreslení křivky s dominantním litogenním příspěvkem byly použity vzorky z lokality č. 16 (Loučná) a lokality Litvínov 3 z výškového profilu. Z průběhu křivky můžeme vidět jasný příspěvek litogenního původu. Zde můžeme také pozorovat prudký pokles v podpovrchových horizontech zahřívací křivky v okolí teploty 580 °C, v tomto případě jde o působení primárních minerálů vzniklých zvětrávání mateční horniny.



Obr. 12: Teplotní závislost magnetické susceptibility (ohřivací křivka) pro lokalitu s dominujícím antropogenním příspěvkem.



Obr. 13: Teplotní závislost magnetické susceptibility (ohřivací křivka) pro lokalitu s dominujícím litogenním příspěvkem.

Výsledky nemagnetických analýz

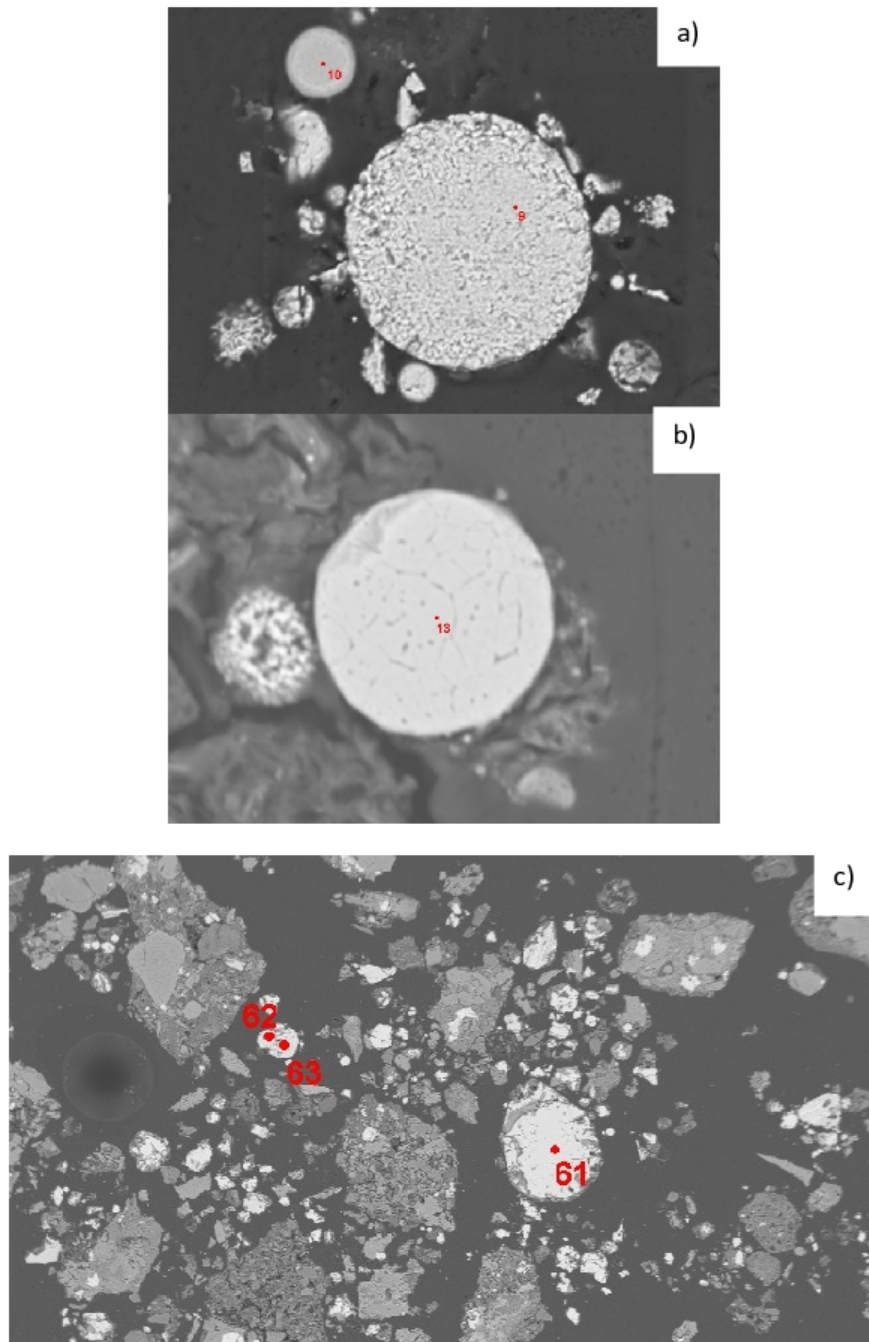
Chemické analýzy

U všech lokalit a výškových profilů kromě lokality Klíny (lokalita č. 5) byly provedeny rozборы kovů v jednotlivých horizontech. Vzorky z lokality Klíny nebyly vhodné pro tento rozbor. Obsah kovů byl měřen metodou atomové absorpční spektrometrie (AAS), pomocí které bylo stanoveno množství Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb a Zn. Navážka v rozmezí 0,20 – 0,25 g každého vzorku byla rozložena 5 ml HF a 3 ml HNO₃. Pomocí tohoto výluhu se uvolňují prvky sorpčně vázané na půdní částice, které by se mohly při změně pH půdního prostředí transportovat do vodních zdrojů. Tabulka s výsledky je uvedena v Příloze č. 2

Skenovací elektronová mikroskopie s prvkovými analýzami

Pro skenovací elektronovou mikroskopii byly vybrány vzorky s vysokou hodnotou magnetické susceptibility, ze kterých se vyseparovaly magnetické extrakty. Konkrétně se jedná o vzorky z lokality Rudolice horizont Ah + H, Skelný Vrch horizont H, Litvínov 3 horizont B/C a Litvínov 3 horizont H. Lokalita Litvínov 3 obsahuje, dle předchozích měření, dominantní litogenní magnetické částice.

