

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**  
**ÚSTAV HYDROGEOLOGIE, INŽENÝRSKÉ GEOLOGIE A UŽITÉ GEOFYZIKY**

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Alžběta Zárubová

Měření magnetických vlastností environmentálních vzorků  
Measuring magnetic properties of environmental samples

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí bakalářské práce RNDr. Eduard Petrovský, CSc.

Praha 2013

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

V Praze dne 22.července 2013

Alžběta Zárubová

Na úvod bych ráda poděkovala všem, kteří mi věnovali svou radu a čas při psaní této práce, především svému vedoucímu RNDr. Eduardu Petrovskému, CSc.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ABSTRAKT .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>ENGLISH ABSTRACT .....</b>                                     | <b>2</b>  |
| <b>1. Úvod .....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1. <i>Základy magnetické klasifikace látek .....</i>            | 3         |
| 1.2. <i>Magneticky významné minerály.....</i>                     | 5         |
| 1.3. <i>Měření magnetických vlastností minerálů a hornin.....</i> | 6         |
| 1.3.1.    Složení.....  | 6         |
| 1.3.2.    Koncentrace.....  | 7         |
| 1.3.3.    Velikost zrn .....                                      | 8         |
| <b>2. Environmentální magnetismus .....</b>                       | <b>8</b>  |
| 2.1. <i>Magnetické vlastnosti půd .....</i>                       | 10        |
| 2.2. <i>Magnetické vlastnosti sedimentů.....</i>                  | 16        |
| 2.3. <i>Znečištění atmosféry .....</i>                            | 22        |
| <b>3. Příklad měření magnetických vlastností půd .....</b>        | <b>26</b> |
| <b>4. Závěr .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>Literatura .....</b>   | <b>29</b> |

## **ABSTRAKT**

Práce ve stručné formě představuje základy a možnosti využití magnetických měření v environmentálních studiích. Podstatou environmentálního magnetismu je určení oxidů železa, jejich složení, koncentraci a velikost částic. Tyto informace lze pak následně interpretovat ve smyslu jejich původu, případně transportu či diagenese. Výsledkem pak může být informace například o klimatických změnách v dávné minulosti, krátkodobých událostech ovlivňujících životní prostředí (např. sopečné erupce), nebo o současných problémech spojených s lidskou činností (znečištění životního prostředí). V posledním případě není cílem nahradit geochemické analýzy, hlavní snahou je poskytnout rychlou a snadno dostupnou dodatečnou informaci, která umožní například co nejefektivněji zmapovat kontaminované území, monitorovat vývoj znečištění nebo modelovat procesy přenosu kontaminantů. Magnetometrie se v současnosti intenzivně využívá k mapování znečištění atmosféry, půd i sedimentů, lze pomocí ní určit dlouhodobý průměr kontaminace, jednotlivé zdroje i poměry jejich příspěvků k celkovému stavu znečištění.

Tato práce poskytuje stručný přehled o fyzikálních základech environmentálního magnetismu a příklady aplikací v různých oblastech, od klimatických změn po znečištění atmosféry. Na závěr je uveden příklad měření magnetických vlastností zemědělských půd, které jsem realizovala v Geofyzikálním ústavu AVČR, v.v.i., v Praze.

**Klíčová slova:** magnetit, půdy, atmosférický prach, znečištění, magnetická susceptibilita, hysterezní smyčka

## **ENGLISH ABSTRACT**

This bachelor's thesis presents briefly principles and examples of applications of magnetic measurements in environmental studies. Environmental magnetism is based on determination of iron oxides, their content, concentration and grain size. This information can be interpreted in terms of particle origin, transport or diagenesis. The results can provide information on, e.g., climatic changes in the past, short-term events influencing our environment (e.g., volcanic eruptions) or about contemporary problems associated with human activity (environmental pollution). In the last case, environmental magnetism does not intend to replace geochemical methods, but the main aim is to provide fast and easily available additional information, which helps us to be more effective in mapping contaminated areas, monitoring progression of pollution or modeling transport processes of contaminants. Magnetometry is currently intensively used for mapping contamination of atmosphere, soils and sediments; it can be used in defining long-term levels of contamination, individual pollution sources and their contribution to the overall pollution.

This thesis provides a brief overview of the physical basics of environmental magnetism and examples of its application in different fields, from climatic changes through contamination of atmosphere. Moreover, an example of measuring magnetic properties of agricultural soils, which I realized in the Geophysical Institute ASCR in Prague, is shown.

**Keywords:** magnetite, soils, atmospheric dust, pollution, magnetic susceptibility, hysteresis loop

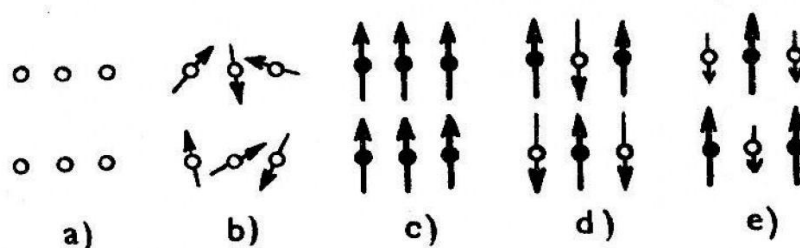
## 1. Úvod

### 1.1. Základy magnetické klasifikace látek

Magnetické vlastnosti látek závisí zejména na uspořádání elektronů ve struktuře atomového obalu. Elektrony jsou elementární elektricky nabitě částice a svým pohybem kolem jádra atomu vytvářejí magnetické pole – magnetický moment elektronu. Magnetický moment atomu je pak dán vektorovým součtem magnetických momentů všech elektronů v daném atomu. Vnější magnetické pole působí na dráhu pohybu jednotlivých elektronů a také na magnetické momenty atomů – stáčí atomární magnetické momenty do svého směru, čímž dochází k magnetování látky. Parametr určující charakter a intenzitu magnetování objemové jednotky látky se nazývá magnetická susceptibilita. Je definována jako poměr magnetisace jednotkového objemu  $M$  a intenzity působícího magnetického pole  $H$  a značíme ji  $\kappa = M/H$ . Protože obě veličiny  $M$  a  $H$  jsou v SI soustavě měřeny v A/m, je objemová susceptibilita bezrozměrná. Ekvivalentem je susceptibilita hmotnostní,  $\chi = \kappa/\rho$ , kde  $\rho$  je hustota v  $\text{kg/m}^3$  a  $\chi$  tedy dostáváme v  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Látky dělíme podle jejich odezvy na vnější magnetické pole na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické (*Gruntorád et al., 1985*).

Látky diamagnetické (Obr. 1) se navenek jeví nemagneticky, tj. nemají permanentní magnetický moment (atomární magnetické momenty jsou nulové), jejich susceptibilita je záporná a není závislá na teplotě. Podstatou diamagnetismu je deformace orbitů elektronů v důsledku precesního pohybu osy orbitu kolem směru působícího magnetického pole. To má za následek slabý indukovaný magnetický moment (magnetisaci materiálu) ve směru opačném než je směr vnějšího působícího pole. Diamagnetismus je vlastnost, kterou se projevuje každý materiál, tento jev je ale velmi nepatrný, je zhruba stokrát menší než paramagnetismus a stotisíckrát menší než feromagnetismus. Typickými diamagnetickými látkami jsou křemen, kalcit, voda, grafit, halit, sádrovec, zlato, rtuť, měď, inertní plyny atd.

Látky paramagnetické (Obr. 1) se skládají z atomů s nenulovými magnetickými momenty, které jsou v důsledku tepelných vibrací za pokojové teploty orientovány chaoticky a jejich vektorový součet je nulový. Ve vnějším magnetickém poli se orientují do jeho směru a materiál se postupně magnetuje. Magnetická susceptibilita je inverzně



**Obr. 1:** Uspořádání atomárních magnetických momentů: a) diamagnetické, b) paramagnetické, c) feromagnetické, d) antiferomagnetické, e) ferrimagnetické (*Gruntorád et al., 1985*).

závislá na teplotě. S klesající intenzitou magnetického pole klesá také magnetisace vzorku, tento proces je vratný. Při nulovém magnetickém poli je magnetisace vzorku opět nulová. Typickými paramagnetickými geomateriály jsou pyrit, wolframit, muskovit, biotit, chromit, amfibol, siderit, pyroxen atd.

Látky feromagnetické (Obr. 1) jsou charakterizovány spontánním paralelním uspořádáním atomárních magnetických momentů v určitém objemu. Mají velmi vysokou magnetickou susceptibilitu, která je inverzně závislá na teplotě. Atomární magnetické momenty se pod vlivem externího magnetického pole orientují do jeho směru, při relativně slabém vnějším poli pak dochází k magnetickému nasycení, kdy jsou všechny atomární magnetické momenty orientovány paralelně s vnějším magnetickým polem. Při poklesu intenzity vnějšího pole klesá také magnetisace látky, tento proces je ale ireversibilní a křivka magnetisace v závislosti na vnějším poli vykazuje tvar hysterezní smyčky. Při nulovém magnetickém poli zbývá po předchozím zmagnetování ve vzorku zbytková, tzv. remanentní magnetisace. I minimální obsah feromagnetik způsobí vysokou magnetickou susceptibilitu. Zvyšující se teplota působí proti silám, které způsobují spontánní paralelní orientaci atomárních magnetických momentů. Hraniční teplota, při které toto spontánní uspořádání mizí, se nazývá teplota Curieova přechodu. V rámci feromagnetismu rozlišujeme podle uspořádání atomárních magnetických momentů tři typy materiálů: feromagnetika, antiferomagnetika a ferrimagnetika (*Evans and Heller, 2003*).

Mezi ferrimagnetické látky patří především oxidy a sulfidy železa, například magnetit, titanomagnetit, maghemit, pyrrhotin atd. Typickým představitelem antiferomagnetik je hematit. Mezi přírodními minerály nejsou známa feromagnetika.

## 1.2. Magneticky významné minerály

Přestože všechny látky vykazují magnetické chování, v environmentálním magnetismu se využívá zejména ferrimagnetik, která jsou detekovatelná i v minimální koncentraci. Především se jedná o oxidy a sulfidy železa. Oxidy železa se dostávají do prostředí z mnoha zdrojů, například zvětráváním hornin, z popela vulkanických erupcí, antropogenní činností (například spalováním fosilních paliv), bakteriální produkcí atd.

Magnetit,  $\text{FeOFe}_2\text{O}_3$ , se vyskytuje primárně v magmatických horninách, jejich zvětráním a následným transportem se dostává do sedimentů a metamorfítů. Je ferrimagnetický a krystalizuje v kubické soustavě se spinelovou strukturou, v mřížce má osm tetraedrických poloh vyplněných kationty  $\text{Fe}^{3+}$  a šestnáct oktaedrických, z nichž polovina obsahuje  $\text{Fe}^{3+}$  a zbytek  $\text{Fe}^{2+}$ . Jeho spontánní magnetisace je 480 kA/m, což z něho dělá nejvíce magnetický přírodně se vyskytující minerál, nad Curieovou teplotou 580°C se stává paramagnetickým. Uspořádání magnetických momentů není možné ve velkých objemech; souhlasně uspořádané momenty tvoří domény. V závislosti na velikosti částic existuje magnetit superparamagnetický (SP), jednodoménový (singledomain, SD), pseudo-jednodoménový (pseudo-singledomain, PSD) nebo vícedoménový (multidomain, MD). Za přítomnosti Ti tvoří přes titanomagnetit plynulou izomorfní řadu magnetit–ulvöspinel (*Evans and Heller, 2003*).

Hematit,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , je rozšířený v horninách i v půdách. Krystalizuje v hexagonální soustavě a roviny s kationty železa jsou magnetisovány téměř v opačném směru; nepatrný odklon od antiparalelního uspořádání magnetických momentů mění hematit z antiferomagnetického na slabě feromagnetický minerál. Jeho spontánní magnetisace je zhruba 2,8 kA/m a díky vyšší teplotě Curieova přechodu (Néelově teplotě, 675°C) je teplotně stabilnější než magnetit i přesto, že je magneticky zhruba 200krát slabší. V jeho mřížce může opět Ti substituovat Fe a tvořit tak řadu hematit–ilmenit, jejímž přechodným členem je titanohematit.

