

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Gloria Hrušková

Magnetometrické a spektrometrické analýzy polétavého prachu z lokalit s emisním znečištěním ovzduší převážně z automobilové dopravy (Pražský okruh) a z průmyslu (poblíž ostravských hutí) s využitím meteorologických dat

Magnetometrical and spectrometrical analyses of fly ashes from the areas with emissonal air pollution mainly from automobile traffic (near Prague's D0 motorway) and from industry (near Ostrava's iron-mills) with a use of meteorological data

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Eduard Petrovský, CSc.

Praha, 2018

Prohlášení:

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

V Praze, 10. 5. 2018

Gloria Hrušková

Abstrakt

Náplní analytické části této práce je studium vzorků polétavého prachu odebraných v místech s jeho vyšší koncentrací: u Pražského okruhu (dálnice D0) a v blízkosti Ostravských hutí. Na obou lokalitách jsou automobilová doprava nebo průmyslové činnosti primárními zdroji emisí prachových částic.

Převzaté vzorky PM1, PM2, PM10 a TSP filtrů byly odebrány standardním postupem pro sledování znečištění ovzduší.

Tato studie zkoumá vztahy mezi magnetickými parametry vzorků, jejich hodnoty koncentrací kovů často se vyskytujících v emisích z těchto zdrojů, celkovou hmotností prachové frakce ve vzorcích a meteorologickými parametry (v případě ostravských vzorků).

Magnetické vlastnosti filtrů byly zkoumány magnetometrickými analýzami s použitím vibračního vzorkovacího magnetometru. Koncentrace kovů byly sledovány RTG fluorescenčním spektrometrem, hmotnosti částí prachových filtrů byly změřeny na laboratorních vahách.

Abstract

The content of analytical part of this thesis is the study of airborne dust samples collected in places with its higher concentration: by the Prague Ring (D0 motorway) and near the Ostrava's iron-mills. In both places, automobile transportation or industrial production are the primary sources of particulate matter emissions in the air.

Received samples of PM1, PM2, PM10 a TSP filters were obtained by a standard air pollution monitoring procedure.

This study examines the relationship between the magnetic parameters of the samples, their level of concentration of metals frequently present in emissions from these sources, the total mass of the dust fraction in the samples and the meteorological parameters (for Ostrava samples).

The magnetic properties of the filters were investigated by magnetometric analyzes using a vibration sampling magnetometer. The concentrations of the metals were monitored by X-ray fluorescence spectrometer, the weight of parts of dust filters was measured on laboratory scales.

Poděkování

Děkuji panu RNDr. Eduardu Petrovskému, CSc. za odborné vedení, mnoho cenných rad a připomínek, jeho ochotu, čas a vstřícný přístup.

Děkuji také Geofyzikálnímu Ústavu AV ČR za umožnění magnetometrických, spektrometrických a váhových měření. Národní referenční laboratoři pro venkovní ovzduší Centra hygieny životního prostředí Státního zdravotního ústavu v Praze a Zdravotnímu ústavu se sídlem v Ostravě děkuji za poskytnuté filtry. Za informace o meteorologických podmínkách v Radvanicích děkuji Českému hydrometeorologickému ústavu a za informace ohledně dopravní vytíženosti Komořanského tunelu děkuji Ředitelství silnic a dálnic.

Dále bych chtěla poděkovat všem interním i externím pedagogům PřF UK, kteří mě učili, zejména pak těm z Oddělení užité geofyziky, za všechny nově nabyté znalosti jak z oboru aplikované geologie, tak z geologie všeobecné a věd s geologií a zpracováním geologických a fyzikálních dat souvisejících (matematika, statistika, fyzika...).

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Využití magnetometrie při zkoumání životního prostředí	9
2.1 Problematika emisí polévatvého prachu a jejich zkoumání magnetometrií.....	9
2.2 Kategorie prachových částic.....	11
2.3 Emise z dopravy	13
2.4 Emise z průmyslu	16
2.5 Meteorologické vlivy.....	17
2.6 Předchozí meteorologické a magnetometrické studie obsahu PM v ovzduší.....	20
3 Oxidy Fe a environmentální magnetometrie	22
3.1 Oxidy Fe v životním prostředí.....	23
3.2 Diamagnetismus, paramagnetismus, feromagnetismus.....	25
3.3 Minerály oxidů železa	28
3.3.1 Magnetit	28
3.3.2 Hematit.....	29
3.3.3 Maghemit	29
3.4 Složení oxidů Fe	30
3.5 Koncentrace oxidů Fe.....	31
3.6 Velikost částic	32
3.7 Tvar částic.....	34
4 Lokality odběru vzorků prachových částic	34
4.1 Lokalita 1: Pražský okruh u Komořanského tunelu	35
4.2 Lokalita 2: Ostrava-Bartovice	37
5 Měření	40
5.1 In situ měření koncentrací polévatvého prachu v ovzduší	40

5.2 Laboratorní analýzy filtrů PM částic	41
5.2.1 Informace o použitých metodách a přístrojích	41
5.2.2 Metodika a zpracování měření.....	43
5.2.3 Statistické analýzy	46
6 Výsledky.....	56
6.1 Komořanské vzorky.....	56
6.3 Ostravské vzorky	61
6.4 Korelace mezi magnetometrickými a spektrometrickými výsledky	67
7.1 Diskuze	68
7.2 Závěr.....	69
Literatura	71
Internetové zdroje.....	74

1 Úvod

Znečištění ovzduší poléťavým prachem je v dnešní době aktuální environmentální problém, na jehož monitorování se kromě rozličných finančně nákladných chemických analýz mohou uplatnit i analýzy magnetometrické.

Tato diplomová práce se zabývá analýzami převzatých vzorků poléťavého prachu, přičemž se snaží porovnávat magnetometrické, spektrometrické a hmotnostní charakteristiky prachu ze dvou odlišných lokalit. Lokality byly vybrány tak, aby každá z nich měla primární zdroj poléťavého prachu jiný. Pozorovány tedy mohly být koncentrace a vlastnosti prachových částic uvolněných do ovzduší (takzvaných prachových emisí) z automobilové dopravy a z průmyslové oblasti.

Lokalitou, na které probíhal monitoring koncentrace poléťavého prachu z automobilové dopravy, bylo místo ležící nedaleko hlavního města Prahy, vedle dálnice D0 přímo u vchodu do Komořanského tunelu (červenec 2012). Druhým místem odběru vzorků byla průmyslová oblast Ostravy nedaleko ostravských hutí (leden 2012). Pro tuto lokalitu jsou k dispozici také meteorologická data z přilehlé městské části.

Převzaté vzorky PM1, PM2, PM10 a TSP filtrů odebrané standardním postupem pro sledování znečištění ovzduší byly dále podrobeny magnetometrickému zkoumání vibračním vzorkovacím magnetometrem, rentgenfluorescenční analýze hmotnostním spektrometrem a metrologickým zkoumání a zjišťovaly se:

- magnetické parametry vzorků,
- koncentrace těžkých a toxických kovů často se vyskytujících v emisích z těchto zdrojů,
- celkové měrné hmotnosti prachové frakce ve vzorcích,
- vzájemné vztahy těchto veličin
- a jejich vztahy k meteorologickým parametrům (v případě ostravských vzorků).

2 Využití magnetometrie při zkoumání životního prostředí

2.1 Problematika emisí polétavého prachu a jejich zkoumání magnetometrií

Ovzduší naší planety je trvale zatěžováno emisním znečišťováním. V této souvislosti se asi nejčastěji setkáváme s pojmem atmosférické aerosoly.

Atmosférické aerosoly jsou soustavy nebo směsi tekutých kapek nebo pevných částic volně rozptýlených v atmosféře. Obvykle náleží do velikostního rozmezí 1 nm–1 μm. Vznikají přírodními nebo antropogenními procesy a mají tendenci spíše zůstávat ve vzduchu, než by se usadily. Zahrnují **mlhu, kouřmo, zákal, prach, kouř, částice solí, kondenzační a ledová jádra** (Munzar et al. 1989). Aerosoly jsou důležité pro atmosférické procesy – především pro kondenzaci a mrznutí, dále pak pro vznik atmosférické elektřiny a různých chemických reakcí v ovzduší (Dunlop 2001).

Jeden z typů aerosolových částic, prach nebo přesněji polétavý prach, jsou drobné částice pevného skupenství rozptýlené ve vzduchu (ČHMÚ¹). Usazují se nejen v životním prostředí, ale i přímo v žijících organismech – lidech, zvířatech a vegetaci. Antropogenním zdrojem polétavého prachu jsou především emise z dopravních prostředků (zejména automobilové a letecké dopravy), nebo prach z cementáren, lomového dobývání ložisek a výroby oceli.

Nebezpečí polétavého prachu pro lidský organismus spočívá v jeho vdechování. **Inhalace jemných prachových částic** poškozuje nejen respirační systém a způsobuje mnohá onemocnění, například chronickou bronchitidu. Na povrch částic se snadno vážou **jedovaté látky**. Ty jsou po absorpci plicemi přeneseny do krevního oběhu a krví pak migrují celým organismem. Tímto stimulují enzymové systémy a přetvářejí tělní metabolismus. Výsledkem procesu jsou poškozené orgány a může být podpořen růst rakovinných nádorů (Vejvoda et al. 2003). Škodlivinami ve vzduchu dostávajícími se do plic společně s tuhými částicemi mohou být i kapalné kyselé aerosoly, **těžké kovy** a perzistentní organické látky. Tyto škodliviny trvale narušují samočisticí schopnost plic a důsledkem jsou další zdravotní rizika (biomasa-info.cz).

Evropská ochranná agentura EPA (EPA¹) dále uvádí, že vystavení se těmto částicím může způsobit nepravidelný srdeční rytmus, infarkt, snížení funkce plic a vyšší výskyt dýchacích obtíží, například dráždění dýchacích cest, kašel, zhoršené dýchání, zhoršení astmatu a předčasnou smrt u lidí s plicními a srdečními obtížemi. Také proto má znečištění

polétavým prachem největší vliv na děti, seniory a lidi se srdečními nebo plicními onemocněními.