Velikost sférických částic je velmi rozmanitá, v uvedených vzorcích se pohybovala od 1 – 50 μm . Hustoty výskytu sférulí bylo velmi obtížné určit. Ve vzorcích se vyskytují ojedinělé a izolované lokace, kde jsou částice nahromaděny. Pro tento případ byly spočteny sférule na nábrusu a pak poděleny plochou nábrusu. U vzorků z lokalit Rudolice a Skelný Vrch se hustota sférulí pohybovala přibližně kolem 17 – 19 částic na mm^2 naproti lokalitě Litvínov 3, kde se stěží vyskytovala jedna částice na mm^2 .



Obr. 14: Ukázky sférických částic z lokality Rudolice a), Skelný Vrch b) a Litvínov 3 c)

Ve vzorcích z Litvínova 3 se vyskytují ostrohranné úlomky, které by se daly považovat za značně rozložené horninové fragmenty ze zvětrávacích procesů. Sférické částice jsou tvořeny především magnetickými Fe-oxidy a alumosilikáty s Fe-oxidy, ve vzorku Litvínov 3 B/C se nacházel také ve velké míře oxid titaničitý (TiO_2).

Diskuse

Kontaminovaná území pevným atmosférickým spadem vykazují systematicky zvýšené hodnoty magnetické susceptibility svrchních půdních horizontů, jelikož součástí imisí jsou ferimagnetické minerály, zejména Fe-oxidy (např. magnetit)

Pro zjištění hodnot magnetické susceptibility byly v této práci použity terénní a doplňující laboratorní měření. Pomocí laboratorních metod se určily vlastnosti antropogenních a litogenních částic a detekoval se dominantní příspěvek těchto částic v jednotlivých hloubkových profilech.

Frekvenčně závislá susceptibilita byla počítána jen pro vzorky, které splňovaly podmínku pro spolehlivé stanovení frekvenčně závislé susceptibility a tou je hodnota objemové magnetické susceptibility vyšší než 20×10^{-7} SI. Tato podmínka byla splněna jen u některých vzorků. Hodnoty menší než $\kappa_{FD} 4 \%$, indikují dominanci MD (antropogenní) částic a vyskytují se ve svrchních horizontech. SP (pedogenní) částice, pro které je charakteristická hodnota vyšší než 4% se nacházejí v některých spodních horizontech.

Dalším faktorem, který může ztěžovat interpretaci naměřených hodnot magnetické susceptibility povrchových kontaminovaných půdních horizontů je magnetický vliv horninového podloží. V některých lokalitách může být magnetický vliv horninového podloží dominantní. Ze souboru 26 půdních sond (včetně 7 sond z lokalit pro výškový profil) se tento efekt projevil u dvou profilů (Obr. 9 a Obr. 11 - Litvínov 3). U lokality č. 2 (Lounská) nebylo z křivky hmotnostně-specifické susceptibility zcela prokazatelné, jestli se jedná o antropogenní nebo litogenní dominanci částic (Obr. 9), proto jsem porovnal průběh hloubkového profilu s hloubkovými profily z měření jádra a stratigrafické sondy. Oba průběhy křivek jasně prokázaly, že se jedná o antropogenní příspěvek. V ostatních případech byl nárůst magnetické susceptibility ve svrchních vrstvách zcela zřetelný a dobře měřitelný.

Termomagnetická měření poukázala na přítomnost magnetitu, jako dominantního primárního ferimagnetika, ve většině vybraných vzorků. Zahřívací křivka prudce klesala v oblasti $580 \text{ }^\circ\text{C}$, což je právě T_C magnetitu.

Pomocí atomové absorpční spektrometrie byly stanoveny obsahy vybraných těžkých kovů z povrchových a podpovrchových půdních horizontů. Ke stanovení závislosti magnetické susceptibility a těžkými kovy byl použit rozklad ve 5 ml HF a 3 ml

HNO₃. Prezentace kontaminace lesních půd těžkými kovy je velice obtížná, jelikož neexistují žádné zákonné maximální limity těžkých kovů pro lesní půdy. Existují pouze doporučené maximální hodnoty pro čtyři vybrané prvky Cd, Cu, Pb, Zn mezinárodního programu IPC Forests, zde však používají lučavku královskou, proto opět nemůžeme tyto hodnoty přímo porovnávat.

Jedním z cílů diplomové práce bylo porovnat možnou vazbu mezi koncentracemi těžkých kovů v půdách a magnetickou susceptibilitou. Nárůst magnetické susceptibility spolu s koncentrací těžkých kovů ve svrchních horizontech (L, F, H).

Pomocí skenovací elektronové mikroskopie byly z magnetických extraktů z vybraných půdních vrstev detekovány Fe- oxidy, které ve svrchních půdách byly především ve formě sférických částic. U vzorků z Litvínova 3 byly ojediněle se vyskytující sférické částice obklopeny ostrohrannými úlomky, které jsou pravděpodobně rozložené fragmenty matečných hornin. Sferule jsou tvořeny z Fe-oxidů a hlinitokřemičitanů. V případě nejhlubších půdních horizontů v lokalitě Litvínova 3 (B/C půdní horizont) bylo u Fe-oxidu detekována značná koncentrace TiO₂, což jednoznačně svědčí o jejich litogenním původu.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjistit vhodnost využití magnetické metody při studium kontaminace lesních půd v oblasti Krušných hor pevnými depozicemi. Oblast se nachází

Seznam použité literatury

ADRIANO D. C., 1986: *Trace Elements in the Terrestrial Environment: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metal*. Springer-Verlag, New York.