Maghemit,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , se hojně vyskytuje v horninách a půdách, a proto je velmi významný pro environmentální studie. Je ferrimagnetický, jeho složení je totožné s hematitem, ale má jinou krystalovou strukturu a tedy i jiné magnetické vlastnosti. Krystalizuje v kubické soustavě a je v podstatě plně oxidovanou formou magnetitu s vakantními pozicemi; takzvaný deficit kationtů má za následek pokles spontánní magnetisace na 380 kA/m oproti 480 kA/m u magnetitu. Přibližná Curieova teplota je u

maghemitu kolem 645°C, přesná  $T_C$  je ale těžko určitelná, protože minerál je metastabilní a za vyšších teplot přechází nevratně v hematit. Tento proces byl zaznamenán za teplot v rozmezí od 250°C do 900°C a závisí na velikosti zrna a přítomnosti nečistot (Evans and Heller, 2003).

Z hydroxidů železa jsou důležitými zástupci goethite ( $\alpha$ -FeOOH), ferrihydrit ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) a lepidokrokit ( $\gamma$ -Fe<sup>3+</sup>O(OH)), ze sulfidů pak pyrrhotin ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ , kde  $x=0-0,17$ ) a pyrit ( $\text{FeS}_2$ ), který je velmi běžný, ale pouze paramagnetický.

Pyrrhotin je běžnou vedlejší složkou hornin magmatických, metamorfních i sedimentárních, a také ložisek rud. Je polymorfní a jeho nejběžnějšími formami jsou  $\text{Fe}_7\text{S}_8$  a  $\text{Fe}_9\text{S}_{10}$ , z nichž první krystalizuje v monoklinické soustavě a jde o ferrimagnetikum, a druhá je hexagonální a antiferomagnetická. Často se vyskytují společně, takže výsledné magnetické vlastnosti vzorku mohou být velmi variabilní.

### 1.3. Měření magnetických vlastností minerálů a hornin

Magnetické vlastnosti látek nám poskytují informaci o obsahu magneticky významných minerálů ve vzorku, jmenovitě o jejich složení, koncentraci, zrnitosti a původu. Všechny tyto údaje jsou zjistitelné pomocí měření několika veličin.

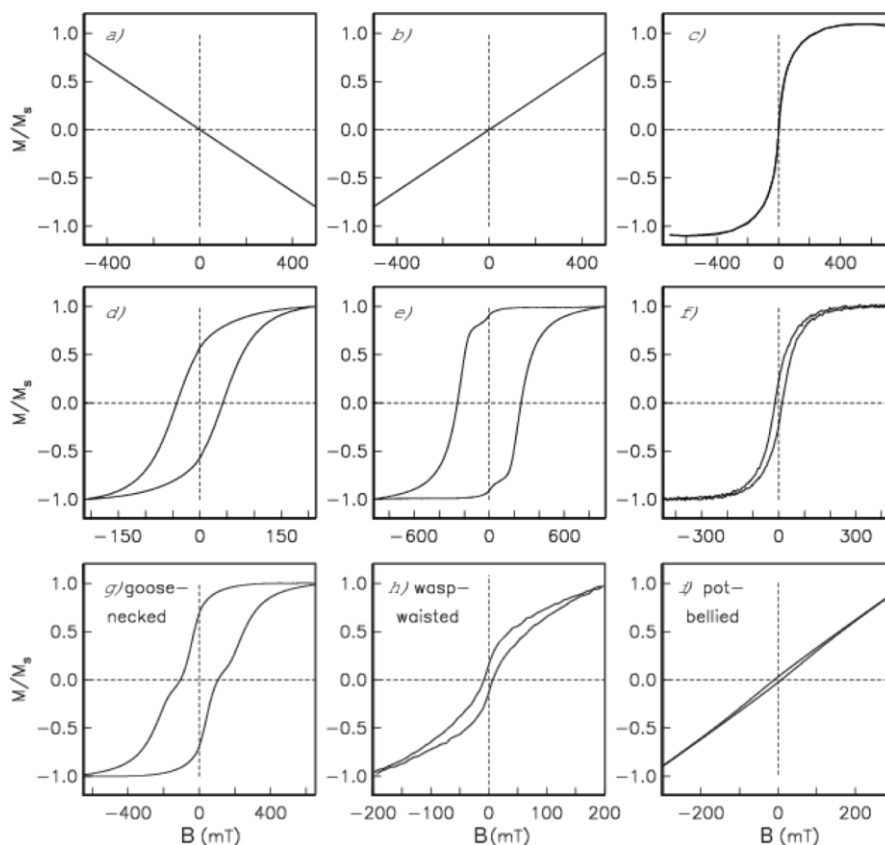
#### 1.3.1. Složení

Základním parametrem k určení složení je magnetická susceptibilita. S její pomocí dokážeme určit, zda vzorek obsahuje ferrimagnetika či nikoliv. Vysoká susceptibilita ukazuje jednoznačně na obsah magnetitu (případně maghemitu), protože i minimální podíl těchto minerálů ve vzorku dominantně ovlivňuje naměřené hodnoty. Susceptibilitu měříme za nízkých i vysokých frekvencí pole a dle toho ji značíme  $\chi_{lf}$  (low-frequency) a  $\chi_{hf}$  (high-frequency), odečtením  $\chi_{hf}$  od  $\chi_{lf}$  získáme představu o podílu ultrajemných superparamagnetických částic (SP), které za vysokých frekvencí magnetického pole nepřispívají k magnetisaci vzorku. Laboratorní a terénní přístroje pro měření magnetické susceptibility pracují s malou amplitudou střídavého magnetického pole. Proto je tato susceptibilita kontrolována především ferrimagnetiky. Pro odhad přítomnosti paramagnetik se používá susceptibilita za vysokého pole. Tu lze získat například z měření hysterezní smyčky jako sklon lineární části po nasycení ferrimagnetické složky (Evans and Heller, 2003).

Pro stanovení relativního obsahu minerálů s různou koercivitou se měří S-Ratio, který je definován jako podíl remanence k nasycené remanenci po aplikaci určitého stejnosměrného pole ve směru opačném než nasycená remanence. Jde o poměr vysoké (high-coercivity, „hard“) a nízké (low-coercivity, „soft“) koercivity remanence. Tento parametr poskytuje dobrý odhad poměru antiferomagnetik a ferrimagnetik (například hematit vs. magnetit).

### 1.3.2. Koncentrace

Hysterezní smyčka (Obr. 2) vykresluje vztah intenzity pole a magnetisace, při zvyšování intenzit pole ( $H$ ) dojde k nasycení magnetisace ( $M_s$ ), následně pole snižujeme a křivka klesá až k bodu remanentní magnetisace vzorku ( $M_{rs}$ ), poté aplikujeme pole



**Obr. 2:** Možné tvary závislosti magnetisace na vnějším poli; v závislosti na typu magnetických částic: a) diamagnetické, b) paramagnetické, c) superparamagnetické (submarinní basaltická skla), d) jednoosé, jednodoménové (SD), e) jednodoménové s vysokou magnetokrystalickou anizotropií (SD), f) pseudosingledomain (PSD); chování různých směsí: g) magnetit a hematit, h) SD/SD magnetit, i) SD/SP magnetit s jemnějšími SP částicemi ([http://magician.ucsd.edu/Essentials\\_2/WebBook2ch8.html](http://magician.ucsd.edu/Essentials_2/WebBook2ch8.html) - překresleno podle Tauxe et al., 1996).

v opačném směru. Hysterezní smyčka se řídí složením, koncentrací a velikostí zrn. Nasyčená magnetisace ( $M_s$ ) je závislá pouze na koncentraci.

Také SIRM (Saturation isothermal remanent magnetisation) je především funkcí koncentrace ferrimagnetických minerálů a následně zrnitosti, jde o nasycení remanentní magnetisace za teplot okolního prostředí.

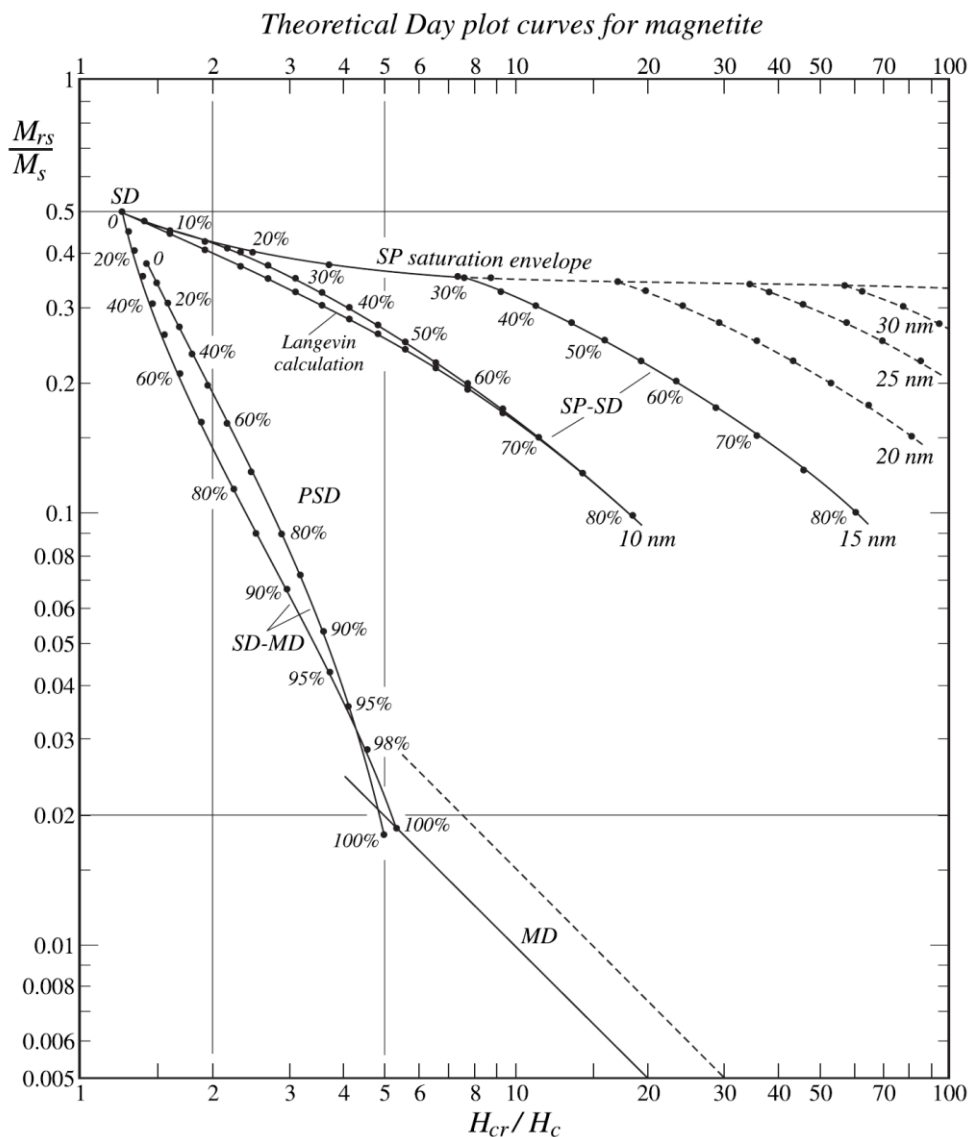
### 1.3.3. Velikost zrn

ARM (Anhysteretic remanent magnetisation,  $\chi_{ARM}$ ) susceptibilita vypovídá o zrnitosti magnetických částic, přednostně reaguje na SD částice, protože ty nabývají vyšší remanence než vícedoménové. Je-li dominantním magnetickým minerálem vzorku magnetit, bezrozměrný vztah  $\chi_{ARM}/\chi_{lf}$  je prostředkem k odhadu velikosti zrna (*King et al., 1982*). Poněvadž oba parametry lineárně narůstají s rostoucí koncentrací magnetitu a menší částice snáze nabývají remanenci, projevují se tyto částice v grafu větším sklonem přímky. Tento graf se nazývá Kingův diagram (*King plot*). Stejně tak poměr ARM/SIRM určuje velikost zrn magnetitu, vzorek obsahující vysoký podíl SD-PSD částic (zrna menší než 1  $\mu\text{m}$ ) se projeví vyšší hodnotou ARM/SIRM. Také poměr SIRM/ $\chi_{lf}$  se pro menší částice projevuje vysokou hodnotou, protože SIRM závisí na velikosti zrna, zatímco  $\chi_{lf}$  je na velikosti zrna nezávislá. SIRM/ $\chi_{lf}$  se rovněž používá k určení přítomnosti greigitu ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ).