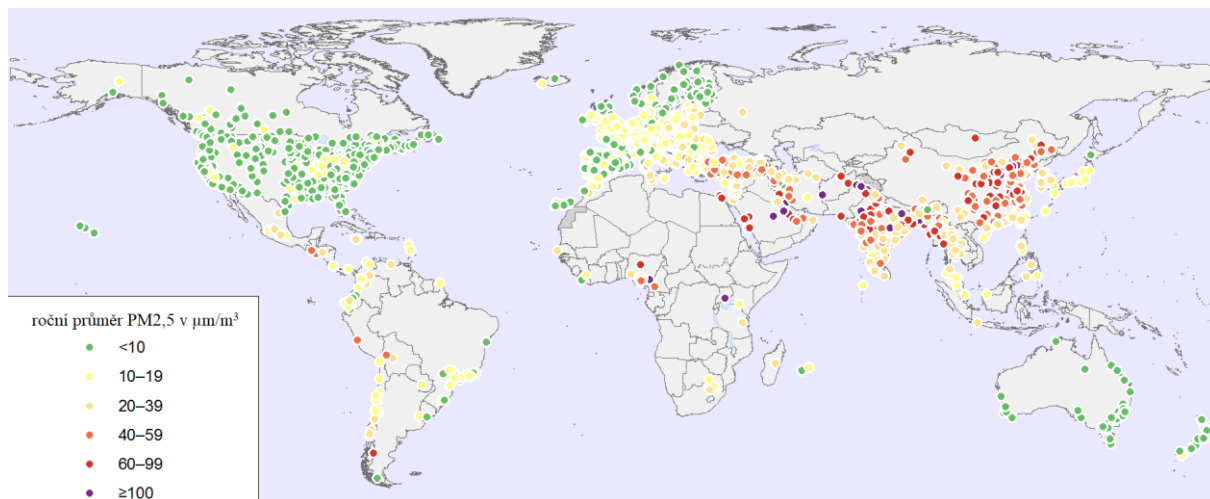
Těžké kovy jsou toxické kovy o měrné hmotnosti větší než $4\,500\text{ kg/m}^3$ s tendencí akumulovat se v potravním řetězci. Míra jejich toxicity je různá, i jejich působení na živé organismy se vzájemně liší. Silně toxickými kovy jsou arsen As, kadmium Cd, rtuť Hg, **olovo Pb**, **chrom Cr**, thalium Th a **nikl Ni**, potenciálně toxické jsou kobalt Co, měď Cu, **železo Fe**, mangan Mn, selen Se a **zinek Zn**. Mezi prvky méně toxické řadíme antimon Sb, cín Sn a **vanad V** (VeJVoda et al. 2003).

Podle dat Světové zdravotnické organizace WHO se mezi 500 měst s celosvětově nejvyššími koncentracemi prachových částic ve vzduchu na přední místa řadí mnoho měst v Číně, Indii a na Blízkém Východě, kromě méně známých měst a průmyslových oblastí jsou jimi například: čínský Peking, indické Dillí, iránský Zabol nebo saúdskoarabský Rijád. Mezi prvními pěti sty nejznečištěnějšími městy světa figurují i čtyři česká: Český Těšín, Havířov, Orlová a Karviná (466., 467., 469. a 498. místo) (WHO¹). Tato města zároveň patří v ČR mezi nejvíce průmyslová.

Nadměrná množství polétavého prachu se tedy vyskytují nejhojněji v průmyslových oblastech a ve velkých městech vysoce zatížených dopravou. Zdroji polétavého prachu ve městech a jejich okolí jsou továrny spalující fosilní paliva, ocelárny, cementárny, malé průmyslové a městské kotle a domácí topeniště (Heller et al. 1998). Dalšími zdroji prachových emisí jsou: doprava, spalovny odpadů, kamenolomy a povrchové lomy. Mezi hlavní zdroje znečištění ovzduší prachovými částicemi se už dlouho neřadí jenom elektrárny nebo velké průmyslové podniky (výjimku v ČR tvoří velké hutě a koksovny Ostravska), ale také doprava. Velký problém představují automobilová doprava a lokální topeniště. Mnohé domácnosti změnilo způsob vytápění z plynového na topení pevnými palivy, což vedlo ke zvýšení koncentrací polétavého prachu v ovzduší (Hykyšová 2006).

Znatelný zdroj znečištění vykazujícího magnetické vlastnosti představují emise z dopravních prostředků (Hunt 1986). Různé zdroje znečištění uvolňují do atmosféry **magnetické částice**. **Magnetometrické metody** zkoumání aerosolů poskytují účinný nástroj pro průzkum průmyslových polutantů. Díky magnetickým vlastnostem částic v antropogenním prachu **odlišují polétavý prach od ostatních aerosolů**.

Mnoho studií, které se zabývaly touto problematikou (např. Marié et al. 2010) našlo úměru mezi rozsahem znečištění polévatým prachem okolí silnic a magnetickým signálem tohoto znečištění. Například u vzorků vzduchu nebo půd se zvýšeným obsahem polévatého prachu byl naměřen větší magnetický signál. Dnes se tedy magnetické mapování již standardně používá k průzkumu průmyslového a městského znečištění prachovými částicemi v různých prostředích, jakými mohou být například půdy, řeky a jezera, silnice a vegetace.



Obr. 2.1 Schematická světová mapa průměrných koncentrací pevných částic < 2,5 µm (PM2,5) v ovzduší v letech 2008-2015 na zájmových lokalitách (roční průměry v µg/m³), zdroj: WHO (2016), upraveno.

Při stanovování znečištění ovzduší se běžně používají průměrné roční koncentrace jemných prachových částic různých velikostí (dále viz podkapitola 2.2), například koncentrace částic o průměru < 2,5 µm, jako znázorňuje obrázek 2.1.

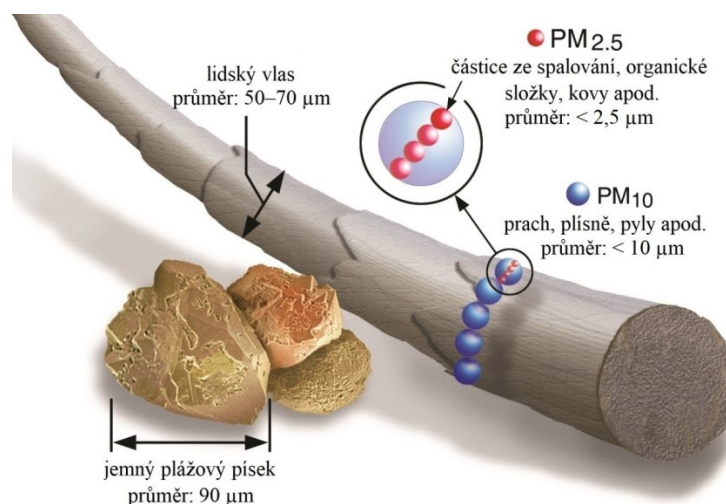
2.2 Kategorie prachových částic

„Za polévatý prach jsou považovány částičky menší než 10 mikrometrů (označeny jako PM10) (MŽP). K monitoringu koncentrací polévatého prachu v ovzduší se používají **prachové filtry**. Podle hraničních velikostí zachytávaných částic prachu rozlišujeme různé typy filtrů. Nejznámější z nich jsou filtry na PM1, PM2,5 (někdy též PM2.5), PM10 a TSP. Konečné koncentrace jednotlivých druhů prachových frakcí vyjadřují obsah všech pevných částic ve vzduchu za určitý časový úsek (Skácel, Tekáč 2007).

TSP filtry zachytávají všechny prachové částice v ovzduší bez rozlišení velikostí. TSP pochází z anglického „total solid particles“ (všechny tuhé částice) nebo někdy též „total suspended particulate matter“ (souhrn suspendovaných částic), podle platné české legislativy se označují jako tuhé znečišťující látky TZL (Skácel, Tekáč 2007). **Tuhé znečišťující látky (TZL)** jsou produktem vysokých a elektrických pecí, oceláren a koksoven, tepelných elektráren, cementáren, dopravy, povrchové důlní činnosti a jiných typů průmyslové činnosti (Vejvoda et al. 2003).

TZL mají různé velikostní a chemické složení podle charakteru zdroje a způsobu vzniku. Mohou obsahovat těžké kovy a jsou nosným médiem pro těžké organické látky (Skácel, Tekáč 2007). Podle zdravotního působení TZL na člověka jsou definovány **velikostní skupiny PMX** (z angl. „particulate matter“: částice). Filtry pro částice PM1, PM2,5 a PM10 zachytávají všechny poléťavý prach ve vzduchu o **aerodynamickém průměru menším než 1, 2,5 a 10 μm** . Pro posuzování emisí se nejčastěji používají koncentrace PM10 a PM2,5 (Skácel, Tekáč 2007).

Díky svému vysoce specifickému povrchu jsou **částice menší než 10 μm** nejen účinným **nosičem karcinogenních polutantů**, jako jsou těžké kovy a polyaromatické uhlovodíky PAH, ale i jejich **adsorbentem** (kdy se rakovinotvorné látky stávají součástí částice). Vliv PM10 na lidské zdraví a životní prostředí tedy závisí na jejich složení (Vejvoda et al. 2003). A nejen na něm (viz podkapitola 2.3 Emise z dopravy).



Obr. 2.2 Porovnání velikostí frakcí PM2,5 a PM10 s velikostmi zrněk písku a průměrného lidského vlasu,

zdroj: epa.gov, upraveno.

Na obrázku 2.2 je názorná ukázka velikostí PM_{2,5} a PM₁₀ částic v porovnání s průměrnými velikostmi jemnozrnného písku a lidského vlasu.

Škodlivé účinky vdechnutých částic na lidské zdraví se zvyšují s jejich zmenšující se velikostí (Pope, Dockery 2006). Částice lze dělit podle aerodynamického průměru na jemné částice (< 2,5 μm), vdechnutelné částice (< 10 μm) a suspendované částice (< 30 až 100 μm) (Chaparro et al. 2010). Podle Heydera (1986) lze částice s aerodynamickým průměrem menším než 10 μm (< PM₁₀) velmi snadno vdechnout. Po vdechnutí se mohou usadit v plicích. Částice o velikostech 2,5–10 μm vnikají do průdušek a částice menší než 2,5 μm (< PM_{2,5}) mohou proniknout až do plicních sklípků. (Bezpečnost chemických procesů uvádí, že největší hazard pro plíce jsou atmosférické částice velikosti 0,2 až 0,5 μm. Částice větší než 0,5 μm obvykle nejsou schopny proniknout do plic a částice menší než 0,2 μm se v plicích usazují tak pomalu, že se obvykle zase z plic vydechnou. Velmi malé částice se z velké části pohybují Brownovým pohybem.)