ATHAR M., VOHORA B. S., 2001: *Heavy metals and environment*. New Age International, New Delhi.

BOHÁČOVÁ L., BURIÁNEK V., ČAPEK M., FABIÁNEK P., FADRHOŇSOVÁ V., LACHMANOVÁ Z., LOMSKÝ B., NOVOTNÝ R., ŠRÁMEK V., UHLÍŘOVÁ H., VORTELOVÁ L., 2010: *Monitoring zdravotního stavu lesa v České republice: Ročenka programu ICP Forests/FutMon data 2008 a 2009*. VÚLHM.

DEARING J., 1999: *Environmental magnetic susceptibility - Using the Bartington MS2 System*. Chi Publishing, 2. vydání, 54 s.

HRDÝ M., 2005: *Dekontaminační technologie*. VŠCHT Praha, online: <http://www.vscht.cz/uchop/CDmartin/3-kontaminanty/4-1>, cit. 1.4.2011.

HUNT, A., 1986: *The application of mineral magnetic methods to atmospheric aerosol discrimination*. Phys. Earth Planet, s. 10 – 21.

KAPIČKA A., PETROVSKÝ E., 2004: *Magnetismus hornin a jeho aplikace při studiu znečištění životního prostředí*. Čs. čas. fyz. 54, s. 240 – 243.

KOMÍNKOVÁ J., MESTEK O., 1997: *Atomová absorpční spektrometrie*. VŠCHT, online: <http://www.vscht.cz/anl/lach2/AAS.pdf>.

KŘÍŽEK P., 2008: *Obsah těžkých kovů a magnetické vlastnosti půd v regionu Krušných hor: Bakalářská práce*. Nepublikováno, dep.: Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze.

LIPTÁK J., SEDLÁČEK J., 1996: *Úvod do elektrotechnických materiálů*. ČVUT, Praha.

MŽP, 2006 a: *Stav životního prostředí v jednotlivých krajích České republiky v roce 2005: Karlovarský kraj*. MŽP, Praha.

MŽP, 2006 b: *Stav životního prostředí v jednotlivých krajích České republiky v roce 2005: Ústecký kraj*. MŽP, Praha.

NĚMEČEK J., MACKŮ J., VOKOUN J., VAVŘÍČEK D., NOVÁK P., 2001: *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky*. ČZU Praha spolu s VÚMOP Praha, Praha, 1. vydání, s. 78.

PETROVSKÝ E., KAPIČKA A., JORDANOVA N., KNAB M., HOFFMANN V., 2000: *Low – field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems*. *Environmental Geology*, 39, č. 3 – 4, Online: <http://springerlink.com/>, cit. 11. 3. 2011.

QUITT, E. (1975): *Klimatické oblasti ČSR, 1:500 000*. Kartografické nakladatelství, Praha.

ŠRÁMEK V., KULHAVÝ J., LOMSKÝ B., BORŮVKA L., MATĚJKA K., HADAŠ P., FIALA P., 2008: *Stav prostředí v Krušných horách*. *Lesnická práce*, 87, č.1, online: <http://lesprace.silvarium.cz/content/view/2053/169/>, cit. 25. 3. 2011.

THOMPSON R., OLDFIELD F., 1986: *Environmental magnetism*. Allen and Unwin, London.

UHLÍŘOVÁ H., HEJDOVÁ J., 2000: *Těžké kovy v lesních ekosystémech České republiky*. *Zprávy lesnického výzkumu*, 44, 1999, č. 3.

ÚSTŘEDNÍ ÚSTAV GEOLOGICKÝ, 1974: *Krušné hory – Západní část 1: 50 000 - soubor oblastních geologických map*. Praha.

VEROSUB K. L., ROBERTS A. P., 1995: *Environmental Magnetism: Past, present and future*. *Journal of Geophysical Research*, 100, č. 2, s. 2175 – 2195.

Seznam příloh

Příloha 1: Hodnoty objemové (κ), hmotnostně-specifické (χ) a frekvenčně závislé magnetické susceptibility ($\kappa_{FD\%}$)

Příloha 2: Výsledky chemických analýz

Příloha 1: Hodnoty objemové (κ), hmotnostně-specifické (χ) a frekvenčně závislé magnetické susceptibility ($\kappa_{FD\%}$)