V takzvaném Day diagramu (*Day plot; Day et al., 1977*) (Obr. 3) vykresluje zároveň poměry  $M_{rs}/M_s$  (saturovaná remanentní magnetisace / saturovaná magnetisace) a  $H_{cr}/H_c$  (resp.  $B_{cr}/B_c$ , koercivita remanence / koercitivní síla). Diagram vymezuje obdélníkovou oblast SD chování částic, pro které platí hodnoty  $M_{rs}/M_s \geq 0.5$  a  $B_{cr}/B_c \leq 1.5$ , MD oblast odpovídá  $M_{rs}/M_s \leq 0.05$  a  $B_{cr}/B_c \geq 4.0$  a PSD oblast je zbývající část sevřená mezi SD a MD. Day diagram velmi často chybně stanovuje SP částice nebo je zcela opomíjí. Proto Dunlop v roce 2002 navrhl upravení hraničních hodnot oblastí a nově vymezil také oblast SP částic.

## 2. Environmentální magnetismus

Magnetické vlastnosti vzorku nám podávají důležité informace o jeho původu a procesech jeho vzniku. Mohou vypovídat například o nárůstu či poklesu přínosu magnetického materiálu do oblasti, jakožto indikátoru klimatických změn, o biologické



**Obr. 3:** Day diagram pro magnetit s vyznačenými oblastmi chování magnetických částic: SD - singledomain, PSD –pseudosingledomain, MD – multidomain (Dunlop, 2002).

aktivitě, o znečištění a proudění podzemních fluid. O původu částic a jejich vývoji vypovídá také dominantní velikost zrn, jež je odrazem procesů formace a diagenese. Magmatity nabývají termoremanentní magnetisaci (Thermoremanent magnetisation, TRM) a sedimenty depoziční (Depositional remanent magnetisation), jež nesou informaci o intenzitě a směru magnetického pole v době jejich vzniku (Evans and Heller, 2003).

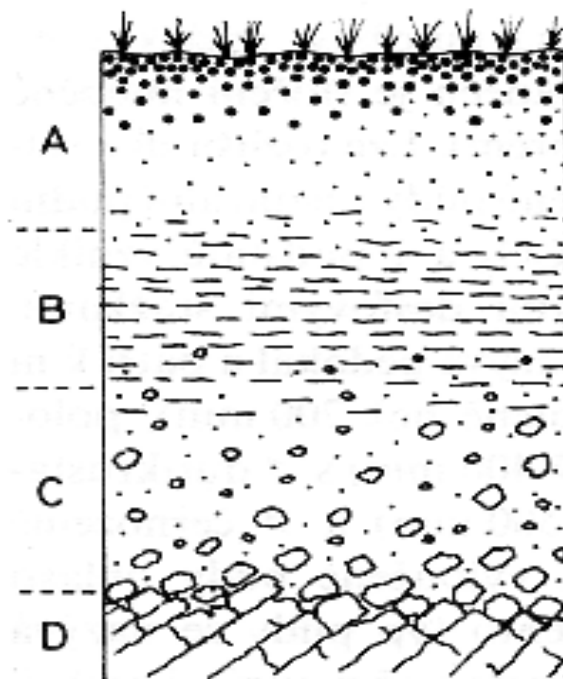
Zásadní význam má detailní studium průmyslového znečištění, jež je hlavní environmentální hrozbou s vážnými následky. Environmentální magnetismus se v

posledních letech stává významnou metodou ke studiu znečištění, jeho hlavní výhodou je časová a finanční nenáročnost, proto se využívá jako primární ukazatel rozložení znečištění ve velkých měřítkách a k následnému vymezení oblastí vhodných k dalšímu geochemickému výzkumu, jehož metody jsou výrazně dražší.

## 2.1. Magnetické vlastnosti půd

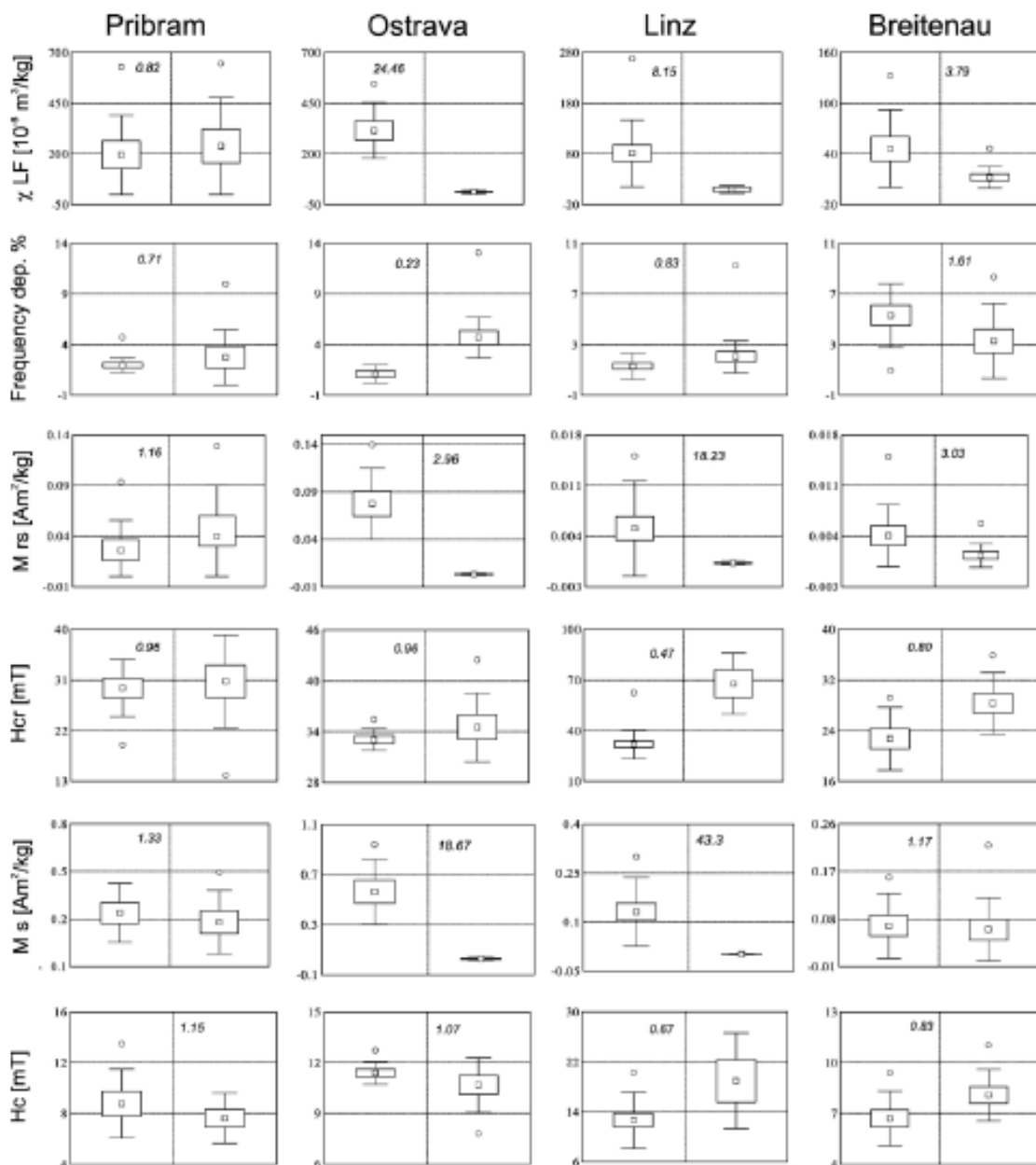
Půda je definována jako povrchová část litosféry, která vzniká pedogenními procesy. Jde o vertikálně i horizontálně strukturované přírodní těleso (komplex kapalné, plynné a pevné fáze), ve kterém probíhá neustálá cirkulace životně důležitých látek a energie, což ústí v hospodářský potenciál a její nepostradatelnost. Je důležité mapovat stav půd v různých environmentálních podmínkách, zjišťovat vliv lidské činnosti a možnosti prevence půd před znečištěním. Půdy jsou klasifikovány na základě geografického, genetického nebo morfologicky/analytického přístupu (v ČR se užívá Taxonomický klasifikační systém půd, (Němeček *et al.*, 2011)). Jednotlivé charakteristické typy půd se liší složením a poměry půdních horizontů; horizonty (Obr. 4) jsou od nadloží do podloží následující: O - nadložní organické, které se vyskytují jen u lesních půd a skládají se z opadanky (L), humusového horizontu (H) a fermentačního horizontu (F); A - humusové (povrchové); E - ochuzené (eluvialní); B - obohacené (iluvialní) nebo metamorfované; C - pedogenní substrát; R - mateční hornina; D - podložní hornina (Borůvka, 2013).

Magnetická měření sledují výskyt a akumulace oxidů železa v jednotlivých horizontech a zjišťují korelaci hodnot s obsahy těžkých kovů. Z půdních procesů jsou pro environmentální magnetismus nejvýznamnější mineralizace (rozklad organické hmoty na anorganické látky) a sorpce (oproti okolí zvýšená koncentrace látek na fázovém rozhraní). V případě kladné korelace magnetických vlastností a obsahů těžkých kovů lze pomocí měření magnetických parametrů celkem rychle a efektivně vymezit nejzávažněji kontaminované části rozsáhlých ploch. Kontaminace půd je závažnou hrozbou, neboť v delším časovém horizontu vede k půdní degradaci a jejímu znehodnocení, resp. výraznému snížení bonity. Půdní degradaci obecně dělíme na fyzikální a chemickou, způsobuje ji například vodní a větrná eroze, záplavy a sesuvy, ztráta biodiverzity, desertifikace, různé druhy kontaminace, acidifikace.



**Obr. 4:** Schéma půdního profilu s vyznačenými horizonty: A) humusový, nahoře bývá obohacen a dole ochuzen o půdní koloidy a humus, B) iluviální, převážně jílovitý a obohacený o Fe, Al a Si látky, C) rozrušená a zvětrávající matečná hornina, D) nedotčená matečná hornina (Petránek, 1993).

Celková magnetisace půd je výsledným součtem mnoha přispívajících faktorů a jedním z hlavních cílů je diskriminace přírodní a antropogenní složky a následná analýza jejího původu, a to hlavně v průmyslově zatížených oblastech. Výskyt přírodních magneticky významných minerálů v půdách je výsledkem pedogenních či litogenních procesů (Magiera *et al.*, 2006). Ferrimagnetické částice antropogenního původu jsou běžným produktem spalování fosilních paliv, která obsahují železité minerály. Jejich typický sférický tvar je způsoben formováním za vysokých teplot a následným rychlým ochlazením. Poté jsou částice vylučovány do atmosféry a transportovány jako prach nebo aerosoly do různých vzdáleností od zdroje (Spiteri *et al.*, 2005).



**Obr. 5:** Box-whisker grafy měřených magnetických parametrů zájmových oblastí: levá část grafu - povrchové půdy, pravá část grafu - spodná půdy, bod v boxu - průměr, box - oblast výskytu průměru se standardní chybou, přímkou - spojují oblast výskytu průměru s extrémními hodnotami, bod mimo box - hodnoty nejsou započítány do průměru (Fialová et al., 2006).