Rizzio et al. (1999) tvrdí, že zrna menší než 4,6 μm jsou obzvlášť nebezpečná, protože mohou být vdechnuta do bronchiální (průduškové) oblasti, a ještě škodlivější jsou zrna menší než 1,1 μm, která se mohou usazovat v alveolách (plicních sklípcích). Dlouhodobé vystavení se těmto částicím může vést k dýchacím a kardiovaskulárním potížím. Podle webu biomasa-info.cz zdraví člověka nejvíce ohrožují částice o velikostech 0,25–5 μm a lidské plíce nejnáze zadrží částice velké přibližně 1 μm.

2.3 Emise z dopravy

Z údajů o emisním znečištění vyplývá, že doprava je zdrojem téměř poloviny emisí TZL v ČR (Skácel, Tekáč 2007). Zdrojem polétavého prachu ve městech jsou zejména dopravní prostředky, především automobilová doprava.

Znečištění ovzduší prachovou frakcí z dopravy má několik dílčích zdrojů. Ultrajemné částice jsou obsaženy jak v emisích vznětových (palivem nafta a jiná kapalná paliva), tak i zážehových motorů (palivem benzín a jiná plynná paliva). Nejvíce znečištění TZL je spojováno s emisemi z dopravních prostředků využívajících **naftová – dieslová – paliva**. Primárními emisemi kovů a obecně pevných částic z automobilové dopravy jsou částice vzniklé při použití **brzdných systémů** (otěru brzdového disku o brzdovou destičku), otíráním

pneumatiky o vozovku a částice vzniklé při **hoření paliva v motoru**. Dalšími zdroji jsou částice vzniklé **při chladnutí výfukových plynů ve výfuku** nebo při **korozí motoru**. Všechny tyto částice lze dělit podle velikostí (submikrony až mikrony) na:

- tzv. nanočástice (< 30 nm)
- velmi jemné částice (30–100 nm),
- jemné částice (0,1–2 μm),
- hrubé částice (> 2 μm).

Nanočástice a velmi jemné částice vznikají za vysokých teplot v **motoru**, ve **výfuku** nebo **ihned po emisi spalin do atmosféry**. Jemné částice se tvoří různými chemickými procesy a hrubé částice vznikají mechanickou **abrazí povrchu vozovky, pneumatik a materiálů brzdového systému** (Palmgren et al. 2003).

Materiálem **brzdových destiček** dříve býval azbest ($\text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), poté byl nahrazen syntetickými aramidovými vlákny. **Azbest** je kvůli mechanické toxicitě zakázán – v ČR od roku 1999. Do skupiny karcinogenů byl v ČR zařazen v roce 1984 (směrnice hlavního hygienika MZ ČSR č. 64/1984 Sb.). Výroba, obchodování a používání azbestového materiálu jsou v Evropské unii zcela zakázány (Janeček 2014). Podle renomovaného zdroje (Braníš 2003) se ale azbest z abraze brzdových destiček do ovzduší uvolňoval i po tomto zákazu. Výskyt azbestu na brzdových destičkách však dnes bude naprosto minoritní, protože se obložení musí podle předpisů v zákonem stanovených lhůtách vyměňovat a kontrolovat, a tvrzení tedy může být téměř neplatné.

Některé **těžké kovy uvolňující se do atmosféry při brždění** lze najít i v brzdových kotoučích. **Brzdové kotouče** jsou složeny z různých poměrů uhlíku C, **manganu Mn**, křemíku Si, fosforu P, síry S a **chromu Cr**. U kotoučů sportovních automobilů může být příměs keramických částic (Hájek et al. 2016).

Materiálem **brzdového obložení** jsou také kovy. Najdeme je například v tzv. ocelové vlně nebo měděném prášku, plnivech (např. oxid železa, baryt, rozemletá slída, oxid hliníku), kluzný prostředek (např. koksový prášek, síran antimonitý, grafit), organické složky (pryskyřičná prášková plniva, aramidová vlákna, pryskyřičná pojiva) (Gscheidle et al. 2007).

Dalším, avšak **minoritním, zdrojem** znečištění atmosféry automobilovou dopravou je například **abraze kovových hrotů** na zimních pneumatikách. Z kovů se pro výrobu

pneumatik nejvíce používají tyto: kadmium Cd, měď Cu, olovo Pb a zinek Zn (Thorpe, Harrison 2008). **Olovo Pb** se také kdysi v podobě sloučenin na bázi olova: tetraethylolovo, tetramethylolovo) v kombinaci s bromovými sloučeninami ve velké míře přidávalo jako antidetonátor (chemická látka zabraňující klepání motoru, zvyšuje se jím oktanové číslo). Po spálení vznikaly těkavé halogenidy olova. Již delší dobu se však nesmí používat a bylo nahrazeno (MTBE: methyl terciárním butyl etherem) (Hromádko et al. 2011).

Zkoumáním emisí z dopravy technikou monitorování magnetických částic získáme nejen bližší informace o složení primárních emisí, ale na základě výsledků magnetické analýzy lze odvodit přímo zdroje kontaminace (Chaparro et al. 2010). V tabulce 2.1 jsou zobrazena množství emisí z dopravy v jednotlivých krajích za zkoumaný rok 2012.

Tab. 2.1 Množství emisí na území ČR za rok 2012, zdroj: REZZO.

Kraj	TZL	
	[t/rok]	%
Středočeský	7 780,0	16,5
Ústecký	7 365,8	15,6
Moravskoslezský	5 405,6	11,5
Jihočeský	3 704,0	7,8
Vysočina	3 337,3	7,1
Plzeňský	3 155,6	6,7
Královéhradecký	2 930,2	6,2
Pardubický	2 918,8	6,2
Jihomoravský	2 835,6	6,0
Olomoucký	2 115,6	4,5
Karlovarský	1 736,9	3,7
Liberecký	1 499,8	3,2
Zlínský	1 444,6	3,1
hlavní město Praha	961,1	1,9
celkem	47 190,9	100,0

Různí autoři (například Hunt 1986) zaznamenali **přítomnost magnetických částic v PM frakcích z emisí dopravních prostředků**. Tyto magnetické částice mají velký význam nejen pro svou souvislost s koncentracemi těžkých kovů, ale také kvůli svému nepříznivému vlivu na lidské zdraví. Drobné magnetické částice opět mohou být inhalovány plicemi a následně absorbovány lidskými tkáněmi. To má kromě již uvedených i další zdravotní důsledky

uplatňující se v mnohých biomedicínských tématech týkajících se výzkumu vlivů **lidské expozice magnetickému poli** (ať již silnému statickému, používanému k nukleární magnetické rezonanci, či slabším magnetickým polím vytvářeným systémy elektrické energie a mobilními telefony) (Kirschvink et al. 1992).

2.4 Emise z průmyslu

Průmyslové emise nazýváme též **emise z velkých zdrojů**. Těmito zdroji jsou vsázky vysokých pecí – **rudy, aditiva, železný šrot a hrubý prach z čištění vysokopecního plynu a koksu**. Emisemi z **železných rud** jsou především tuhé znečišťující látky **TZL, těžké kovy**, oxid siřičitý SO₂, oxidy dusíku NO_x, kyselina chlorovodíková HCl, kyselina fluorovodíková HF, oxid uhelnatý CO, organické látky (vyjadřují se jako celkový organický uhlík), polyaromatické uhlovodíky PAH, polychlorované dibenzodioxidy PCDD, polychlorované dibenzofurany PCDF a polychlorované bifenyly PCB (Vejvoda et al. 2003).

TZL vznikají při manipulaci se surovinami (mletí, třídění) a při jejich přepravě. Snižují se pomocí technologie zakrytování, odsávání a poté odlučováním. **Hrubý prach** (podle granulometrie o velikostech zrn do 100 μm), který vzniká na začátku sintrovací linky a uniká ze spodních vrstev pásu, má stejné složení jako vsázka. Bývá odlučován elektrostatickým odlučovačem. **Jemný prach** (0,1–1 μm) vzniká až po úplném odpaření vody během sintrovacího procesu, neboli procesu spékání, a obsahuje chloridy alkalických kovů a **olova** (Vejvoda et al. 2003).

Těžké kovy z průmyslové činnosti nalezneme zejména tyto: As, Cd, Hg, Ni, Pb a Cr ze spalování fosilních paliv, Fe, Mn, Cr, Ni, Cd z výroby a zpracování železa, při metalurgii neželezných kovů vznikají As, Cd, Cu, Pb, Zn, Hg, spalovny odpadu nejvíce produkují As, Cd, Cu, Pb, Zn, Hg. Dále uveďme ještě výrobu cementu: emise As, Cd, Pb, Hg, Ni a výrobu skla: emise As, Cd, Pb, Hg, Zn. Specifickým případem je elektrolytická výroba chloru a louhu, kdy se do ovzduší nejvíce uvolňuje Hg (ČHMÚ²).

Ve většině případů souvisejících se spalováním fosilních paliv je pozorována **přímá úměrnost mezi koncentrací magnetických minerálů a těžkých kovů** (olova Pb, zinku Zn, mědi Cu, kobaltu Co, niklu Ni atd.) ve znečišťující látce (Heller et al. 1998). Mezi koncentracemi magnetických kovů (především Fe) a ostatních kovů je také závislost, takže

z množství magnetometricky snadno stanovitelného Fe se dá usuzovat na koncentraci jiných kovů.