| Půdní sonda | Půdní horizont | Hloubka (cm) | | Hmotnost (g) | κ ($\times 10^{-5}$ SI) | χ ($\times 10^{-7}$ m ³ /kg) | $\kappa_{FD\%}$ |
|------------------------|----------------|--------------|----|--------------|---------------------------------|---|-----------------|
| | | od | do | | | | |
| 1 Cínovec | L + F | 0 | 2 | 1,4729 | 5,33 | 3,63 | |
| | Fh | 2 | 6 | 2,8804 | 24,39 | 8,47 | 3 |
| | H1 | 6 | 13 | 4,5948 | 18,06 | 3,94 | 4 |
| | H2 | 13 | 21 | 5,8548 | 9,56 | 1,63 | |
| | Ah | 21 + | | 8,6744 | 2,22 | 0,26 | |
| 2 Lounská | L + F1 | 0 | 2 | 1,2661 | 3,78 | 2,92 | |
| | F2 + H | 2 | 4 | 1,5646 | 8,00 | 5,15 | |
| | T1 | 4 | 32 | 2,0278 | 34,89 | 17,18 | 0 |
| | T2 | 32 | 50 | 2,9895 | 1,00 | 0,34 | |
| | G | 50 + | | 6,8745 | 3,56 | 0,52 | |
| 3 Klínovčák | L + F1 | 0 | 6 | 1,2531 | 3,17 | 2,52 | |
| | Fem | 6 | 9 | 2,7971 | 33,44 | 12,07 | 2 |
| | Ah1 | 9 | 16 | 5,2314 | 24,89 | 4,76 | 3 |
| | B | 16 | 31 | 6,0518 | 8,39 | 1,39 | |
| | B/C | 31 + | | 8,3306 | 8,56 | 1,03 | |
| 4 Fláje | L + F1 | 0 | 1 | 1,1836 | 1,00 | 0,85 | |
| | F2 + H | 1 | 2 | 3,0146 | 32,28 | 10,71 | 0 |
| | Ah | 3 | 17 | 5,4686 | 16,44 | 3,00 | |
| | Ap | 17 | 24 | 5,5298 | 20,78 | 3,75 | 1 |
| | B | 24 | 27 | 6,7789 | 23,06 | 3,40 | 3 |
| | Bg | 27 | 33 | 6,8438 | 21,06 | 3,10 | 1 |
| | B/C | 33 + | | 8,1523 | 24,44 | 3,00 | 0 |
| 5 Klíny | L | 0 | 1 | 1,1049 | 0,83 | 0,73 | |
| | F | 1 | 4 | 3,0481 | 21,17 | 6,94 | 3 |
| | A | 4 + | | 6,5750 | 4,94 | 0,75 | |
| 6 Nová Ves | L + F1 | 0 | 1 | 1,4386 | 8,61 | 5,95 | |
| | F2 | 1 | 3 | 2,5910 | 25,39 | 9,81 | 3 |
| | H | 3 | 7 | 3,2388 | 38,28 | 11,90 | 1 |
| | Ahe | 7 | 16 | 5,0812 | 8,17 | 1,61 | |
| | B | 16 | 40 | 5,6323 | 8,56 | 1,52 | |
| | B/C | 40 + | | 6,6016 | 6,33 | 0,96 | |
| 7 Rudolice | L + F + H | 0 | 2 | 1,5692 | 11,78 | 7,13 | |
| | Ah + H | 2 | 6 | 2,7298 | 61,00 | 22,34 | 3 |
| | Ahe | 6 | 20 | 5,7976 | 2,00 | 0,35 | |
| | Ae | 20 | 30 | 6,2557 | 2,44 | 0,39 | |
| | Bs | 30 | 45 | 5,0332 | 5,00 | 0,99 | |
| | B/C | 45 + | | 5,8525 | 5,78 | 0,99 | |
| 8 Kálek | L | 0 | 2 | 1,1290 | 0,67 | 0,59 | |
| | F | 2 | 5 | 1,3817 | 8,50 | 6,11 | |
| | H | 5 | 12 | 2,2273 | 44,39 | 19,93 | 3 |
| | A1 | 12 + | | 4,9180 | 2,83 | 0,58 | |
| 9 Načetín | L | 0 | 1 | 1,0306 | 0,39 | 0,37 | |
| | F | 1 | 4 | 1,9481 | 28,28 | 14,51 | 0 |
| | H | 4 | 7 | 2,9767 | 30,50 | 10,22 | 3 |
| | Ah | 7 | 14 | 5,3530 | 6,61 | 1,24 | |
| | A1 | 14 + | | 6,0590 | 4,56 | 0,75 | |
| 10 Sv. Šebestián | L | 0 | 3 | 1,0875 | 0,61 | 0,56 | |
| | F | 3 | 5 | 1,4824 | 14,56 | 29,40 | |
| | H | 5 | 12 | 1,9896 | 36,94 | 18,57 | 4 |
| | Ah | 12 + | | 4,7576 | 0,44 | 0,09 | |