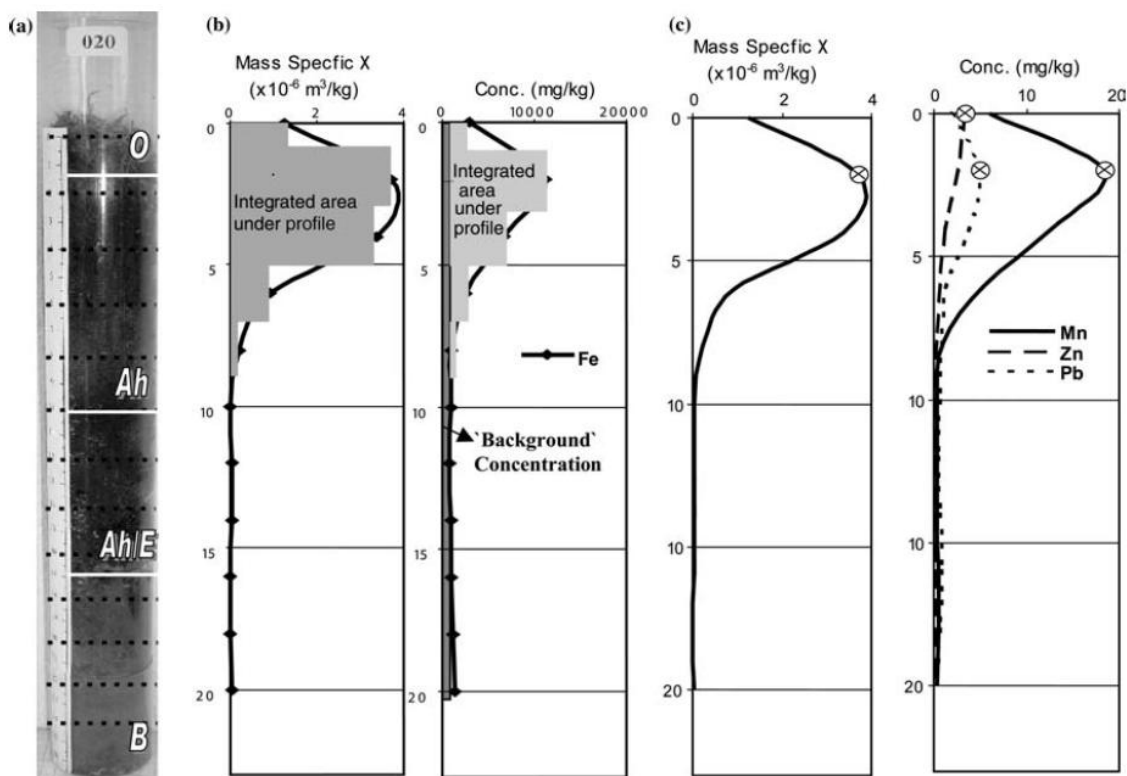
Rozlišení antropogenní složky závisí hlavně na litologických a environmentálních podmínkách studovaného území, v případě zanedbatelného litogenního příspěvku jsou susceptibilita a nasycená magnetisace spolehlivými parametry k vymezení magneticky obohacené svrchní půdy (Obr. 5). Vliv litologie je primární. Využití magnetických vlastností k určení jednotlivých půdních vrstev

a rozložení dominance antropogenní a litogenní složky je dáno zvětráváním podložních hornin, bohatých (nebo naopak chudých) na magneticky významné minerály. V těchto případech je třeba měření doplnit například geochemickou analýzou koncentrace těžkých kovů (Fialová et al., 2006).

Studium vlivu jednotlivých složek na výslednou susceptibilitu ukázalo, že antropogenní obohacení povrchových půd se vyskytuje z 80% ve 3 - 5 cm pod povrchem, bez závislosti na celkových hodnotách (Magiera et al., 2006). Další maximum se vyskytovalo u studovaných reprezentativních profilů v hloubce 15 - 20 cm, v půdním B horizontu (horizont obohacený látkami vyluhovanými z nadložního horizontu A). Po litologii ovlivňuje hodnoty také využití půd a typ vegetačního pokryvu, v lesních půdách je susceptibilita výrazně vyšší než v půdách pastvin a luk stejných oblastí, je-li dominantní antropogenní příspěvek (Magiera et al., 2006). Převahu antropogenní složky potvrzuje také výskyt anomálie v blízkosti zdroje znečištění a nejvýraznější navýšení hodnot ve svrchních 8 cm profilu, zvýšení susceptibility je zde spojeno s vyššími koncentracemi těžkých kovů. V opačném případě, kdy dominuje litogenní podíl, nenalzáme významnou korelaci s obsahem antropogenních těžkých kovů, anomálie se vyskytuje ve větších vzdálenostech od průmyslových zdrojů znečištění, susceptibilita orné půdy dosahuje vyšších hodnot než v půdě lesní a celkově narůstá s hloubkou (Magiera et al., 2006).

Možnosti korelace susceptibility a koncentrace těžkých kovů v půdním profilu (Obr 6) se ukazují jako použitelné hlavně v místech, kde jsou koncentrace kovů dostatečně vysoké. To znamená, že jsou-li obsahy nižší než hranice citlivosti přístrojů (0,2 mg/kg) pro atomovou absorpční spektroskopii (AAS), nelze spolehlivě ověřit vazbu susceptibility na jejich obsah, neboť i malá odchylka v měření způsobí velkou chybu v korelaci. Výrazná kladná korelace pomocí lineární regresní analýzy (LRA) byla podle předpokladů zjištěna u obsahů železa v případě půd v okolí velké tepelné elektrárny v Německu (Spiteri et al., 2005). Také koncentrace Mn, Zn, Pb a Cu se zde ukázaly dobře korelovatelné se susceptibilitou, s korelačním koeficientem  $R^2$  v rozmezí 0.70 až 0.98.

Detailní mapování koncentrace magnetických minerálů v rašelinách v závislosti na topografii ukázalo, že oblasti přímo přiléhající ke stržím a roklím se projevují vyššími hodnotami magnetické susceptibility. Zásadní roli hraje půdní vlhkost. Navýšení hodnot je způsobeno sníženou hladinou spodní vody, díky těmto podmínkám



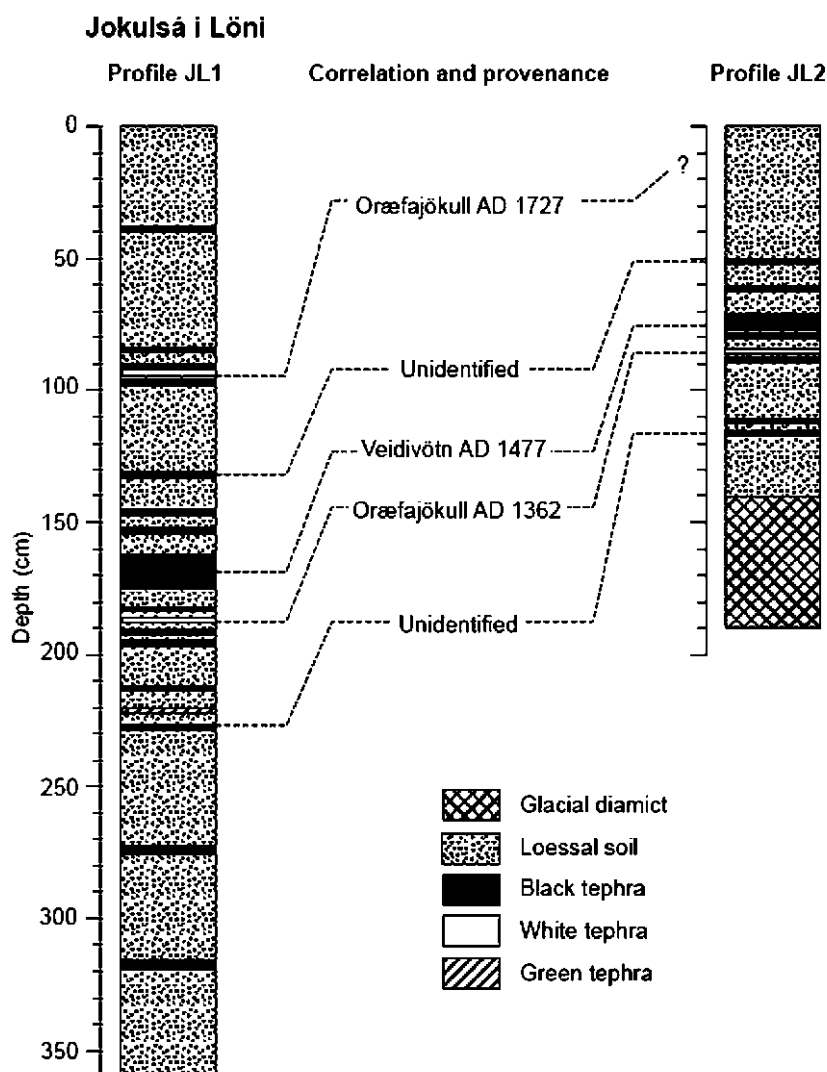
**Obr. 6:** Korelace magnetických vlastností s obsahy těžkých kovů ve východním Německu: a) fotografie jádra č.20, b) profil magnetické susceptibilitě a profil koncentrace těžkých kovů s vyznačenou integrovanou (integrated area) a okolní (background area) oblastí, c) profil magnetické susceptibilitě a profil koncentrace těžkých kovů, s vyznačenými maximálními hodnotami (Spiteri et al., 2005).

nedochází k tak rychlému rozpouštění minerálů. Zároveň jsou tato místa více vystavena činnosti větru, což je také příhodnější pro depozici magnetických minerálů, a hlavním vegetačním pokryvem jsou bylinné druhy, které lépe zachycují magnetické částice ze vzduchu než mechy a trávy (Rothwell and Lindsay, 2007).

Magnetická měření můžeme využít ke studiu eroze půd, například v důsledku požáru. Půdní eroze iniciovaná požárem záleží na místních klimatických podmínkách a intenzitě požáru. Nejdůležitějším faktorem je přítomnost povrchové humusové půdní vrstvy, která chrání půdu. Je-li požár dostatečně intenzivní, aby mohl zkonsumovat celou humusovou vrstvu, může se stát příčinou eroze (Carcaillet et al., 2006). Podle této studie může intenzivní požár proniknout do minerální vrstvy a změnit její mineralogické, a tím také magnetické vlastnosti. Jiné studie ale tuto možnost prakticky vylučují, protože požáry nezvýší dostatečně teploty v potřebné hloubce pod povrchem (Nornberg et al., 2009; Geiss et al., Grass fires - an unlikely process to explain the

*magnetic properties of prairie soils, submitted to Geophys. J. Int., 2013*). Nicméně minerální vrstva bude více náchylná k erozi a magnetická měření mohou napomoci při odhalení původu erozí transportovaného materiálu.

Xia *et al.* (2007) využili magnetické parametry ke korelaci tefra vrstev (Obr 7.) na dvou profilech z oblasti severovýchodního Islandu. Hlavními magnetickými minerály ve vrstvách tefry jsou ferrimagnetika (magnetit) spolu s paramagnetiky, dominují PSD zna. Studie ukázala, že jednotlivé tefra vrstvy v daném profilu nevykazují jednotné magnetické vlastnosti, takže lze pomocí statistické analýzy korelovat vrstvy mezi dvěma profiley.

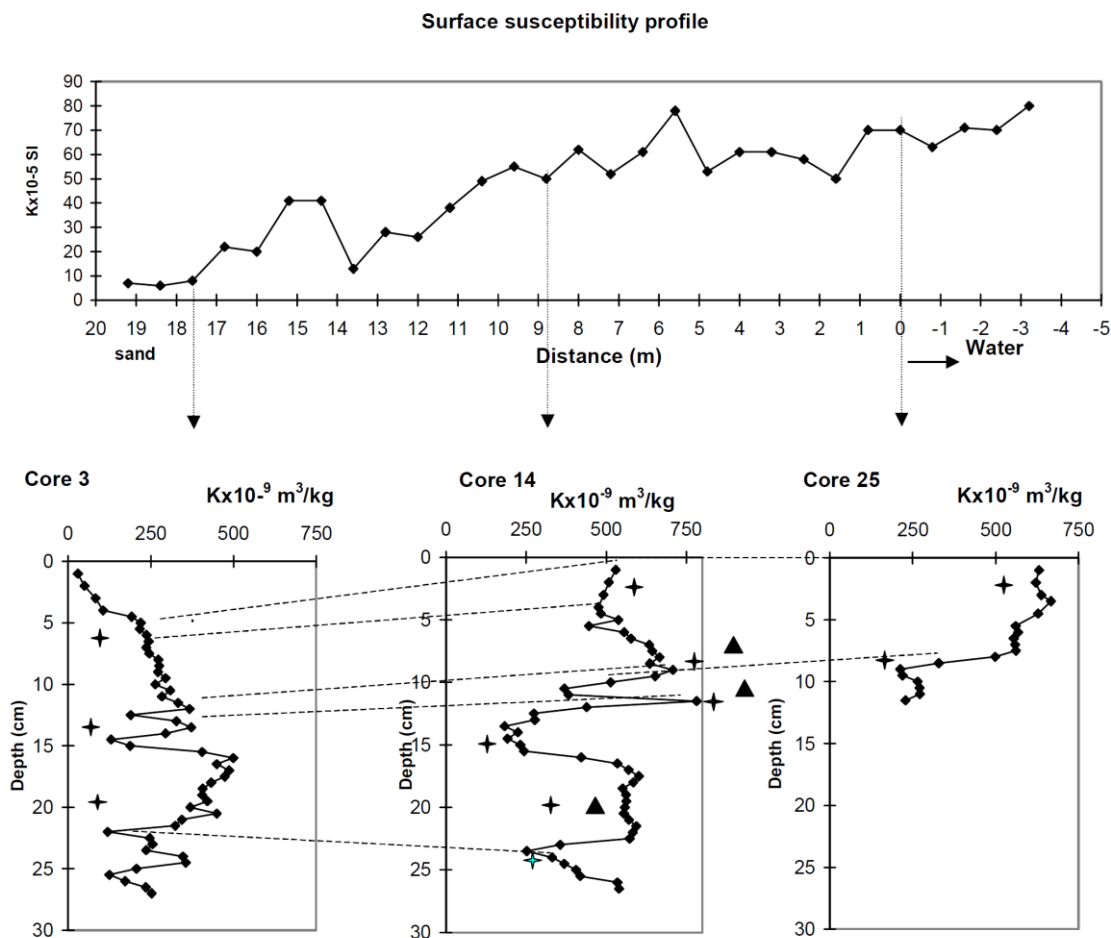


**Obr. 7:** Korelace tefra vrstev v sedimentárním cyklu je založena na stratigrafii, barvě a magnetických vlastnostech jednotlivých tefra vrstev: Glacial diamict - glaciální diamiktit, Loessal soil - sprašové půdy, Black tephra - černá tefra, White tephra - bílá tefra, Green tephra - zelená tefra (Xia *et al.*, 2007).