Při výrobě energie produkují spalovací procesy především arsen As, kadmium Cd, rtuť Hg, nikl Ni, selen Se, cín Sn a vanad V. Forma a množství těžkých kovů v palivu přímo ovlivňují množství těžkých kovů z paliva během spalování uvolněné. Je-li kov vázaný na organickou hmotu (biomasu), tak se většinou odpaří. Pokud je však kov vázán v hrubých minerálních částicích (popelovině uhlí), často se v popelu zachytí. **Množství uvolněných těžkých kovů je také ovlivňováno obsahem chloru Cl, síry S, vlhkostí paliva, oxidačně-redukčními podmínkami v ohništi, dobou zdržení částic v ohništi a jeho teplotou.** V devadesátých letech 20. století množství vzdušných emisí hlavních znečišťujících látek z průmyslu výrazně pokleslo. Stalo se tak především díky renovaci technologií a instalacím odsírovacích zařízení. Uvádí se, že v současné době emise z velkých zdrojů klesají, nebo se alespoň nemění (VeJVoda et al. 2003).

2.5 Meteorologické vlivy

Způsob a rychlost šíření emisí závisí na aktuálních meteorologických podmínkách. Ty jsou určeny: **teplotou, vlhkostí a tlakem vzduchu, rozptylovými podmínkami a povětrnostní situací.** Kvalitu ovzduší a rozptylové podmínky na území České republiky pravidelně hodnotí Úsek ochrany životního prostředí Českého hydrometeorologického ústavu ÚochŽP ČHMÚ. V roční zprávě ÚochŽP ČHMÚ nalezneme mimo koncentrace přízemního ozonu, oxidu siřičitého, oxidu dusičitého a oxidu uhelnatého také koncentrace suspendovaných částic PM10 a PM2,5.

Nejvyšší koncentrace PM10 v ovzduší bývají v chladných měsících. Souvisí to jak s **vyššími emisemi** částic ze sezonních tepelných zdrojů, tak se **zhoršenými rozptylovými podmínkami.** Ty jsou častější zimě než v jiných obdobích roku. Důsledkem bývají **smogové situace,** které ale mohou mít více příčin. Jednou z nich jsou vysoké koncentrace troposférického ozonu O₃. Podmínky pro vyhlášení varování stanovuje pomocí prahových hodnot Smogový a varovný regulační systém SVRS (ČHMÚ 2015).

(Inverze – nastává často v zimě, kdy nahoře je teplý vzduch, a dole u země vzduch studený. Pak nevzniká přirozené vertikální proudění a emise se drží při zemi. To je stav, kdy

by se neměla otevírat okna, a lidé by měli omezit pobyt venku, zejména děti, senioři a nemocné osoby. Ozon také hraje svou roli, ale především u emisí z dopravy, kdy ozon spolu s NO_x (oxidy dusíku) oxidují nespálené uhlovodíky CH, např. v létě při vysokých teplotách vzniká smog.)

Základními veličinami popisujícími klima jsou **vlhkost a teplota vzduchu**. Mezi oběma je velmi úzký vztah. Hodnota vzdušné vlhkosti vyjadřuje v podstatě množství vodní páry rozpuštěné ve vzduchu. Čím vyšší je teplota vzduchu, tím větší množství páry může vzduch pojmout.

Určujícími faktory odlišných teplotních a vlhkostních poměrů větších měst od poměrů v přírodě, na vesnici, či v menším městě jsou především:

- vyšší zastoupení povrchů odrážejících sluneční záření a zahřívajících vzduch (beton, asfalt, různé druhy kovů apod.),
- menší množství vegetace, která díky produkci a uvolňování vodní páry zvlhčuje a ochlazuje okolí,
- nižší zastoupení vodních toků a nádrží (zdroj vodní páry - zvlhčují a ochlazují okolí),
- vyšší počet lidí (stejně jako ostatní živočichové produkují teplo a vydechují vodní páru),
- zvýšený podíl dopravy a různých výrobních procesů (během spalovacího procesu vzniká teplo).

Celkové městské **klima** tedy **lze zlepšit** vysazováním zeleně, zakládáním vodních ploch a výstavbou objektů schopných pohlcovat sluneční záření a vypařovat vodu (tj. rozsáhlejší stavbou písčitých a šterkových cest nebo cest s porézní dlažbou namísto asfaltových a betonových stezek, ulic a silnic) (mestodokapsy.cz).

Relativní nebo také poměrná vlhkost vzduchu je nejpoužívanější charakteristikou vlhkosti vzduchu. Měří se pomocí vlhkoměru a vyjadřuje se jako bezrozměrná veličina v procentech (0–100 %). Udává poměr mezi parciálními tlaky vodní páry a nasycené vodní páry při dané teplotě. Nasycená vodní pára je v termodynamické rovnováze s rovným povrchem vody či ledu. Jde o procentní poměr skutečného množství páry ve vzduchu k maximálně možnému

množství při stejné teplotě. Například stoprocentní relativní vlhkost vzduchu znamená, že vzduch již nemůže pojmout více vodní páry a při snížení teploty se přebytečná část vodních par zkapalní (zapotí se sklo a vznikne rosa nebo jíní). S klesající teplotou vzduchu se snižuje maximální množství páry, které je vzduch schopen pojmout. Vzduch se stane relativně sušším nebo vlhčím, tj. změní se jeho relativní vlhkost (podle in-pocasi.cz, upraveno).

Komfortní a pro lidské zdraví bezpečná **vlhkost** venkovního vzduchu se pohybuje mezi 50-70 %. **Zvýšení prašnosti vzduchu**, způsobující dýchací **obtíže** (záněty horních cest dýchacích, zhoršení alergií na pyl a roztoče), nastává za relativní vlhkosti vzduchu nižší než 30 %. Vyšší relativní vlhkost vzduchu (nad 70 %) umožňuje snadnější růst plísní, což bývá také spouštěcím mechanismem pro rozvoj alergií (EEA 2013).

Teplota je mírou střední kinetické energie termického pohybu molekul (SZÚ 2012). Nejen inhalace polévatého prachu, ale i **teplota** vzduchu jako taková má vliv na lidské zdraví. Při déletrvajících vysokých teplotách se mohou projevit příznaky akutních poruch zdraví z horka (nevolnost až zvracení, průjmy, krvácení z nosu a úst, náhlé zrychlení a prohloubení dechu, prudké snížení pocení nebo diastolického krevního tlaku, změny barvy obličeje, mravenčení a brnění, bolesti hlavy, bolesti a křeče svalů). Ohroženy jsou hlavně malé děti a senioři (EEA 2013).

Kvalitu ovzduší ovlivňují, kromě vlastních zdrojů znečištění, teploty a vlhkosti také **rozptylové podmínky**. Ty jsou uváděny v rozptylových studiích. Součástí rozptylové studie je větrná růžice. K ní se přidávají informace o poloze lokality (geografických souřadnicích) a době zpracování, jméno autora růžice a popis způsobu, podle kterého byla počítána povětrnostní situace. Vše lze ještě doplnit o verzi modelu, podle kterého byla růžice sestavena. Pro vyloučení nežádoucích vlivů větších výkyvů meteorologické situace se doporučuje uvádět růžici z dat průměru povětrnostních hodnot za posledních 5 let. Je-li k dispozici jen větrná růžice odjinud než z posuzované lokality, je nutné uvést důvody použití růžice právě z této lokality a rozbor případného vlivu na přesnost výsledků (MŽP 2015).

Oxidy železa se snadno přenáší větrem do vzdálenosti několika desítek kilometrů od zdroje. Jejich přítomnost lze dokázat na kmenech a listech stromů, na budovách a jako shluky prachu uvnitř nich (až miliony magnetických částic v jednom gramu prachu) (Evans, Heller 2003).

2.6 Předchozí meteorologické a magnetometrické studie obsahu PM

v ovzduší

Měření Dominick et al. (2012) na základě studia vlivu teploty, relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru na průměrné denní koncentrace PM₁₀ došlo k závěrům, že vyšší koncentrace PM₁₀ se vyskytuje při vyšších teplotách vzduchu. Naopak při zvýšených relativních vlhkostech vzduchu a rychlostech větru bylo pozorováno snížení koncentrace PM. Data byla porovnávána na základě Pearsonova korelačního koeficientu. Měřilo se na čtyřech různých lokalitách (tři z nich se nachází v Malajsii a jedna na Borneu) po dobu tří let.

Tento trend potvrzují i jiná měření, ale jiné zdroje (Azmi et al. 2010) naměřily vysoké koncentrace PM₁₀ též při vyšších rychlostech větru. Snižování koncentrací PM₁₀ s vyšší vlhkostí vzduchu se zde vysvětluje tím, že vysoká relativní vlhkost vzduchu je obvykle spojena se srážkami – zde deštěm, který polutanty smývá z prostředí. Měření probíhala na třech různých lokalitách v Klang Valley v Malajsii po dobu jednoho měsíce.

Studie Bhaskar et al. (2010) měřila koncentrace látek v ovzduší na 13 místech ve velkém indickém městě Ahmedabad po dobu 4 let. Celkově se zde žádná souvislost s koncentrací PM a teplotou ani rychlostí větru nepotvrdila, resp. na lokalitách se ve dvou letech našla přímá a ve dvou letech nepřímá závislost. Statisticky významnou se ukázala jen souvislost mezi koncentrací PM a relativní vlhkostí – nepřímá závislost.

Giri et al. (2008) zaznamenali vyšší koncentrace PM₁₀ při snížené teplotě, to si vysvětlují souvislostí zvýšených emisí při ranní dopravní špičce. Studie zaznamenávala data v nepálském Kathmandu vždy v předmonzunovém, monzunovém a pomonzunovém období a v zimě. Různé studie – mezi nimi například Awang et al. (2000) potvrzují, že problémy s vysokými koncentracemi PM v ovzduší bývají nejvíce v obdobích sucha, a tedy závislost koncentrace PM v ovzduší bývá nepřímo úměrná vlhkosti vzduchu.

Už v roce 1953 dali Handy a Davidson základy teorii o přenosu částic, kdy částice mohou být unášeny větrem i několik stovek kilometrů od zdroje emise. Zaznamenali částice smogu o průměru více než 200 μm ve výškách nad 6 km v atmosféře v okolí Chicaga a ukázali, že konvekční proudy mohou unášet terestrický prach až do výšek 11 km. I velkým sféruším kovu o vysoké hustotě může trvat i několik hodin, než se dostanou z takových výšek.