| | | | | | | | |
|----------------------|--------|------|------|--------|--------|-------|---|
| 11 Skelný Vrch | L | 1 | 2 | 1,1606 | 0,28 | 0,23 | |
| | F | 2 | 3 | 1,4202 | 12,67 | 8,89 | |
| | H | 3 | 7 | 2,3040 | 45,28 | 19,66 | 0 |
| | Ah | 7 | 9 | 3,9065 | 9,28 | 2,37 | |
| | Ae | 9 | 23 | 4,9213 | 2,56 | 0,52 | |
| | Bhs | 23 | 50 | 4,9273 | 5,72 | 1,16 | |
| | B/C | 50 | 60 | 6,2752 | 5,61 | 0,90 | |
| | Cm | 60 + | | 7,2027 | 4,5 | 0,62 | |
| 12 Přísečnice | L | 0 | 1 | 1,2372 | 2,00 | 1,61 | |
| | F | 1 | 3 | 1,2889 | 14,61 | 11,33 | |
| | H | 3 | 10 | 1,9270 | 29,61 | 15,37 | 5 |
| | Ahe | 10 | 19 | 6,2722 | 1,61 | 0,26 | |
| | Bh | 19 | 30 | 4,6609 | 8,67 | 1,86 | |
| | Bs | 30 | 42 | 5,0157 | 6,00 | 1,2 | |
| | B/C | 42 + | | 5,5157 | 5,39 | 0,98 | |
| 13 Výsluní | L + F1 | 0 | 1 | 1,4111 | 1,11 | 0,81 | |
| | F2 + H | 1 | 3 | 2,4956 | 7,28 | 2,92 | |
| | Ap1 | 3 | 24 | 2,7327 | 15,06 | 5,58 | 3 |
| | Ap2 | 24 | 40 | 5,5439 | 8,94 | 1,61 | |
| | B | 40 + | | 7,5783 | 6,78 | 0,89 | |
| 14 Kovářská | L + F1 | 0 | 1 | 0,9832 | 0 | 0 | |
| | F2 | 1 | 5 | 1,3163 | 6,67 | 5,06 | |
| | H | 5 | 10 | 3,5968 | 44,61 | 12,41 | 2 |
| | Ahe | 10 | 21 | 3,6050 | 56,56 | 15,67 | 4 |
| | B | 21 | 70 | 4,7128 | 9,11 | 1,93 | |
| | B/C | 70 + | | 5,4773 | 7,94 | 1,45 | |
| 15 Malý Špičák | L + F1 | 0 | 2 | 1,1049 | 1,39 | 1,12 | |
| | F2 + H | 2 | 6 | 1,2812 | 13,06 | 10,26 | |
| | Ah | 6 | 20 | 4,0233 | 20,06 | 4,99 | 2 |
| | C/B | 20 | 40 | 4,9979 | 29,89 | 5,98 | 2 |
| 16 Loučná | L + F1 | 0 | 1 | 1,1213 | 1,72 | 1,52 | |
| | F2 | 1 | 2 | 1,3939 | 10,94 | 7,88 | |
| | H | 2 | 5,5 | 2,7340 | 53,44 | 19,64 | 3 |
| | A | 5,5 | 12 | 3,4524 | 90,83 | 26,33 | 0 |
| | Bn | 12 | 21 | 3,5808 | 88,33 | 24,67 | 1 |
| | B | 21 | 31 | 4,1409 | 115,72 | 27,98 | 0 |
| | B/C | 31 + | | 4,1591 | 137,33 | 33,00 | 1 |
| 17 Klínovec | L + F1 | 0 | 1 | 1,3345 | 13,17 | 9,54 | |
| | F2 | 1 | 4 | 1,7289 | 25,28 | 14,61 | 3 |
| | Hn | 4 | 15 | 2,5842 | 22,83 | 8,84 | 6 |
| | A | 15 | 16 | 3,8309 | 0,94 | 0,25 | |
| | B/C | 16 + | | 6,5302 | 3,89 | 0,60 | |
| 18 Přebuz | L + F1 | 0 | 1,5 | 1,1012 | 0,67 | 0,60 | |
| | F2 | 1,5 | 5 | 1,3422 | 0,94 | 0,70 | |
| | H | 5 | 15 | 2,6425 | 15,17 | 5,75 | 4 |
| | Ae | 15 | 17,5 | 4,3649 | 5,39 | 1,23 | |
| | B1 | 17,5 | 30 | 6,7194 | 5,00 | 0,74 | |
| | Bs | 30 | 42 | 6,3660 | 6,50 | 1,02 | |
| | B/C | 42 + | | 7,1856 | 8,17 | 1,14 | |
| 19 Studeneč | L + F1 | 0 | 1 | 1,2341 | 0,28 | 0,23 | |
| | F2 | 1 | 5 | 1,5059 | 9,39 | 6,24 | |
| | H | 5 | 8 | 2,2237 | 32,89 | 14,79 | 7 |
| | A | 8 | 9 | 4,8937 | 10,00 | 2,04 | |
| | B1 | 9 | 40 | 6,3250 | 19,94 | 3,15 | |
| | B2 | 40 | 65 | 6,3268 | 8,39 | 1,33 | |