## 2.2. Magnetické vlastnosti sedimentů

Ekologický stav vodních zdrojů podléhá několika antropogenním faktorům spojeným s průmyslovou produkcí, hnojivy užívanými v zemědělství, celkovou urbanizací, erozí půd v povodí a eolickým transportem prachových částic.

Řeky proudící skrz rozsáhlá rozdílně průmyslově zatížená území přijímají kontaminanty z různých zdrojů - bodové i difusní, petrochemické, teplárenské, z odpadních vod, těžební. Díky říčnímu toku představují proudové sedimenty směs minerálů a těžkých kovů různého původu a transportovaných z různých vzdáleností. Sedimenty jsou během transportu vytříběny podle morfologie, zrnitosti a hmotnosti, takže každá částice podstupuje specifický transport a sedimentaci dle fyzikálních vlastností (*Knab et al., 2005*). Polutanty jsou sráženy a vázány na sedimenty jak v suspenzi tak na dně řek. Před finančně a časově nákladnou chemickou analýzou dostává přednost magnetometrické měření, které slouží k rychlému předběžnému vymezení kontaminované oblasti a k odhadu rozsahu znečištění, navíc měření dočasných změn může sloužit jako rychlý monitorovací nástroj. Využití variací susceptibility jako ukazatele antropogenního znečištění předpokládá relativně konstantní mineralogii sedimentů (*Jordanova et al., 2003*). Studie sedimentů jsou důležité také proto, že sedimenty se při změně geochemických podmínek mohou později samy stát zdrojem kontaminace vod těžkými kovy v nich obsaženými. Výzkumem magnetických měření a jejich účinnosti k mapování stavu říčních, marinních i lakustrinních sedimentů se zabývá mnoho autorů. Významně zvýšené hodnoty magnetické susceptibility byly pozorovány v lokalitách kontaminovaných těžkými kovy, hlavním cílem je kvantifikovat korelační vztah magnetických parametrů a koncentrací těžkých kovů. Zvýšené hodnoty susceptibility mohou být důsledkem výraznějšího přínosu oxidů železa, které jsou transportovány nejen atmosférou, ale i povrchovými odtokovými vodami z industriálních oblastí, silnic či zemědělských objektů (*Zhang et al., 2011; Knab et al., 2005*).



**Obr. 8:** Antropogenní vliv na nivní sedimenty Dunaje v SZ Bulharsku: vertikální profily variací hmotnostní susceptibilitě tří jader, pozice vzorků je vyznačena na horizontálním profilu pro srovnání s hodnotami povrchové susceptibilitě měřené sondou MS2D, hvězdy - vymezují hloubkové intervaly odebrání vzorků pro termomagnetickou analýzu, trojúhelníky - místa odebrání vzorků pro optickou mikroskopii (Jordanova et al., 2003).

Susceptibilita slouží také ke zjištění antropogenního vlivu na nivní sedimenty, např. nivy Dunaje v severozápadním Bulharsku (Obr 8.) (Jordanova et al., 2003). K měření byly využívány tři magnetometry - MS2D<sup>1</sup>, KT-5<sup>2</sup>, SM30<sup>3</sup> - výstupní hodnoty povrchové susceptibilitě se lišily pro jednotlivé instrumenty v závislosti na hloubkovém dosahu, který ovlivňuje více parametrů (průměr sondy, intenzita a frekvence pole). Variace susceptibilitě jasně korespondují se změnami objemu sedimentů během záplavových událostí a lze vymezit jejich hranice, záplavy mohou být rozeznány i

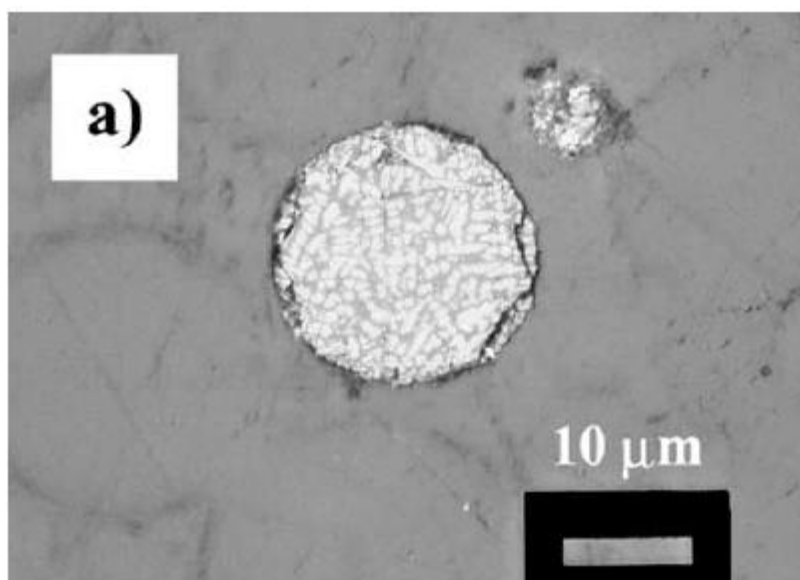
<sup>1</sup> MS2D sensor, Bartington, Oxford, U.K.

<sup>2</sup> KT-5 from Geofyzika, Brno, Czech Republic

<sup>3</sup> SM30, ZHIstruments, Brno, Czech Republic

opticky na základě jiné barvy sedimentu. Odebraná jádra s různou úrovní vodní hladiny ukazují záznam průběhu sedimentace a míru antropogenního znečištění. Hlavním ferrimagnetickým minerálem je magnetit, vedlejší fáze s nižší susceptibilitou může odpovídat více minerálům (maghemit, titanomagnetit, pyrrhotin). Optická mikroskopie magnetické složky prokázala přítomnost malých sférických částic, které jsou typickým produktem vysokoteplotních průmyslových procesů. Vertikální variace susceptibility zde mapuje změny znečištění za posledních 30 let. Nejméně znečištěna byla místa více vzdálená od industriální zóny, oproti tomu industriální oblasti se projeví výrazně vyšší susceptibilitou. S klesající vzdáleností od úrovně vodní hladiny klesala zvýšená susceptibilita podél studovaného profilu, nejnižší hodnoty byly nejdále do řeky. Tento pokles odpovídá změnám zrnitosti od hrubozrnného písčitého materiálu k jemným jílům, minimální hodnoty susceptibility odráží zvýšený přínos písku s vyšší hustotou (Jordanova et al., 2003).

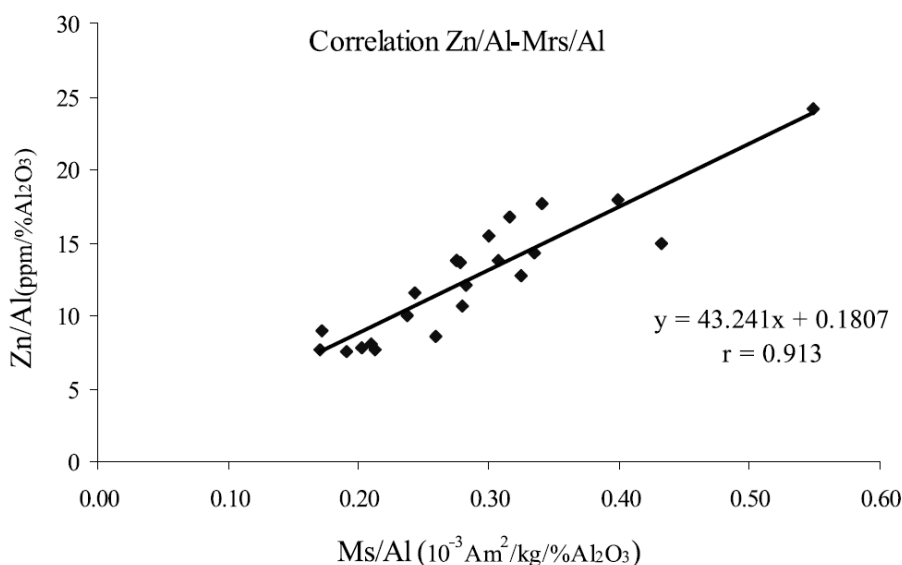
Výsledky pozdějších studií sedimentů Dunaje v bulharské části poukázaly na trend podhodnocování velikosti zrna antropogenních částic z několika důvodů. V mnoha případech mají sferule (Obr. 9) komplexní vnitřní strukturu, ve které je magnetická fáze přítomna jako dendrity ve skelné nemagnetické alumosilikátové matrix. Morfologie povrchu částic je často typu pomerančová kůra či dendritická,



**Obr. 9:** Minerální charakteristika antropogenní magnetické složky sedimentů Dunaje v Bulharsku: obrázek z optického mikroskopu zachycuje antropogenní částici z magnetického extraktu z lokality Silistra (Jordanova et al., 2004).

případně jsou jemnější silně magnetické částice vázány na povrch (Jordanova et al., 2004). Vnitřní struktura a chemické složení antropogenních částic znemožňuje přímý odhad jejich dominantní zrnitosti za využití zrnitostně závislých magnetických parametrů.

Další detailní výzkum sedimentů, jejich mineralogie a vztahu zvýšeného obsahu antropogenních magnetických částic s koncentrací těžkých kovů (Pb, Zn (Obr. 10) a Cr) a známých zdrojů kontaminace prováděl Desenfant et al. (2003). Šlo o studii sedimentů řeky Arc v jižní Francii, kde jasně demonstruje, že pozorované magnetické anomálie podél toku mohou být způsobeny lidskou činností, což potvrzuje dobrá korelace s obsahy olova, zinku, železa a chromu. Snahou bylo ukázat, že díky své jednoduchosti mohou magnetická měření *in situ* za určitých podmínek reflektovat antropogenní přínos těžkých kovů. Zájmová oblast tvoří pánev o rozloze cca 800 km<sup>2</sup>, geologický příspěvek k magnetickým hodnotám je zanedbatelný, neboť podloží tvoří jurské až oligocenní sedimenty (vápence, slíny a jílovce, marinního i lakustrinního charakteru) s extrémně nízkým obsahem magnetitu. Geologické podmínky oblasti opravňují k předpokladu, že magnetické obohacení sedimentů není litogenního původu, ale pochází z jiných zdrojů. V lokalitě se vyskytuje hned několik možných producentů magnetických částic, za hlavní se považuje elektrárna Gardanne, město Aix-en-Provence a provoz na dálnici A7 (z Lyonu do Marseille). Přínos částic z industriální oblasti Etang de Berre a města

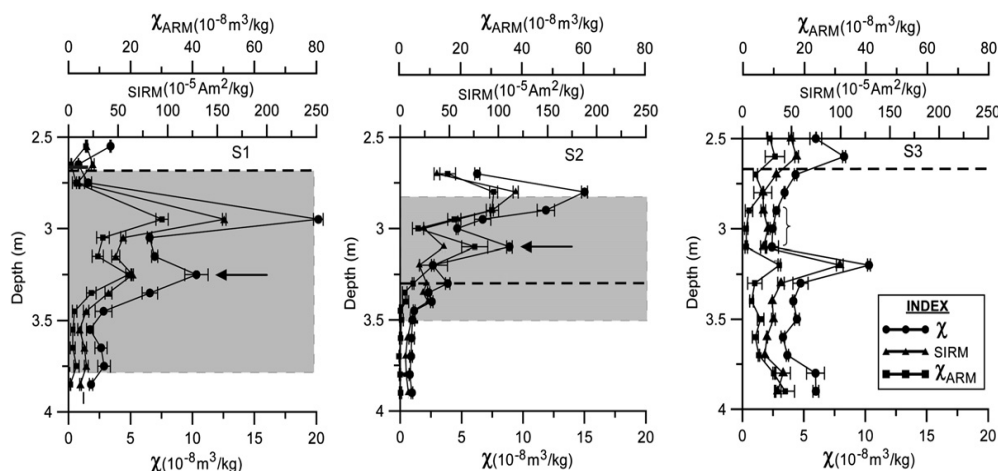


**Obr. 10:** Korelace koncentrace Zn a magnetických parametrů odrážejících koncentrace magnetických částic, studie z jižní Francie (Desenfant et al., 2003).