Marié et al. (2010) na vzorcích prachových částic z argentinské dopravy potvrdili, že **magnetická měření jsou vhodná k mapování a identifikaci znečištění ovzduší z dopravy**. Na vzorky použili měření magnetické susceptibility κ , anhysteretické remanentní magnetizace ARM a izotermální remanentní magnetizace IRM a postupnou teplotní demagnetizaci. Spočítali a určili objemovou magnetickou susceptibilitu χ , anhysteretickou susceptibilitu κ_{ARM} , nasycenou izotermální remanentní magnetizaci SIRM a remanentní koercivitu H_{cr} a analyzovali poměry κ_{ARM}/κ , $-IRM_{(-300mT)}/SIRM$ a $SIRM/\kappa$. Ve vzorcích našli magnetické minerály, určili jejich rozložení a množství toxických kovů. Analýza složení vzorků potvrdila **přítomnost** především těchto toxických kovů **Ba, Cr, Cu, Zn, Cd a Pb**. Jejich **množství se používá jako ukazatel zatížení daného místa znečištěním z dopravy**. Navíc zjistili, že vzorky z brzdových destiček a polétavého prachu vykazovaly silný magnetický signál.

Magnetické vlastnosti prachové frakce jsou především **řízeny obsahem magnetitu**. Revuelta et al. (2014) provedli kombinovanou magneticko-chemickou studii patnácti denních stejných vzorků aerosolu frakce PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀. Nejvyšší koncentrace magnetitu byla pozorována ve frakci PM₁₀. Nízkoteplotní magnetické analýzy ukázaly, že vyšší nabození superparamagnetickou frakcí, pokud se ve vzorku vyskytují hrubé, multidoménné částice. Ty se mohou vyskytovat v podobě oxidovaných vnějších obalů hrubějších zrn. Byla pozorována závislost magnetických parametrů na koncentraci PM₁₀ z dopravy. Silné korelace, které najdeme u mědi **Cu** a antimonu **Sb**, předpokládají, že tyto asociace náležejí **abrazním emisím z brzd** spíše než emisím z výfukových plynů.

„Nasycená remanentní magnetizace M_s a hystereze κ_i se snižují spolu se zmenšující se velikostí prachové frakce. To znamená, že obsah magnetických částic se snižuje s klesající velikostí prachových částic PM.“ Hodnota σ roste s rostoucí velikostí PM (Revuelta et al. 2014).

3 Oxidy Fe a environmentální magnetometrie

Magnetické vlastnosti látek vycházejí z jejich atomové struktury a jsou odvozeny od jejich reakce na vnější magnetické pole. Všechny látky na Zemi reagují na vnější magnetické pole, protože jsou složeny z atomů, kolem jejichž kladně nabitého jádra obíhají záporně nabitě elektrony. Pro magnetometrické zkoumání životního prostředí jsou důležité ty minerály, které mají vysokou schopnost magnetizace neboli feromagnetické minerály. Čisté elementární železo je v terestrických vzorcích ojedinělé, protože zemská atmosféra (na rozdíl např. od povrchu Měsíce) má vysoký obsah kyslíku. Železo se tedy na Zemi detekuje nepřímo, a to určováním obsahu oxidů železa (Evans, Heller 2003).

Zdroje **oxidů železa** v životním prostředí jsou:

- litologické:
 - **zrna hornin** (např. bazaltů),
 - **změny geologických podmínek**, jejich následkem se částice erodují a transportují – povodími splaveny do moří a jezer, tvoří se sedimenty,
 - **mraky popela z vulkanických erupcí** – uvolňují minerální částice do atmosféry, **zrna uvolňující se do atmosféry v aridních oblastech** se přenáší větrem, mohou být ukládána opakovaně,
- biogenní/pedogenní:
 - **magnetotaktické bakterie** (biogenní zdroj) produkující čistý magnetit (o průměru desítek nm) používaný ke své navigaci, po smrti bakterie se organické části v organismu rozpadnou, ale magnetické částičky zůstanou,
 - **chemické a biologické půdní procesy** (pedogenní zdroje),
- uměle vytvořené:
 - **výsledky lidské činnosti** – spalování fosilních paliv a průmyslová činnost (např. výroba oceli)

(podle Evans, Heller 2003, upraveno podle Petrovský).

3.1 Oxidy Fe v životním prostředí

Dobrym zdrojem paleoenvironmentálních magnetických informací jsou **jezerní sedimenty**. Přestože jsou často limitovány relativně krátkým geologickým časem (např. posledních 10 000 let), jejich výhodou je, že poskytují velmi přesné časové rozlišení. V magnetickém záznamu lze proto dobře identifikovat i takové historické události jako odlesňování. Neméně důležitými ukazateli magnetických záznamů jsou **mořské sedimenty**. Uplatňují se při průzkumu životního prostředí, například při sledování variací magnetického obsahu sedimentů moří nebo při korelacích jejich magnetismu s klimaticky řízenými fluktuacemi v izotopech kyslíku ve schránkách mořských mikroorganismů. Množství magnetitu v oceánu závisí na klimatických podmínkách. Magnetická měření přímo v mořských vrtech poskytují vysoce rozlišenou magnetickou chronostratigrafii (Evans, Heller 2003).

Další magnetická měření minerálů se zabývají větrem navátým prachem neboli **spraši**. Změny magnetické susceptibility v profilech spraši a paleopůd odráží střídání klimatických období. V čínské spraši byly prvně evidovány dlouhotrvající klimatické cykly způsobené orbitálními silami (oběhem Země kolem Slunce). Změny magnetické susceptibility lze pozorovat ve vrstvách spraši až 22 mil. let zpět (Guo et al. 2002).

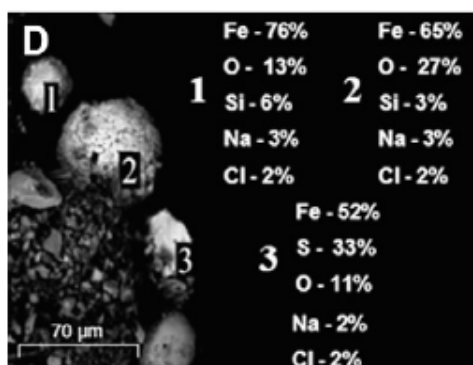
Magnetismus v přírodě se velmi často zjišťuje podle magnetometrie **půd**. Magnetismus půd je velmi rozmanitý. Svrchní vrstva půdy často vykazuje magnetickou susceptibilitu srovnatelnou nebo vyšší, než je magnetická susceptibilita podložních hornin, ze kterých se půda utváří. Někdy jsou příčinou tohoto fenoménu požáry, jindy běžné půdní procesy (pedogeneze) vytvářející nový magnetický materiál. Pedogeneze je řízena klimatickými podmínkami v geologické minulosti a její magnetický záznam je uložen v paleopůdách. Poněkud novějším odvětvím úspěšného uplatnění environmentálního magnetismu je **archeologie**. Variace půdního magnetismu umožňuje vyhledávání podpovrchových struktur (například v historii osídlených oblastí) a určuje zdroj stavebních materiálů (Evans, Heller 2003).

Nárůst magnetismu ve svrchních vrstvách půdy může být výsledkem různých procesů a zdrojů: fermentace, bakteriálního přispění, spalování, dehydratace lepidokrokutu, atmosférického spadu magnetických sférulí (podrobněji viz Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Původ oxidů Fe ve svrchních vrstvách půdy, podle Thompson, Oldfield (1986), * podle Oldfield et al. (1981), ** podle Maher (1984).

Mechanismus	Poznámky
Fermentace málo krystalické oxidy Fe -- redukce/oxidace ---> $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	pravděpodobně nejvýznamnější cesta zprostředkovaná výrobou Fe^{2+} redukujícími bakteriemi z Fe^{3+} , produkuje ultrajemný magnetit (10–40 nm) později náchylný k oxidaci na maghemit
Biologický zdroj bakteriální Fe_3O_4 z magnetotaktických bakterií	bakteriální magnetosomy jsou přítomné v mnoha půdách, ale ve srovnání s fermentačním procesem přispívají k nárůstu magnetismu půdy minimálně
Spalování $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ nebo αFeOOH -- redukce ---> Fe_3O_4 -- oxidace ---> $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	každá část reakce specificky závisí na obsahu železa, organického materiálu, teplotě hoření, porozitě zeminy atd.*
Dehydratace lepidokrokitu γFeOOH -----> Fe_3O_4	běžně v glejových půdách; objevuje se za zvýšených teplot (> 200 °C), také souvisí se spalováním
Atmosférický spad magnetických kulovitých částecek (sférulí) průmyslově vytvořené sférule $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ a Fe_3O_4	charakteristické kulovitým tvarem a oddělením od jílovité frakce zemin**

Relativně novým odvětvím průzkumu magnetických vlastností je **biomagnetismus**. Různé organismy, především bakterie, produkují magnetické minerály. Po zániku bakterií a rozpadu jejich biologické schránky poskytují tyto minerály informace o geomagnetickém poli doby rozpadu. Populace magnetotaktických bakterií žijí v půdách, jezerních sedimentech a ve větších hloubkách oceánů. Existují také náznaky, že fosilní bakteriální magnetit byl nalezen v meteoritu z Marsu (Evans, Heller 2003).



Obr. 3.3 Ukázka sférule (fotografie z elektronového mikroskopu SEM) a jejího chemického složení (podle spektrometrie) z magnetické frakce prachu u silnice akumulovaného na sněhu, zdroj: Bučko et al. (2011).

Jako poslední položku tohoto seznamu zdrojů magnetických částic, kterou se budeme dále podrobněji zabývat, uvedme částice z antropogenních zdrojů. Různí autoři (například Flanders 1994) zjistili, že **znečišťováním životního prostředí** vznikají snadno detekovatelné **magnetické signály**. V polétavém prachu a jeho spadu přítomné magnetické **sférule** (Obr. 3.3) lze sledovat pomocí moderních mikroskopických přístrojů.

3.2 Diamagnetismus, paramagnetismus, feromagnetismus

Klasické teorie diamagnetismu a paramagnetismu se poprvé objevily v roce 1905 v práci Paula Langevina (1872–1945). **Diamagnetismus** je vlastní všem materiálům, vzniká z interakce aplikovaného magnetického pole a pohybu elektronů obíhajících kolem atomového jádra. Elektrony přenášejí náboj, a proto jsou při pohybu magnetickým polem vystaveny působení boční Lorentzovy síly (Hendrik Lorentz 1853–1928).