Příloha 2: Výsledky chemických analýz


| Lokalita | půdní horizont | Hloubka (cm) | | Cd mg/kg | Co mg/kg | Cr mg/kg | Cu mg/kg | Fe g/kg | Mn g/kg | Pb mg/kg | Zn mg/kg | pH/H ₂ O | pH/KCl |
|----------|----------------|--------------|----|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|---------------------|--------|
| | | od | do | | | | | | | | | | |
| 1 | L + F1 | 0 | 2 | 0,25 | 1,17 | 4,60 | 6,70 | 3,75 | 0,26 | 32,10 | 70,80 | 4,5 | 4,2 |
| | Fh | 2 | 6 | 0,81 | 3,96 | 13,50 | 9,10 | 7,55 | 0,41 | 51,00 | 82,30 | 4,6 | 4,2 |
| | H1 | 6 | 13 | 1,36 | 7,20 | 14,60 | 19,30 | 13,73 | 0,61 | 70,80 | 107,00 | 4,6 | 4,2 |
| | H2 | 13 | 21 | 0,03 | 0,41 | 9,20 | 0,60 | 4,18 | 0,05 | 30,00 | 25,50 | 4,4 | 4,1 |
| | Ah | 21 + | | 0,13 | 1,04 | 23,50 | 9,30 | 42,77 | 0,91 | 57,80 | 89,90 | 4,3 | 3,9 |
| 2 | L + F1 | 0 | 2 | 0,40 | 1,57 | 3,50 | 11,40 | 1,92 | 0,34 | 19,10 | 69,50 | 5,1 | 4,8 |
| | F2 + H | 2 | 4 | 1,30 | 5,46 | 20,70 | 24,50 | 17,01 | 0,38 | 69,20 | 172,00 | 4,5 | 4,1 |
| | T1 | 4 | 32 | 0,02 | 0,66 | 8,30 | 3,20 | 10,78 | 0,06 | 39,70 | 36,70 | 3,6 | 3,2 |
| | T2 | 32 | 50 | 0,13 | 0,45 | 7,90 | 2,60 | 6,37 | 0,05 | 43,00 | 38,40 | 3,8 | 3,3 |
| | G | 50 + | | 0,11 | 0,58 | 14,00 | 3,20 | 29,46 | 0,17 | 56,60 | 58,70 | 4,2 | 3,7 |
| 3 | L + F1 | 0 | 6 | 0,91 | 4,44 | 6,50 | 8,50 | 7,99 | 2,00 | 20,70 | 76,10 | 5,4 | 5,0 |
| | Fem | 6 | 9 | 1,18 | 14,05 | 10,80 | 11,30 | 9,94 | 2,13 | 29,40 | 86,50 | 5,2 | 4,8 |
| | Ah1 | 9 | 16 | 0,16 | 1,36 | 25,90 | 9,40 | 46,88 | 0,85 | 27,20 | 95,40 | 5,0 | 3,7 |
| | B | 16 | 31 | 0,13 | 1,61 | 24,00 | 8,40 | 39,83 | 0,95 | 19,60 | 77,50 | 5,1 | 3,9 |
| | B/C | 31 + | | 0,31 | 1,49 | 7,70 | 4,10 | 3,89 | 0,08 | 118,50 | 40,90 | 5,2 | 4,2 |
| 4 | L + F1 | 0 | 1 | 0,54 | 1,52 | 3,50 | 8,30 | 2,51 | 0,38 | 20,50 | 49,90 | 4,0 | 3,4 |
| | F2 + H | 1 | 2 | 0,61 | 1,24 | 7,40 | 9,20 | 7,38 | 0,19 | 31,80 | 43,50 | 3,7 | 3,1 |
| | Ah | 3 | 17 | 0,15 | 0,53 | 15,60 | 2,20 | 30,65 | 0,27 | 41,60 | 58,20 | 4,1 | 3,6 |
| | Ap | 17 | 24 | 0,10 | 0,64 | 18,00 | 6,00 | 35,50 | 0,26 | 33,50 | 67,40 | 4,6 | 4,2 |
| | B | 24 | 27 | 0,09 | 0,55 | 20,00 | 7,70 | 33,96 | 0,21 | 28,60 | 53,40 | 4,8 | 4,4 |
| | Bg | 27 | 33 | 0,06 | 1,21 | 19,70 | 4,00 | 33,56 | 0,25 | 32,80 | 60,20 | 5,1 | 4,6 |
| | B/C | 33 + | | 0,06 | 3,11 | 18,70 | 6,90 | 35,64 | 0,15 | 61,90 | 47,20 | 5,2 | 4,6 |
| 6 | L + F1 | 0 | 1 | 0,14 | 0,61 | 1,90 | 7,20 | 1,41 | 0,53 | 17,40 | 40,40 | 4,8 | 4,8 |
| | F2 | 1 | 3 | 0,58 | 3,06 | 8,50 | 11,90 | 4,30 | 0,71 | 30,10 | 56,10 | 5,9 | 5,5 |
| | H | 3 | 7 | 0,19 | 4,86 | 18,00 | 15,70 | 21,05 | 0,22 | 92,10 | 62,50 | 4,9 | 4,2 |
| | Ahe | 7 | 16 | 0,06 | 0,72 | 24,00 | 6,90 | 39,33 | 0,27 | 37,70 | 53,20 | 4,0 | 3,4 |
| | B | 16 | 40 | 0,08 | 0,57 | 24,30 | 5,90 | 41,56 | 0,24 | 29,50 | 59,00 | 4,4 | 4,0 |
| | B/C | 40 + | | 0,12 | 0,56 | 17,00 | 2,20 | 29,65 | 0,15 | 95,20 | 40,10 | 4,6 | 4,2 |
| 7 | L + F + H | 0 | 2 | 0,21 | 5,87 | 17,80 | 11,60 | 21,43 | 0,23 | 26,40 | 61,30 | 4,3 | 3,6 |
| | Ah + H | 2 | 6 | 0,10 | 4,58 | 13,30 | 10,50 | 16,61 | 0,10 | 45,20 | 43,90 | 4,0 | 3,5 |
| | Ahe | 6 | 20 | 0,06 | 3,25 | 13,60 | 3,80 | 21,39 | 0,10 | 36,30 | 33,00 | 3,9 | 3,4 |
| | Ae | 20 | 30 | 0,06 | 2,70 | 12,40 | 1,10 | 19,87 | 0,06 | 25,70 | 28,90 | 4,1 | 3,5 |