Marseille není tak významný kvůli povětrnostnímu režimu a jejich pozici vůči studované oblasti. Za daných podmínek předpokládá *Desenfant et al. (2003)*, dobře znatelný antropogenní příspěvek k magnetickému signálu a jeho kladnou korelaci s obsahy těžkých kovů z jednotlivých zdrojů; hlavně olova, zinku a chromu. Morfologie částic oxidů železa potvrdila jejich antropogenní původ, a vysoká korelace byla doložena mezi koncentrací magnetitu a koncentrací zinku (Obr. 10) a olova. Výsledky naznačují, že magnetit i těžké kovy mají stejný zdroj a transportní mechanismus.

Magnetické parametry lze také využít k určení provenience sedimentů a k mapování jejich distribuce mezi zdrojovou a akumulací oblastí. Je to možné za podmínek, kdy se sedimenty z různých zdrojů dostatečně liší svou litologií, a tedy i magnetickými vlastnostmi. Tak je tomu například v případě Taiwanského průlivu, kde byly v rámci výzkumu analyzovány magnetické vlastnosti sedimentů dvou zdrojových oblastí, kterými jsou jihovýchodní Čína a západní Taiwan. Zjištěné vlastnosti byly závislé na koncentraci, kompozici a zrnitosti magnetických minerálů a vedly k identifikaci provenience sedimentů v průlivu. Z profilů variací magnetických vlastností (susceptibilita  $\chi$ , SIRM, HIRM a S-ratio) byla vypočtena rychlost sedimentace z Taiwanu za posledních pět let, což by mohlo odpovídat zvýšené zemědělské aktivitě a rostoucí frekvenci a intenzitě dešťů. K upřesnění byla na magnetické složce sedimentů provedena také rentgenová difrakce (XRD) a skenovací elektronová mikroskopie (SEM) (*Hong and Huh, 2011*).

Variace magnetických vlastností v sedimentech a půdách mohou být zapříčiněny také podzemní vodou kontaminovanou uhlovodíky (Obr. 11). Kontaminace uhlovodíky představuje závažný globální environmentální problém pro trvale udržitelný rozvoj Země, proto je důležitý vývoj metod pro rychlé nalezení kontaminace a kontrolu její efektivní sanace. Magnetická měření ukázala, že koncentrace magnetických parametrů je nejvyšší v oblasti kolísání hladiny podzemní vody (Obr. 11), což způsobuje vznik sekundárního magnetitu (*Rijal et al., 2009*). Přítomnost uhlovodíků je pro jeho vznik podstatná, protože ve vzorcích odebraných mimo silně kontaminovanou oblast je výskyt tohoto sekundárního magnetitu mnohem menší. Formování magnetitu je způsobeno geomikrobiologickou aktivitou, ta je nejvýraznější v oblasti kolísání hladiny podzemní vody. Toto zjištění může být důležité pro vývoj metody k jednoduchému a rychlému nalezení ropných skvrn (*Rijal et al., 2009*).



**Obr. 11:** Vertikální variace  $\chi$ ,  $\chi_{\text{ARM}}$  a SIRM způsobené kolísáním hladiny podzemní vody kontaminované uhlovodíky, vzorky S1, S2, S3: šedá plocha - zóna kolísání hladiny podzemní vody, přerušovaná čára - úroveň hladiny podzemní vody v době měření (Rijal et al., 2009).

Magnetometrie umožňuje také analyzovat magnetické vlastnosti skládkových průsakových vod, určit převažující magnetický minerál a jeho možné zdroje (Bijaksana and Huliselan, 2010). U dvou indonéských skládek TKO<sup>4</sup> byla frekvenčně závislá susceptibilita porovnávána s dalšími parametry ( $\chi_{\text{lf}}$ ,  $\text{IRM}_{20 \text{ mT}}$  a SIRM). Nízká frekvenční závislost se často projevuje v kontaminovaných půdách, zatímco pedogenní obohacení má za následek vysokou frekvenčně závislou susceptibilitu (Evans and Heller, 2003). Proto kladná korelace parametrů závislých na koncentraci ferrimagnetik s frekvenčně závislou susceptibilitou u skládky Jelekong<sup>5</sup> naznačuje pedogenní původ variací susceptibilitu a nevýrazná korelace u skládky Sarimukti<sup>6</sup> napovídá, že magnetické variace nejsou pedogenního původu, ale pocházejí nejspíše ze srážkových výluhů. Magnetické obohacení srážkových vod může pocházet ze skládkových materiálů obsahujících železo (Bijaksana and Huliselan, 2010).

Pomocí studia hlubokomořských sedimentů lze určit například průběh sedimentace eolického prachu v průběhu i několika miliónů let. Takové studie probíhají v rámci projektu Ocean Drilling Program (ODP). Vrtaná jádra z mořského dna jsou kromě magnetických měření analyzována také geochemickými metodami a jsou

<sup>4</sup> tuhý komunální odpad

<sup>5</sup> Jelekong, skládka situovaná v jižní části města Bandung, West Java Province, v provozu 1991 - 2006, rozloha cca 2500 m<sup>2</sup>

<sup>6</sup> Sarimukti, skládka situovaná v západní části města Bandung, West Java Province, v provozu od 2006, rozloha cca 200 m<sup>2</sup>

sledovány variace izotopu  $\delta^{18}\text{O}$ . Larrasoana *et al.* (2003) studovali sedimenty Středozemního moře, měřením magnetických vlastností stanovili obsahy hematitu a zmapovali průběh přínosu a akumulace sedimentárního materiálu. Eolický prach v sedimentech východního Středozemního moře pochází ze Sahary, z nížin východního Alžíru, Lybie a západního Egypta (Larrasoana *et al.*, 2003). Minimální přínos prachu odpovídá postupu letní africké monzunové fronty směrem k severu, což vede ke změnám podmínek ve zdrojové oblasti; ke zvýšené humiditě půdy a bohatšímu vegetačnímu pokryvu, který brání odnosu materiálu. Tomu odpovídají také výsledky klimatických modelů “green Sahara”. Sedimentační záznam uplynulých 3 miliónů let dokumentuje i Milankovičovy cykly<sup>7</sup> a tranzit<sup>8</sup> magnetických pólů ve středním pleistocénu. Odlišné sedimenty jsou ukládány během maxima (slíny) a minima (sapropely) precesního pohybu Země (Larrasoana *et al.*, 2003). Záznam variace klimatu v měřítku miliónu let, včetně dynamiky monzunů, reflektuje také míru zalednění severní polokoule.

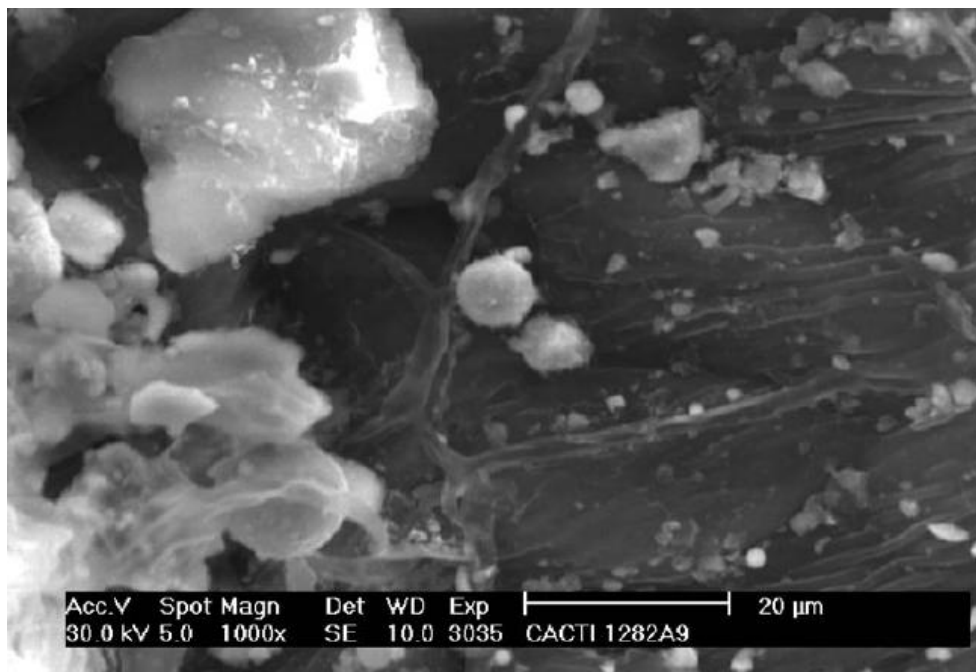
### 2.3. Znečištění atmosféry

V posledních letech se zkoumají možnosti využití magnetometrických metod také pro monitorování znečištění ovzduší, neboť magnetické částice jsou běžnou složkou atmosféry. Oxidy železa a kontaminanty obsažené v atmosféře jsou, podobně jako u půd, přírodního nebo antropogenního původu. Spalování fosilních paliv v průmyslu, ale také v jednotlivých domácnostech a automobilové dopravě, emise industriálních zón a velkých měst, všechny tyto zdroje přispívají k nárůstu obsahu antropogenních magnetických částic v atmosféře. Dle typu paliva a teploty spalování se výsledná magnetická složka skládá z jemných sférických a nepravidelných zrn různých velikostí s variabilním obsahem magnetitu a hematitu (Moreno *et al.*, 2003). Stejně tak se dle povětrnostního režimu a podnebí oblasti mění podíl přírodních magnetických částic v atmosféře, mezi něž patří jemnozrné částice vzniklé erozí, zvětráváním, ale i vulkanismem - sopečný popel (McIntosh *et al.*, 2007). Hlavním cílem environmentálního magnetismu je separace přírodního a antropogenního příspěvku k celkovému obsahu magnetických částic a určení zdroje znečištění ovzduší.

---

<sup>7</sup> Milankovičovy cykly jsou výsledkem změn zemského pohybu: precese, excentricity oběžné dráhy a sklonu vůči rovině ekliptiky

<sup>8</sup> tranzit je přechod magnetického pólu přes rovník během magnetického přepólování Země



**Obr. 12:** Mapování distribuce industriálního znečištění: rentgenový snímek zachycuje sferuli na povrchu javorového listu odebraného v blízkosti průmyslové zóny; rentgenová analýza ukázala, že sferule je složena ze železa, zinku a kyslíku (Hanesch et al., 2003).

Kvalita ovzduší a míra znečištění se běžně měří monitorovacími stanicemi s vzduchovými filtry (pro rozdílné plyny a polévaté částice, zvláště  $PM_{10}$ <sup>9</sup>) v kombinaci s magnetickými, geochemickými a meteorologickými daty (McIntosh et al., 2007; Moreno et al., 2003). Stupeň znečištění můžeme také zjistit z měření magnetických vlastností půd a sedimentů, jde ale o akumulace za delší časová období. Ve snaze určení aktuálního stavu, zpřesnění rozložení a stupně znečištění, se využívá pasivních metod environmentálního magnetismu. Ty měří magnetické vlastnosti částic (Obr. 12) usazených na jehlicích borovic a listech opadavých stromů (Hanesch et al., 2003).