Dodatečný pohyb, Larmorova precese (Joseph Larmor 1857–1942) osy elektronového orbitu kolem směru magnetického pole má pro účely měření tak malý efekt, že může být ve většině experimentů zanedbána. Obvykle bývá stonásobně menší než paramagnetismus a stotisícinásobně menší než feromagnetismus. Díky ní vzniká magnetický moment opačného směru, než má aplikované pole. (Při působení vnějšího magnetického pole je výsledkem pohyb elektronu proti směru hodinových ručiček po kruhové dráze okolo středu a ležící v rovině xy s vnějším mag. polem působícím ve směru $+x$. Pro polovinu dráhy, kde $x > 0$ bude Lorentzova síla paralelní s $-z$, pro druhou polovinu ($x < 0$) s $+z$. Proto se točivý moment tvoří paralelně s osou y a díky tomu se dráha oběhu chová jako setrvačnick – elektron obíhá okolo směru pole.)

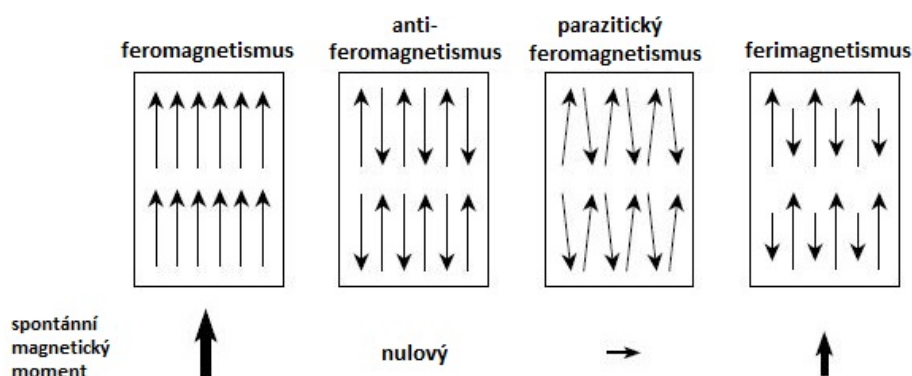
Křemen (SiO_2 , $\kappa = -X0 * 10^{-6}$) a spousta dalších minerálů přirozeně se vyskytujících v horninách a zeminách o záporné magnetické susceptibilitě jsou stejně jako voda diamagnetické. V určitých specifických případech je nutné při magnetometrické analýze zohlednit i diamagnetický signál, například u slabě magnetizovaných vodou nasycených sedimentů při zkoumání jezer.

Pro magnetická měření v životním prostředí jsou nejdůležitější feromagnetismus a paramagnetismus. Diamagnetismus je nezávislý na teplotě, ale **paramagnetismus a feromagnetismus se zvyšující se teplotou znatelně klesají**.

U paramagnetik stejně jako u diamagnetik obíhá elektron jak kolem vlastní osy, tak kolem atomového jádra, a má tedy kromě rotačního magnetického momentu i magnetický moment spinový. **Paramagnetika** však navíc obsahují elektrony s magnetickým momentem, který není kompenzován magnetickým momentem jiného elektronu. Atom paramagnetika má tedy celkový magnetický moment nenulový a **reagující na vnější magnetické pole**. Celkový magnetický moment atomu je vektorovým součtem všech elektronových momentů. Příkladem paramagnetických minerálů jsou amfibol, slída, pyroxen a olivín ($\kappa = X0-X 000 * 10^{-6}$).

Magnetizace paramagnetik indukovaná ve vnějším magnetickém poli roste lineárně a v polích s vysokou intenzitou dosahuje nasycení. Při poklesu intenzity pole je průběh vratný a po vypnutí pole je ve vzorku zbytková magnetizace – remanence – nulová.

Feromagnetismus, mnohem silnější než diamagnetismus a paramagnetismus, je **ovlivněn obsahem železa, niklu, kobaltu a oxidů železa**. V krystalové mřížce feromagnetických materiálů jsou přilehlé atomy dostatečně blízko sebe, takže se některé z elektronových orbitů překrývají a dochází k silným interakcím. Je to označováno jako výměnná vazba. (Kvůli nezaplňným 3d podmřížkám má atom železa základní magnetický moment 4 Bohrových magnetonů (Niels Bohr 1885–1962).) Podstatou feromagnetismu je **spontánní uspořádání magnetických momentů atomů, které nejsou vzájemně vykompenzovány** (Evans, Heller 2003). Obr. 3.4 znázorňuje nejznámější typy feromagnetického uspořádání vyskytující se jen při teplotách nižších než tzv. kritická teplota (T_c). Šipky znázorňují orientace a směry magnetických momentů.



Obr. 3.4 Schémata uspořádání atomových magnetických momentů jednotlivých druhů feromagnetismu, zdroj: Lowrie (2007).

Silná magnetizace vzniká, když všechny magnetické momenty atomu v mřížce nejsou nahodilé, ale uspořádané. Jde o tzv. **feromagnetismus** (sensus stricto), neboli čistý feromagnetismus.

Výměnná vazba může ale nabývat dalších konfigurací. Při **antiferomagnetismu** mají všechny atomové momenty stejnou velikost, ale sousední dva jsou vždy opačně orientovány, a i přestože mají silné výměnné vazby, výsledná magnetizace těchto materiálů je nulová. V některých případech ale kvůli vadám a prázdným místům v krystalové mřížce nebo mírnému odklonu atomových momentů vznikne slabá magnetizace, jev označujeme jako **parazitický feromagnetismus**. Posledním příkladem feromagnetického uspořádání (pod T_C) je **ferimagnetismus**, kdy krystalová mřížka obsahuje dva druhy uspořádání kationtů. Zobrazujeme jej pomocí delších a kratších šipek opačného směru (Evans, Heller 2003).

Kritická teplota je u feromagnetik a ferimagnetik nazývána **Curieova teplota** T_C , u antiferomagnetik **Néelova teplota** T_N . Po překročení kritické teploty se z fero-, feri- i antiferomagnetických látek stávají paramagnetické a jejich magnetická susceptibilita κ s teplotou klesá. Paramagnetické chování látek při teplotách nad T_C lze popsat Curie-Weissovým zákonem:

$$\kappa_m = \frac{C'}{T - \Theta}, \quad (3.1)$$

kde T je termodynamická teplota feromagnetika, Θ má rozměr teploty – u feromagnetik podobná Curieově teplotě T_C a C' je konstanta charakteristická pro daný materiál (apfyz.upol.cz). Magnetizace feromagnetik ve vnějším magnetickém poli se nazývá **hystereze** a její průběh se znázorňuje hysterezní smyčkou. Pro feromagnetika je typický nenulový makroskopický magnetický moment.

Podle magnetického chování lze dělit i jednotlivá minerální zrna, a to na: mnohadoménová MD, jednodoménová SD a pseudojeddodoménová PSD. MD zrna obsahují více domén, jednodoménová jen jednu. Pseudojeddodoménová zrna spadají mezi SD a MD, mají více domén, ale zároveň mnoho vlastností jednodoménových zrn (Evans, Heller 2003). Rozlišujeme také dvě důležité hranice velikosti magnetických zrn: hranici mezi ultrajemnými super-paramagnetickými zrny a malými jednodoménovými zrny a mezi multidoménovými a stabilními jednodoménovými zrny (Thompson, Oldfield 1986).

3.3 Minerály oxidů železa

Magnetit, maghemit a hematit jsou oxidy železa, které se v přírodě vyskytují nejčastěji. Tabulka 3.2 přibližuje tyto a další minerály oxidů železa, které se nejčastěji vyskytují v půdách.

Tab. 3.2 Oxidy železa v půdách (podle Maher 1986).

Minerál	Chemický vzorec	Magnetický statut	P: primární, S: sekundární	Výskyt, vznik
magnetit	Fe_3O_4	ferimagnet	P, S	zřídka, primárně nebo následkem hoření půdy
maghemit	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	ferimagnet	P, S	hojný ve vysoce erodovaných tropických/subtropických půdách
hematit	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	parazitický feromagnet	P, S	relativně suché, vysoce oxidované půdy, obvykle v oblastech s vyšší teplotou
goethit	αFeOOH	parazitický feromagnet	S	vlhké půdy, hojný v dobře odvodněných oblastech mírného klima
lepidokrokít	γFeOOH	paramagnet	S	špatně odvodněné půdy
ferihydrit	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	paramagnet	S	špatně odvodněné půdy a podzoly

3.3.1 Magnetit

Magnetit (chemický vzorec Fe_3O_4) je lesklý černý opakní **ferimagnetický minerál**. Je důležitým zdrojem železné rudy a nachází se jak ve vyvřelinách a sedimentech, tak v metamorfitech. Běžně se vyskytuje v nekonsolidovaných ložiskách a je hojně produkován určitými typy bakterií, kdy pomáhá k jejich navigaci podle magnetického pole Země.

Krystalograficky jde o krychli se strukturou spinelu. Atomy kyslíku tedy vytváří kubickou mřížku. Nacházejí se v každém rohu a uprostřed každé stěny krychle krystalu a tvoří základ krystalové mřížky (v součtu 14 aniontů: 8 v rozích a 6 uprostřed stěn, ale sdílením se sousedními se 6 redukuje na 4). Spontánní magnetizace magnetitu je 480 kA/m, jedná se tedy o nejvíce přirozeně magnetický minerál (Evans, Heller 2003).

Magnetit definují dvě důležité teploty: Curieův bod (Pierre Curie 1859–1906) a Verweyův přechod (E. J. W. Verwey 1905–1981). Curieův bod nastává při teplotě okolo +578 °C (Lowrie 2007), kdy tepelná energie přesáhne energii výměnných vazeb a minerál

přestává být ferimagnetický. Verweyův přechod je okolo $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a označuje změnu v krystalografické distribuci kationtů Fe, po které se z původní kubické struktury stane struktura monoklinická (Evans, Heller 2003).