| | Bs | 30 | 45 | 0,30 | 5,05 | 22,70 | 5,90 | 44,15 | 0,20 | 19,80 | 51,60 | 4,5 | 4,0 |
| | B/C | 45 + | | 0,15 | 6,67 | 18,50 | 4,70 | 38,65 | 0,22 | 13,50 | 72,70 | 4,8 | 4,2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|------|----|------|-------|-------|-------|-------|------|--------|--------|-----|-----|
| 8 | L | 0 | 2 | 0,18 | 1,18 | 24,61 | 7,12 | 22,27 | 0,06 | 65,40 | 31,50 | NA | |
| | F | 2 | 5 | 0,87 | 1,45 | 33,43 | 37,13 | 19,03 | 0,10 | 249,40 | 389,60 | | |
| | H | 5 | 12 | 0,70 | 0,73 | 12,68 | 10,93 | 8,07 | 0,27 | 52,10 | 63,20 | | |
| | A1 | 12 + | | 0,21 | 0,43 | 3,08 | 10,83 | 1,18 | 0,51 | 29,50 | 62,60 | | |
| 9 | L | 0 | 1 | 0,39 | 2,80 | 31,89 | 10,93 | 23,78 | 0,29 | 89,30 | 72,70 | NA | |
| | F | 1 | 4 | 0,16 | 2,48 | 20,50 | 12,03 | 22,75 | 0,21 | 95,80 | 56,90 | | |
| | H | 4 | 7 | 0,22 | 1,13 | 20,46 | 23,51 | 19,09 | 0,10 | 284,90 | 72,90 | | |
| | Ah | 7 | 14 | 0,33 | 1,19 | 33,32 | 23,95 | 19,34 | 0,22 | 154,00 | 91,80 | | |
| | A1 | 14 + | | 0,13 | 0,32 | 1,30 | 5,67 | 0,69 | 0,36 | 34,70 | 31,50 | | |
| 10 | L | 0 | 3 | 0,09 | 1,13 | 18,23 | 7,09 | 13,59 | 0,03 | 72,30 | 22,60 | NA | |
| | F | 3 | 5 | 1,63 | 1,01 | 19,97 | 30,85 | 20,57 | 0,08 | 174,40 | 91,50 | | |
| | H | 5 | 12 | 0,99 | 0,86 | 6,59 | 19,34 | 10,31 | 0,07 | 103,70 | 56,10 | | |
| | Ah | 12 + | | 0,26 | 0,75 | 2,57 | 10,63 | 3,29 | 0,16 | 43,40 | 53,80 | | |
| 11 | L | 1 | 2 | 0,12 | 0,37 | 2,00 | 4,40 | 0,81 | 0,17 | 7,70 | 42,20 | 4,7 | 4,3 |
| | F | 2 | 3 | 0,32 | 1,77 | 8,40 | 11,60 | 6,85 | 0,13 | 16,20 | 56,30 | 4,1 | 3,8 |
| | H | 3 | 7 | 0,22 | 3,11 | 20,70 | 5,90 | 17,34 | 0,05 | 113,60 | 53,70 | 3,5 | 2,8 |
| | Ah | 7 | 9 | 0,16 | 1,77 | 35,90 | 9,60 | 17,15 | 0,04 | 67,70 | 50,00 | 3,4 | 2,7 |
| | Ae | 9 | 23 | 0,17 | 3,79 | 39,90 | 2,00 | 38,39 | 0,06 | 73,50 | 61,30 | 3,6 | 2,9 |
| | Bhs | 23 | 50 | 0,18 | 7,43 | 59,50 | 15,00 | 49,54 | 0,25 | 30,50 | 120,20 | 4,2 | 4,0 |
| | B/C | 50 | 60 | 0,15 | 10,00 | 61,70 | 14,10 | 44,43 | 0,23 | 28,30 | 189,50 | 4,4 | 4,3 |
| | Cm | 60 + | | 0,20 | 10,66 | 64,60 | 27,40 | 46,17 | 0,21 | 23,90 | 199,10 | 4,4 | 4,4 |
| 12 | L | 0 | 1 | 0,17 | 0,43 | 1,40 | 5,10 | 0,82 | 0,32 | 10,10 | 51,90 | 4,8 | 4,6 |
| | F | 1 | 3 | 0,19 | 1,00 | 4,00 | 7,60 | 2,99 | 0,42 | 13,30 | 64,20 | 4,8 | 4,4 |
| | H | 3 | 10 | 0,37 | 2,83 | 17,10 | 18,20 | 15,66 | 0,04 | 153,20 | 67,50 | 3,5 | 2,9 |
| | Ahe | 10 | 19 | 0,06 | 2,66 | 13,40 | 8,70 | 13,75 | 0,03 | 24,40 | 45,10 | 3,7 | 3,2 |
| | Bh | 19 | 30 | 0,21 | 4,25 | 21,30 | 2,10 | 48,17 | 0,16 | 80,00 | 45,50 | 3,7 | 3,4 |
| | Bs | 30 | 42 | 0,24 | 5,56 | 21,30 | 8,80 | 44,10 | 0,35 | 34,90 | 59,80 | 4,1 | 3,8 |
| | B/C | 42 + | | 0,12 | 5,67 | 18,10 | 6,70 | 35,64 | 0,28 | 24,20 | 59,50 | 4,3 | 4,2 |
| 13 | L + F1 | 0 | 1 | 0,22 | 2,40 | 10,30 | 2,80 | 12,71 | 0,36 | 12,80 | 60,80 | 5,1 | 4,6 |
| | F2 + H | 1 | 3 | 0,19 | 4,85 | 29,60 | 9,00 | 31,75 | 0,38 | 24,20 | 76,10 | 5,0 | 4,6 |
| | Ap1 | 3 | 24 | 0,17 | 7,56 | 32,90 | 12,30 | 40,08 | 0,43 | 36,10 | 86,20 | 5,5 | 4,9 |
| | B | 40 + | | 0,04 | 8,40 | 26,30 | 11,10 | 39,41 | 0,30 | 21,10 | 64,30 | 5,3 | 4,5 |
| 14 | L + F1 | 0 | 1 | 0,13 | 0,84 | 3,60 | 4,60 | 2,84 | 0,23 | 16,20 | 50,80 | 3,8 | 3,4 |
| | F2 | 1 | 5 | 0,25 | 1,71 | 9,30 | 8,30 | 9,43 | 0,16 | 23,80 | 62,70 | 3,6 | 3,2 |