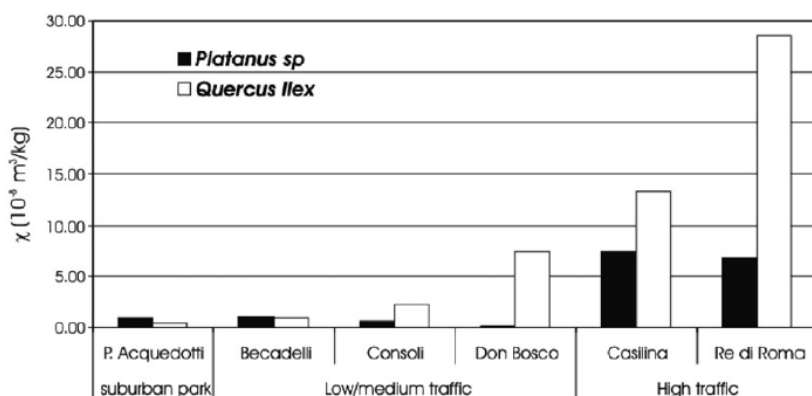
Listy opadavých stromů a jehlice borovic, u kterých známe nebo můžeme dostatečně přesně odhadnout délku života, představují ideální kolektor atmosférických částic a fungují jako efektivní vzduchový filtr. Jejich vzorkováním získáme koncentraci magnetických částic za určité období (týdny, měsíce), podle stáří listů z nichž vzorky odebíráme. K vytvoření detailní sítě měřících bodů je často nezbytné odebírat vzorky z více druhů stromů, protože jeden druh nemusí mít dostatečné plošné zastoupení. Magnetisace je závislá na vstupních podmínkách, jimiž jsou například vzdálenost od

<sup>9</sup>  $PM_{10}$  -particulate matter, částice menší než 10  $\mu m$

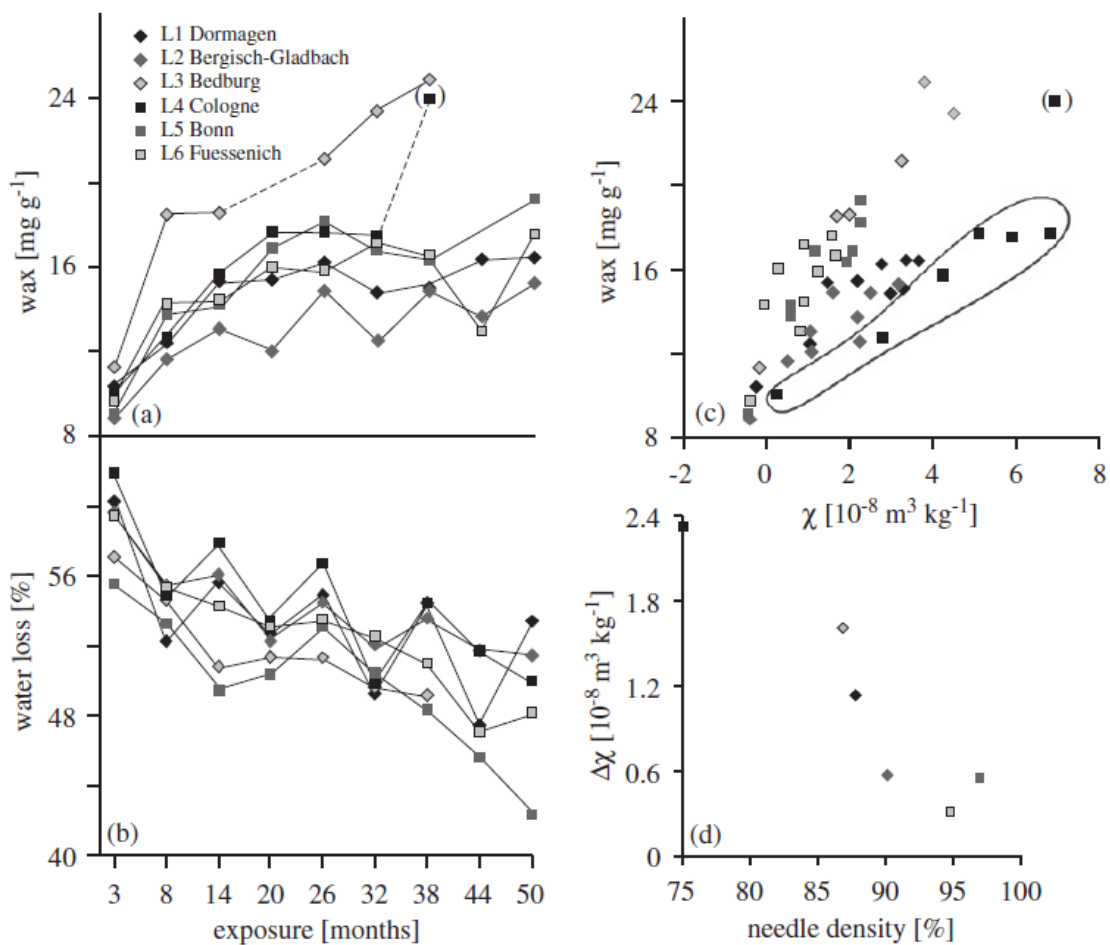
zdroje znečištění, koncentrace a zrnitost kontaminantů, o jaký druh stromu se jedná (jaká je jeho schopnost zachycovat magnetické částice a jaké je stáří olistění resp. jehlic), atmosférické procesy - povětrnostní režim oblasti, srážky (které akumulovaný materiál odplavují) etc. Pokud měření doplníme mapou magnetických vlastností půd, můžeme jasně oddělit záznam relativně dlouhodobého a krátkodobého rozložení znečištění dané oblasti (Hanesch et al., 2003; McIntosh et al., 2007; Maher et al., 2008; Sagnotti et al., 2009; Hansard et al., 2011; Kardel et al., 2011).

Akumulace magnetických částic na listech představuje dlouhodobý průměr znečištění, což je přínosnější než aktuální hodnoty měřené ze vzduchu monitorovacími stanicemi během kratších period, neboť právě dlouhodobý průměr má největší efekt na zdraví obyvatel (Moreno et al., 2003). Jsou-li magnetické částice dostatečně jemné, je hrozbou i jejich možná inhalace do plic. Magnetit v aerosolech je navíc spojen s obsahem těžkých kovů a organickými složkami, které jsou také škodlivé lidskému zdraví. Magnetické parametry olistění bohužel nelze využívat k okamžitému stanovení koncentrace prachových částic, protože je nelze korelovat s denními a hodinovými variacemi koncentrací PM<sub>10</sub> v atmosféře, které měříme na monitorovacích stanicích, a také proto, že hodnoty parametrů jsou ovlivněny srážkami. Nicméně je lze velmi efektivně využívat ke stanovení dlouhodobého průměru znečištění (Moreno et al., 2003; Hanesch et al., 2003).

Moreno et al. (2003) porovnává zachycení atmosférických magnetických částic na listech opadavých a stálezelených stromů v Římě (Obr. 13). Vzorky byly v určitém



**Obr. 13:** Monitorování znečištění ovzduší v Římě: magnetická susceptibilita částic zachycených na povrchu listů dvou druhů stromů - Platanus sp. a Quercus ilex, srovnání vzorků odebraných z různých částí města s odlišnou intenzitou dopravy (Moreno et al., 2003).



**Obr. 14:** Akumulace magnetických částic na jehličích borovic; fyziologické a environmentální vlastnosti: a) obsah vosku vs. doba expozice, b) ztráta vody vs. doba expozice, c) obsah vosku vs. magnetická susceptibilita, d) hustota jehlice vs. změny susceptibilita (Lehndorff et al., 2006).

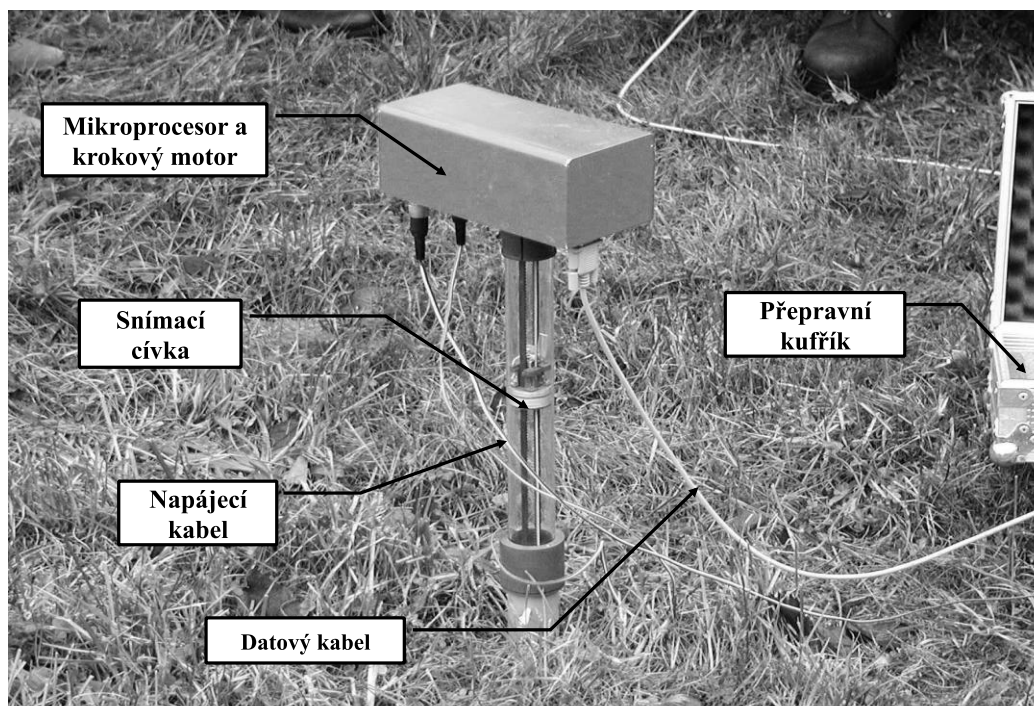
časovém rozmezí odebírány za dvou druhů stromů, oba vyskytující se v oblastech zeleně i u silnic. Výsledky výzkumu ukázaly, že s rostoucí vzdáleností od silnic a železnic klesá zrnitost a koncentrace magnetických částic, a tím potvrdily předpoklad, že zachycené částice jsou především emise z městské dopravy. Navíc stálezelené druhy vykazovaly výrazně vyšší intenzitu magnetisace než druhy opadavé, což napovídá tomu, že listy akumulují magnetické částice během celého svého života. Za dobré akumulátory jsou považovány listy (resp. jehlice) s velkým povrchem na jednotku hmotnosti nebo s dlouhou životností, například jehlice konifer (Obr. 14) nebo neopadávající olistění. Zda množství částic na stálezelených stromech odpovídá znečištění za dobu existence listu je spekulativní, protože výsledné množství záleží také na srážkách, které mohou

magnetické částice smývat. Podobné studie v jiných velkoměstech realizovali například Lehndorff *et al.* (2006), Maher *et al.* (2008), Sagnotti *et al.* (2009), Fabian *et al.* (2011).

Atmosférické procesy se mění v závislosti na počasí a ročním období a mají zásadní význam na ukládání kontaminantů na zemský povrch. Míru jejich vlivu na depozici částic můžeme sledovat mapováním hodnot magnetické susceptibility půd. Depozice je závislá na meteorologických podmínkách jako je směr větru, jeho síla a vertikální turbulentní pohyb. Vrstvy atmosféry eliminují nebo celkově brání vertikálnímu pohybu polutantů a hrají tak důležitou roli ve vzniku vysokých koncentrací škodlivin. Potlačení vertikálního pohybu vede k rozšíření plošnému bez výrazného snížení koncentrace. Cirkulace vzduchu v atmosféře samozřejmě podléhá i lokálním podmínkám: nadmořské výšce, ročnímu období, topografii terénu *etc.* (Maier and Scholger, 2003).