3.3.2 Hematit

Hematit (označovaný vzorcem $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) je v přírodě často se vyskytující minerál. Nachází se v půdách a sedimentech významných pro životní prostředí a mnoha železných rudách. Pro paleomagnetická měření se používá hematit v červených pískovcích a břidlicích (tzv. červených ložiskách). Z důvodu **parazitického feromagnetismu** je celkový feromagnetismus minerálu jen slabý. Spontánní magnetizace nastává okolo $2,5\text{ kA/m}$ a je tedy cca 200x slabší než u magnetitu. Krystaluje v hexagonální soustavě.

Hematit je však termálně stabilnější než magnetit. Curieův bod nastává až za teplot okolo $+675\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ochlazením z Curieovy teploty magnetizace hematitu prudce narůstá a ustálí se okolo $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy nastává takzvaný Morinův přechod (podle Morin 1950) a hematit svůj parazitický feromagnetismus ztrácí (Evans, Heller 2003).

3.3.3 Maghemit

Maghemit ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) je plně oxidovaná forma magnetitu. Často se objevuje v zeminách. Má stejný chemický vzorec jako hematit, ale kubickou krystalovou strukturu a jiné magnetické vlastnosti, proto je označován odlišným řeckým písmenem před chemickým vzorcem. Maghemit může také vznikat nízkoteplotní oxidací magnetitu. Jde o vysoce magnetický minerál, $M_S \cong 450\text{ kA/m}$.

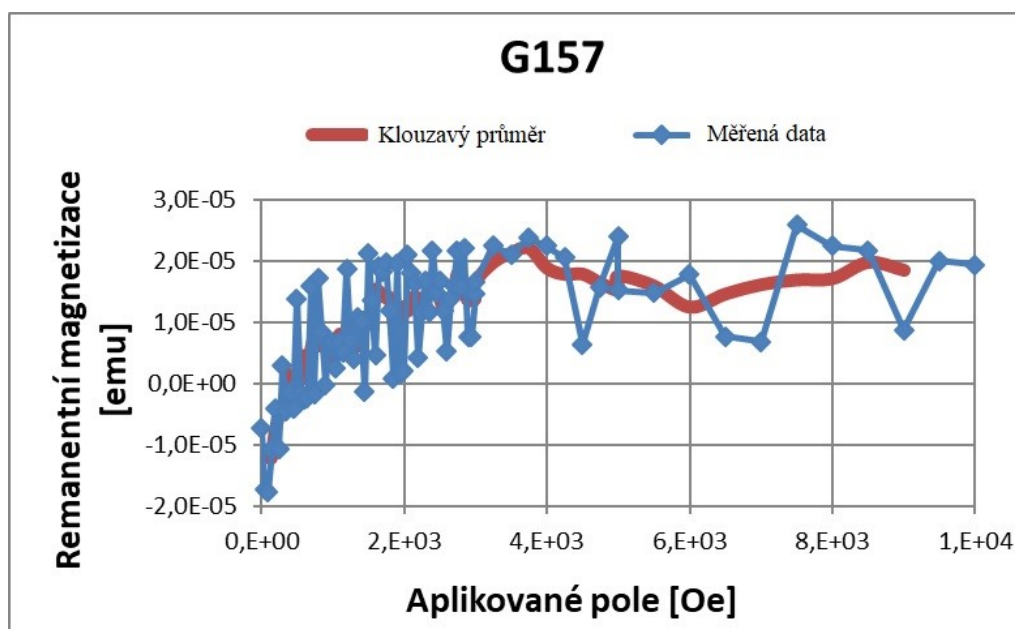
Proces oxidace z magnetitu probíhá tak, že dvě třetiny ze všech dvojjazebných iontů změni valenci z Fe^{2+} na Fe^{3+} . Zbývající třetina iontů v mřížce chybí (struktury postrádají kationt). Změna vazby a ztráta kationtů způsobují pokles spontánní magnetizace při pokojové teplotě na 380 kA/m (ze 480 kA/m pro magnetit) (Evans, Heller 2003). T_C maghemitu, cca $+675\text{ }^{\circ}\text{C}$, je obtížně stanovitelná, protože minerál je metastabilní: při zahřátí na $+300$ až $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ probíhá nevratná krystalografická změna na hematit následovaná výrazným poklesem magnetizace (Lowrie 2007). Stanovení této teploty je často pro účely identifikace

maghemitu důležitější než stanovení T_C . Je ale nutné data správně interpretovat, neboť inverzní teplota, za které nastává tato změna je vysoce proměnlivá: 250–900 °C (Evans, Heller 2003). Krystaluje v kubické soustavě.

3.4 Složení oxidů Fe

Složení oxidů železa v látce poskytuje cenné informace o životním prostředí v době jejího vzniku a existence. Z **teplotní závislosti magnetizace** nebo **teplotní závislosti magnetické susceptibility** se určuje teplota Curieova bodu T_C . Určení typů oxidů železa do značné míry spoléhá na strukturně–fyzikální metody jako rentgenová fluorescenční analýza a Mössbauerova spektroskopie.

Avšak **k identifikaci i malých koncentrací oxidů Fe** lze použít i výsledky magnetometrických analýz. K tomuto účelu se nejčastěji používají termomagnetická měření (měření teplotní závislosti na magnetizaci), **měření magnetizace** a měření magnetické susceptibility. V těchto případech se detekuje kritická teplota Curieova přechodu T_C pro magnetit a Néelova teplota T_N pro hematit, popřípadě **teplota charakteristických přechodů**: Verweyova přechodu při -150 °C u magnetitu a Néelova přechodu při cca -15 až -20 °C u hematitu (Evans, Heller 2003).



Obr. 3.6 Ukázka DCD křivky (emu = elektromagnetický jednotka, elektromagnetická jednotka; 1 emu/g = 1 Am²/kg), zdroj: vlastní data.

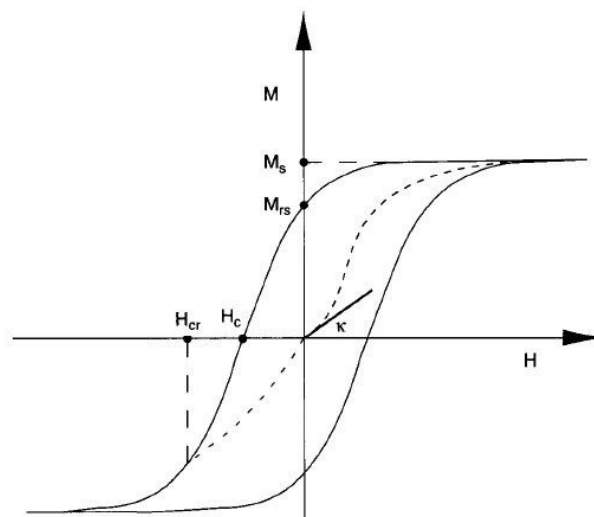
K přibližnému určení **zastoupení magneticky tvrdé** (např. antiferomagnetické) a **magneticky měkké** (např. feromagnetické) **fáze** v látce se dále využívá například **dekompozice křivky nabytí remanentní magnetizace: DCD křivky** (Obr. 3.6) (Kruiver et al. 2001). Magneticky tvrdé látky zůstávají magnetické i po odstranění vnějšího magnetického pole. Magneticky měkké látky jsou látky, které jsou magnetické jen po dobu vystavení vnějšímu magnetickému poli.

3.5 Koncentrace oxidů Fe

Magnetické metody jsou extrémně citlivé zejména na **přítomnost feromagnetických minerálů**. Například magnetická susceptibilita je přímo úměrná koncentraci magnetitu již od 0,01 % jeho zastoupení ve zkoumané látce.

Z hysterezní křivky (Obr. 3.7) lze zjistit:

- příspěvek dia/paramagnetické části materiálu pomocí hodnot magnetické susceptibility ve vysokém vnějším magnetickém poli,
- nasycenou magnetizaci M_s ,
- nasycenou zbytkovou magnetizaci M_{rs} ,
- magnetickou susceptibilitu κ a koercitivní sílu H_c .



Obr. 3.7 Hysterezní křivka, H = intenzita magnetického pole, M = magnetizace vzorku, M_s = nasycená magnetizace, M_{rs} = remanentní magnetizace, H_c = koercitivní síla, H_{cr} = koercitivita remanence (mag. pole potřebné k redukci M_{rs} na nulu), κ = mag. susceptibilita, zdroj: *Evans, Heller (2003)*.

Za předpokladu přítomnosti významného množství **magnetitu/maghemitu** (obvykle alespoň 0,1 % vzorku) lze jejich koncentraci zjistit **odečtením lineární části** hysterezní křivky **nasyčené magnetizace M_s** . Lineární pokračování hysterezní křivky při nasycené magnetizaci totiž ukazuje na přítomnost **paramagnetické a diamagnetické látky**. Stejně tak hodnota počáteční **magnetické susceptibility vzorku s magnetitem/maghemitem** (i ve velmi malých množstvích, cca 0,1 %) závisí přímo úměrně na **koncentraci těchto magnetických minerálů**. Výchozí magnetická susceptibilita je určena sklonem křivky M/H při počáteční slabé intenzitě magnetického pole. Zmíněné postupy se často používají zejména při terénním mapování magnetické susceptibility povrchových vrstev půd.

Parametry závislémi přímo úměrně na koncentraci magnetické látky jsou objemová magnetická susceptibilita χ , **nasyčená izotermální remanentní magnetizace SIRM a nasyčená magnetizace M_s** . Zkoumaný vzorek dosahuje SIRM při vystavení se sytícímu magnetickému poli za stabilní teploty – obvykle pokojové. **Měření χ , M_s a SIRM** se uplatňuje například při **sledování a studiu** změn klimatu, fluktuace hladiny podzemní vody, pedogenních procesů a **průmyslového znečištění** (Evans, Heller 2003).