| | H | 5 | 10 | 0,27 | 3,18 | 26,40 | 12,50 | 26,70 | 0,14 | 81,00 | 62,10 | 3,4 | 2,9 |
| | Ahe | 10 | 21 | 0,13 | 3,72 | 41,20 | 2,00 | 42,78 | 0,17 | 73,50 | 66,60 | 3,6 | 3,2 |
| | B | 21 | 70 | 0,13 | 6,73 | 53,40 | 11,80 | 46,55 | 0,40 | 24,80 | 94,20 | 4,4 | 4,1 |
| | B/C | 70 + | | 0,17 | 8,43 | 52,60 | 12,50 | 43,40 | 0,35 | 24,40 | 119,30 | 4,4 | 4,3 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|------|-----|------|------|-------|-------|-------|------|--------|--------|-----|-----|
| 15 | L + F1 | 0 | 2 | 0,12 | 0,37 | 1,00 | 1,80 | 0,99 | 0,99 | 11,20 | 38,70 | 4,6 | 4,3 |
| | F2 + H | 2 | 6 | 0,30 | 2,99 | 16,80 | 14,70 | 21,67 | 0,50 | 55,70 | 79,80 | 4,1 | 3,7 |
| | Ah | 6 | 20 | 0,27 | 6,76 | 18,60 | 10,70 | 36,79 | 0,88 | 17,10 | 199,10 | 4,7 | 4,4 |
| | C/B | 20 | 40 | 0,39 | 5,18 | 15,30 | 9,60 | 36,85 | 1,82 | 47,80 | 248,80 | 4,5 | 4,2 |
| 16 | L + F1 | 0 | 1 | 0,09 | 0,54 | 0,90 | 7,80 | 1,34 | 0,21 | 23,70 | 36,70 | 4,4 | 4,0 |
| | F2 | 1 | 2 | 0,15 | 0,47 | 3,90 | 6,30 | 3,32 | 0,16 | 34,40 | 41,90 | 3,9 | 3,2 |
| | H | 2 | 5,5 | 0,42 | 0,77 | 12,20 | 26,80 | 22,04 | 0,13 | 107,40 | 65,80 | 3,7 | 3,1 |
| | A | 5,5 | 12 | 0,09 | 0,67 | 16,60 | 1,70 | 42,73 | 0,29 | 71,80 | 44,00 | 3,7 | 3,1 |
| | Bn | 12 | 21 | 0,09 | 1,17 | 16,40 | 2,50 | 46,94 | 0,39 | 34,00 | 68,40 | 3,9 | 3,4 |
| | B | 21 | 31 | 0,04 | 0,77 | 19,70 | 3,10 | 44,86 | 0,48 | 28,10 | 63,90 | 4,5 | 4,1 |
| | B/C | 31 + | | 0,06 | 0,91 | 14,50 | 0,80 | 16,23 | 0,09 | 68,10 | 18,60 | 4,7 | 4,3 |
| 17 | L + F1 | 0 | 1 | 0,10 | 0,38 | 5,80 | 4,80 | 0,71 | 0,53 | 24,90 | 44,80 | 4,8 | 4,4 |
| | F2 | 1 | 4 | 1,20 | 0,60 | 13,10 | 22,50 | 7,15 | 0,19 | 86,00 | 56,90 | 3,9 | 3,4 |
| | Hn | 4 | 15 | 0,07 | 0,32 | 1,30 | 3,80 | 1,10 | 0,18 | 17,90 | 38,10 | 3,7 | 3,3 |
| | A | 15 | 16 | 0,06 | 3,70 | 28,60 | 1,80 | 34,14 | 0,19 | 35,00 | 29,10 | 3,9 | 3,3 |
| | B/C | 16 + | | 0,07 | 1,46 | 7,30 | 0,30 | 7,30 | 0,08 | 49,80 | 21,90 | 4,2 | 3,6 |
| 18 | L + F1 | 0 | 1,5 | 0,10 | 0,29 | 1,10 | 5,10 | 1,24 | 0,08 | 18,30 | 33,40 | 3,8 | 3,4 |
| | F2 | 1,5 | 5 | 0,16 | 0,45 | 4,90 | 6,40 | 9,28 | 0,06 | 76,00 | 32,00 | 3,8 | 3,0 |
| | H | 5 | 15 | 0,09 | 0,29 | 1,90 | 4,10 | 1,39 | 0,67 | 25,70 | 49,20 | 3,5 | 2,9 |
| | Ae | 15 | 18 | 0,03 | 0,55 | 7,60 | 0,50 | 14,06 | 0,09 | 23,30 | 27,00 | 3,7 | 3,0 |
| | B1 | 18 | 30 | 0,02 | 0,71 | 13,10 | 1,00 | 36,92 | 0,16 | 39,50 | 42,50 | 4,0 | 3,3 |
| | Bs | 30 | 42 | 0,02 | 0,59 | 15,90 | 0,90 | 36,59 | 0,21 | 30,20 | 54,30 | 4,1 | 3,6 |
| | B/C | 42 + | | 0,01 | 0,57 | 24,30 | 7,10 | 27,38 | 0,08 | 44,60 | 29,90 | 4,4 | 4,2 |
| 19 | L + F1 | 0 | 1 | 0,14 | 0,47 | 13,90 | 7,10 | 8,29 | 0,12 | 49,60 | 34,00 | 4,5 | 4,2 |
| | F2 | 1 | 5 | 0,21 | 0,82 | 24,90 | 13,50 | 26,96 | 0,13 | 127,30 | 70,30 | 3,6 | 3,1 |
| | H | 5 | 8 | 0,24 | 0,48 | 6,70 | 7,90 | 10,06 | 0,15 | 55,10 | 52,30 | 3,6 | 3,1 |
| | A | 8 | 9 | 0,01 | 0,71 | 30,50 | 9,80 | 34,71 | 0,15 | 39,70 | 40,00 | 3,6 | 2,9 |
| | B1 | 9 | 40 | 0,01 | 0,54 | 29,50 | 1,30 | 30,33 | 0,12 | 32,60 | 29,00 | 4,4 | 4,0 |

Limitní koncentrace prvků dle mezinárodního programu ICP Forests

| Prvek | ICP Forests (mg/kg) |
|---------|---------------------|
| Kadmium | 3,5 |
| Měď | 20,0 |
| Olovo | 150,0 |
| Zinek | 300,0 |

 Koncentrace prvku překračuje doporučený limit dle IPC Forests

NA – nebyly provedeny analýzy