### 3. Příklad měření magnetických vlastností půd

V srpnu 2012 jsem se podílela na měření magnetických vlastností zemědělských půd, které probíhalo na lokalitě Vidim na Mělnicku. Na místě byla nejprve měřena povrchová susceptibilita na bodech vzájemně vzdálených cca 20 m. Měření bylo provedeno pomocí přístroje Magnetic Susceptibility Meter MS2/MS3, britské firmy Bartington Instruments Ltd., který je vhodný jak pro laboratorní tak pro terénní podmínky, do terénu ho doplňujeme sondou MS2D. Cívka sondy produkuje nízkofrekvenční magnetické pole a vyvolává tak magnetisaci materiálu, jež je přímo úměrná jeho susceptibilitě. Sonda je navržena pro rychlé vyhodnocení obsahu magnetického materiálu a má hloubkový dosah cca 100 mm pod povrch. Je hojně využívána pro environmentální studie a v archeologii, protože jde o nedestruktivní a rychlou metodu; každé měření trvá pár sekund a provádí se relativně ke vzduchu, jehož susceptibilita se bere za nulovou hodnotu ([www.bartington.com](http://www.bartington.com)). Po povrchovém měření jsme odebírali vzorky pro laboratorní zpracování. Jádra byla odebírána půdním vrtákem Humax zatloukaným kladivem do půdy do hloubky cca 30 až 40 cm. Celkově jsme odebrali 21 jader. Dále jsme v místě odebrání jádra změřili vertikální rozložení susceptibility pomocí magnetometru SM400 (Obr. 15) (Petrovský *et al.*, 2004).

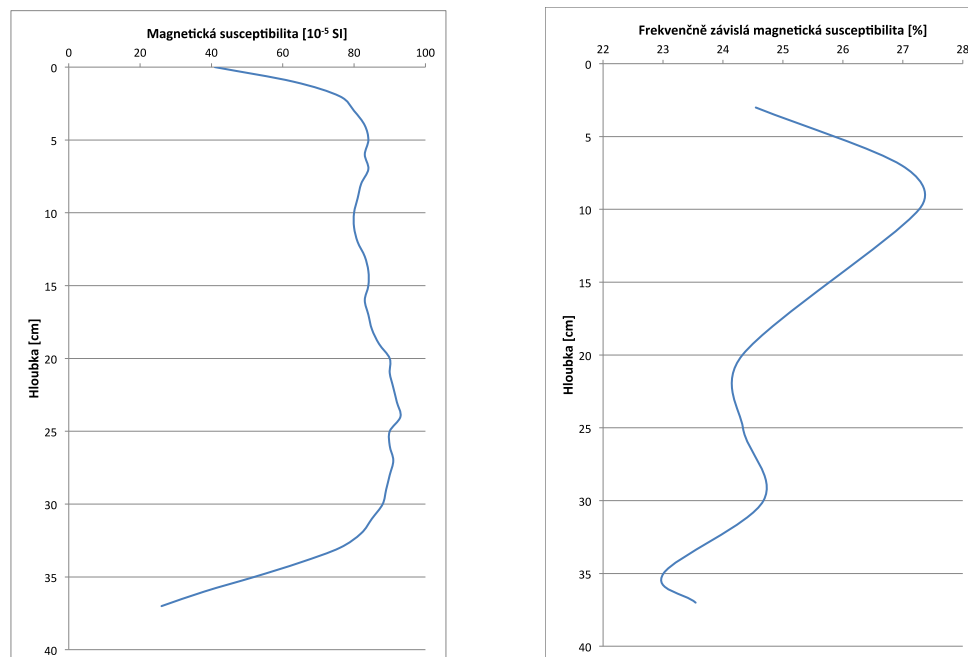


Obr. 15: Magnetometr SM400 (Petrovský et al., 2004).

V laboratoři jsem proměřovala vertikální rozložení susceptibility jednotlivých jader uložených v plastových trubkách pomocí sondy Bartington MS2E s krokem měření 1 cm. Po zpracování dat vertikálního rozložení jsem jádra rozřezala na segmenty s odlišnými hodnotami susceptibility (celkem 110 vzorků). Tyto segmenty jsem vysušila, rozmělnila a prosila na analytickou jemnost (2 mm) potřebnou k dalším měřením. Takto připraveným půdním materiálem jsem naplnila plastové kelímky o objemu 10ml a vzorky jsem zvažila. Následně jsem na Bartingtonu MS2B měřila susceptibilitu za vysokých ( $\chi_{hf}$ ) a nízkých ( $\chi_{lf}$ ) frekvencí pole. Na kapamůstku MFK1-FA, firmy AGICO, jsem měřila susceptibilitu z tří různých frekvencí (Obr. 16). Poté jsem naměřená data zpracovala v excelu do tabulky, aby byla použitelná k dalším účelům.

#### 4. Závěr

V této práci jsem představila základy magnetismu hornin a příklady využití magnetických parametrů v environmentálních studiích. Jednotlivé kapitoly ukazují současné možnosti a omezení magnetických měření při studiu půd, sedimentů a atmosféry. Díky časové a finanční nenáročnosti je environmentální magnetismus velmi slibným oborem, vždy ale záleží na místních podmínkách, zda jej lze v dané



**Obr. 16:** Variace magnetických parametrů s hloubkou: zpracování dat z vlastního měření.

oblasti efektivně využít. V lokalitách, kde lze korelovat magnetickou susceptibilitu a koncentrace těžkých kovů jsou magnetické metody velice přínosné, neboť tehdy mohou sloužit jako okamžitý indikátor kontaminace a jejího prostorového rozložení. Kromě plošného rozptylu kontaminantů můžeme měřením magnetických parametrů zjišťovat i vertikální rozložení v půdách a sedimentech. S rostoucí mírou znečištění je v současné době důležité nalézat metody k jeho rychlému monitorování, to je možné pomocí environmagnetismu a navíc můžeme snadno získat velké objemy dat.

Měřením magnetických parametrů můžeme kromě kontaminace studovat také průběh sedimentace, určit zdrojové oblasti materiálu, mapovat antropogenní vliv či geologické procesy - sesuvy, eroze, vulkanismus, ... Hlavním důvodem pro využití magnetických měření je fakt, že všechny látky vykazují určité magnetické chování a železo je jedním z nejběžnějších prvků v zemské stavbě. Přes všechny výhody by však metoda neměla být přeceňována; bohužel výsledky z jedné oblasti nejsou automaticky aplikovatelné na jinou oblast. V kombinaci s geochemickými metodami však představuje velmi efektivní nástroj ke studiu našeho prostředí.

## Literatura

- Bijaksana S., Huliselan E. K., 2010. Magnetic properties and heavy metal content of sanitary leachate sludge in two landfill sites near Bandung, Indonesia. *Environ Earth Sci*, **60**: 409–419
- Borůvka L., 2013. Základy pedologie a ochrana půdy, *pedologie.czu.cz/zpop/zpop08.pdf*
- Carcaillet Ch., Richard P. J. H., Asnong H., Capece L., Bergeron Y., 2006. Fire and soil erosion history in East Canadian boreal and temperate forests. *Quat. Sci. Rev.*, **25**: 1489–1500
- Desenfant F., Petrovský E., Rochette P., 2004. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: Case study from South France. *Water Air Soil Pollut.*, **152**: 297–312
- Evans M. J., Heller F., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics*, Academic Press–Elsevier, Amsterdam, 293
- Fabian K., Reimann C., McEnroe S. A., Willemoes-Wissing B., 2011. Magnetic properties of terrestrial moss (*Hylocomium splendens*) along a north–south profile crossing the city of Oslo, Norway. *Sci. Tot. Environ.*, **409**: 2252–2260
- Fialová H., Maier G., Petrovský E., Kapička A., Boyko T., Scholger R. and MAGPROX Team, 2006. Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *J. Appl. Geophys.*, **59**: 273–283
- Gruntorád J., Marek F., Mareš S., Matolín M., Skopec J., 1985. *Principy metod užité geofyziky*, SNTL Praha, 190
- Hanesch M., Scholger R., Rey D., 2003. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves. *Atmos. Environ.*, **37**: 5125–5133
- Hansard R., Maher B. A., Kinnarsley R., 2011. Biomagnetic monitoring of industry-derived particulate pollution. *Environ. Pollut.*, **159**: 1673–1681
- Hong Ch. S., Huh Ch. A., 2011. Magnetic properties as tracers for source-to-sink dispersal of sediments: A case study in the Taiwan Strait. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **309**: 141–152
- Jordanova D., Veneva L., Hoffmann V., 2003. Magnetic susceptibility screening of anthropogenic impact on the Danube river sediments in Northwestern Bulgaria - preliminary results. *Stud. Geophys. Geol.*, **47**: 403–418
- Jordanova D., Hoffmann V., Fehr K. T., 2004. Mineral magnetic characterization of anthropogenic magnetic phases in the Danube river sediments (Bulgarian part). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **221**: 71–89
- Kardel F., Wuyts K., Maher B. A., Hansard R., Samson R., 2011. Leaf saturation isothermal remanent magnetisation (SIRM) as a proxy for particulate matter monitoring: Inter-species differences and in-season variation. *Atmos. Environ.*, **45**: 5164–5171
- Knab M., Hofmann V., Petrovský E., Kapička A., Jordanova N., Appel E., 2006. Surveying the anthropogenic impact of the Moldau river sediments and nearby soils using magnetic susceptibility. *Environ. Geol.*, **49**: 527–535
- Larrasoana J.C., Roberts A. P., Rohling E. J., Winkhofer M., Wehausen R., 2003. Three million years of monsoon variability over the northern Sahara. *Clim. Dyn.*, **21**: 689–698
- Lehndorff E., Urbat M., Schwark L., 2006. Accumulation histories of magnetic particles on pine needles as function of air quality. *Atmos. Environ.*, **40**: 7082–7096

- Magiera T., Strzyszczyk Z., Kapička A., Petrovský E. and MAGPROX Team, 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, **130**: 299–311
- Maher B. A., Moore C., Matzka J., 2008. Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves. *Atmos. Environ.*, **42**: 364–373
- Maier G., Scholger R., 2004. Demonstration of connection between pollutant dispersal and atmospheric boundary layers by use of magnetic susceptibility mapping, St. Jacob (Austria). *Phys. Chem. Earth*, **29**: 997–1009
- McIntosh G., Gómez-Paccard M., Osete M. L., 2007. The magnetic properties of particles deposited on *Platanus x hispanica* leaves in Madrid, Spain, and their temporal and spatial variations. *Sci. Tot. Environ.*, **382**: 135–146
- Moreno E., Sagnotti L., Dinarès-Turell J., Winkler A., Cascella A., 2003. Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. *Atmos. Environ.*, **37**: 2967–2977
- Němeček J. a kol., 2011. *Taxonomický klasifikační systém půd České Republiky*, 2. vydání, ČZU Praha, 94
- Nornberg P., Vendelboe A. L., Gunnlaugsson H. P., Merrison J. P., Finster K., Jensen S. K., 2009. Comparison of the mineralogical effects of an experimental forest fire on a goethite/ferrihydrite soil with a topsoil that contains hematite, maghemite and goethite. *Clay Min.*, **44**: 239–247
- Petránek J., 1993. *Malá encyklopedie geologie*, České Budějovice: Jih, 246
- Petrovský E., Hůlka Z., Kapička A., 2004. A new tool for in situ measurements of the vertical distribution of magnetic susceptibility in soils as basis for mapping deposited dust. *Environ. Technol.*, **25**: 1021–1029
- Rijal L. M., Appel E., Petrovský E., Bláha U., 2010. Change of magnetic properties due to fluctuations of hydrocarbon contaminated groundwater in unconsolidated sediments. *Environ. Pollut.*, **158**: 1756–1762
- Rothwell J. J., Lindsay J. B., 2007. Mapping contemporary magnetic mineral concentrations in peat soils using fine-resolution digital terrain data. *Catena*, **70**: 465–474
- Sagnotti L., Taddeucci J., Winkler A., Cavallo A., 2009. Compositional, morphological, and hysteresis characterization of magnetic airborne particulate matter in Rome, Italy. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**: 1–17
- Spiteri C., Kalinski V., Rösler W., Hoffmann V., Appel E., and MAGPROX team, 2005. Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils. *Environ. Geol.*, **49**: 1–9
- Xia D., Chun X., Bloemendal J., Chiverrell R. C., Chen F., 2007. Use of magnetic signatures to correlate tephra layers in Holocene loessial soil profiles from a small region, SE Iceland. *Environ. Geol.*, **51**: 1425–1437
- Zhang Ch., Qiao Q., Piper J. D. A., Huang B., 2011. Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods. *Environ. Pollut.*, **159**: 3057–3070