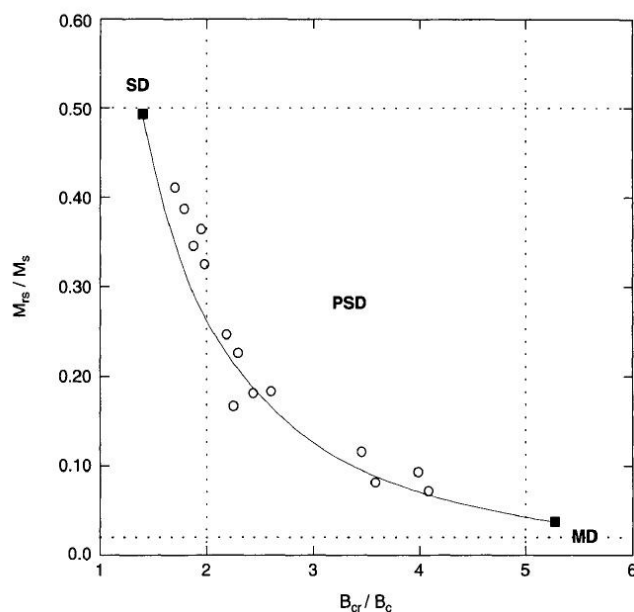
3.6 Velikost částic

Většina parametrů (vyjma nasyčené magnetizace M_s) zjištěných z hysterezní křivky **závisí** kromě složení a koncentrace **také na velikosti částic**, což komplikuje interpretaci měření. Pro lepší interpretaci výsledků se proto používají metody biparametrických poměrů, které odrážejí rozdělení velikosti zrn magnetických částic. Větší magnetické částice mají obecně nižší poměr anhysteretické remanentní magnetizace ARM ku SIRM (Evans, Heller 2003).

ARM vzniká při demagnetizaci vzorku (tzv. magnetickém čištění) střídavým magnetickým polem za přítomnosti slabého magnetického pole, tím bývá nedokonalé stínění vnějšího pole během tohoto procesu (Blecha 2013). ARM je citlivá na magnetit v oblasti stabilních jednodoménových zrn.

Další metodou pro posouzení relativního rozdělení velikosti částic magnetitu/maghemitu je sestavení **Dayova diagramu** (Obr. 3.8). Podle tohoto konkrétního diagramu částice s jednodoménovým SD chováním spadají do oblasti definované $M_{rs}/M_s \geq 0,5$ a $B_{cr}/B_c \leq 1,5$;

částice s mnohadoménovým MD chováním do oblasti $M_{rs}/M_s \leq 0,05$ a $B_{cr}/B_c \geq 5,0$; mezi nimi je zóna s částicemi vykazujícími PSD chování (Evans, Heller 2003).



Obr. 3.8 Ukázka Dayova diagramu, zdroj: Dunlop (2002).

Při běžném měření je nejčastější variantou Dayův diagram, u něhož částice s SD chováním spadají do oblasti definované $M_{rs}/M_s \geq 0,5$ a $H_{cr}/H_c \leq 1,5$ a částice s MD chováním do oblasti $M_{rs}/M_s \leq 0,05$ a $H_{cr}/H_c \geq 4,0$, s mezioblastí s částicemi o PSD chování (M_{rs}/M_s od 0,05 do 0,5 a H_{cr}/H_c od 1,5 d 4,0), u kterého nepropojujeme naměřené hodnoty do křivek, protože jednotlivé částice jednoho vzorku většinou vykazují podobné fyzikální vlastnosti, a v diagramu se tedy projevují jako shluky bodů (spadající do některé z oblastí nebo rozesté v okolí některé z hranic) (podle Petrovský 2014).

Pro SP magnetit je magnetická susceptibilita závislá na frekvenci magnetického pole. Běžně používané zařízení Bartington měří na dvou frekvencích: 470 Hz a 4700 Hz. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami magnetické susceptibility se normuje hodnotou při nižší frekvenci a udává relativní pokles susceptibility vyjádřený v %. Hodnoty nad 4 % obvykle ukazují na významný podíl SP magnetitu. Sofistikovanější přístroje umožňují měření frekvenčně závislé susceptibility v širokém frekvenčním spektru (např. 10–10 000 Hz), takže

zrna pod hranicí SD-SP lze dobře odlišit, zejména pak v kombinaci s nízkoteplotními měřeními (Worm, Jackson 1999).

3.7 Tvar částic

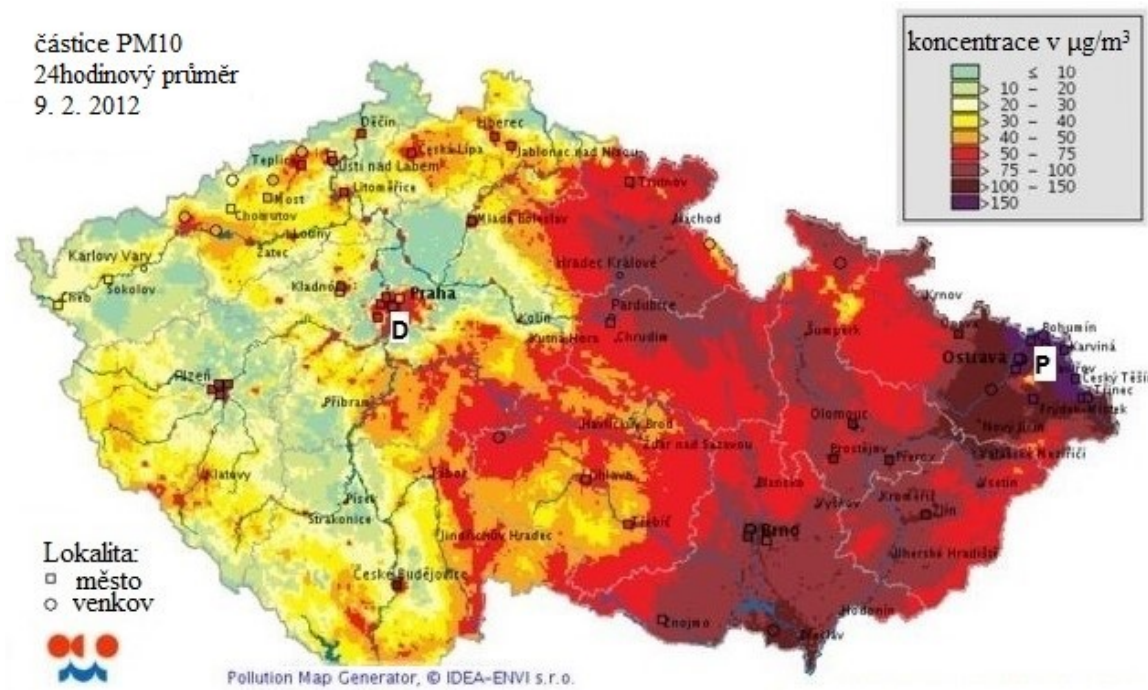
Tvar částic může pomoci určit **jejich původ**. Skutečný tvar částic lze zjistit pouze analýzou mikroskopických obrazů pomocí optické mikroskopie nebo analýzami provedenými skenovacím elektronovým mikroskopem SEM. Například Bučko et al. (2011) podle SEM analýz zjistili, že hranaté částice o velikostech 1–300 µm složené z Fe, Cr a Ni pocházejí z dopravy, ale pravděpodobně nepatří k emisím z výfukových plynů.

Měření Thorpeho a Harrisona (2008) uvádí, že sférule železa s průměrem 2–70 µm nejspíš pocházejí z průmyslových procesů nebo vytápění domů. Ultrajemná SP zrna magnetitu pocházejí zpravidla z pedogenních procesů. **Velká pravidelná zrna** reflektující symetrii mřížky jsou typická pro **částice litogenního původu**. **Sférické částice** (jako na Obr. 3.3) bývají typické pro **rychlé ochlazování taveniny** (např. při **spalování fosilních paliv**).

4 Lokality odběru vzorků prachových částic

První lokalitou odběru vzorků polévatého prachu byl **Pražský okruh** v místě u **Komořanského tunelu** (na obrázku Obr. 4.1 pod označením D jako „doprava“). Lokalita byla speciálně vybrána tak, aby primárním zdrojem polévatého prachu byla automobilová doprava.

Druhou lokalitou sběru polévatého prachu z ovzduší byla městská část **Ostrava-Bartovice** (na obrázku Obr. 4.1 pod označením P jako „průmysl“), kde se předpokládalo, že na vysoké koncentraci polévatého prachu v ovzduší bude mít největší podíl průmyslová činnost nedalekých ostravských hutí (oceláren a popř. i vzdálenějších Vítkovických železáren).



Obr. 4.1 Schematická mapa znečištění ČR částicemi PM10, denní průměr pro 9. 2. 2012 s vyznačením zájmových lokalit, D = lokalita mapující dopravní znečištění (Praha, Komořany), P = lokalita mapující průmyslové znečištění (Ostrava, Bartovice), zdroj: ČHMÚ (2012), upraveno.

Na schematické mapě (Obr. 4.1) lze vidět umístění zájmových lokalit a jejich znečištění přímo v jednom z emisně kritických dnů února 2012.

4.1 Lokalita 1: Pražský okruh u Komořanského tunelu

Komořanský tunel (dříve také Cholutický či Komořansko–cholutický tunel) patří k jižnímu segmentu Pražského silničního okruhu (úsek Vestec – Lahovice). Stavba překonává převýšení z údolí řeky Vltavy od křižení Komořanské ulice mezi Komořany a Závistí do prostoru u Cholutic a Točné. Skládá ze dvou tunelových trub: jižní stoupající (délky 1 937 m) o třech jízdních pruzích a severní klesající (délky 1 972 m) o dvou jízdních pruzích.



Obr. 4.2 Schematické znázornění polohy Komořanského tunelu (vynačen černým obdélníkem) vzhledem k Praze a dálnicím D1 a D5, zdroj: SZ (2012).

Západně od Komořanského tunelu se nachází Radotínský most. Východně, směrem k budoucí křižovatce dálnice D3 a Vestecké spojky, navazuje úsek v zářezu (Wikipedia.cz). V tomto východním úseku (Obr. 4.3 a Obr. 4.4) probíhal odběr vzorků.



Obr. 4.3 Východní část Komořanského tunelu, místo odběru vzorků Pražského okruhu vyznačeno šipkou, zdroj: SZÚ (2012).



Obr. 4.4 Místo odběru vzorků Pražského okruhu, před východní částí Komořanského tunelu, v popředí 4 zařízení na odběr vzorků, zdroj: SZÚ (2012).

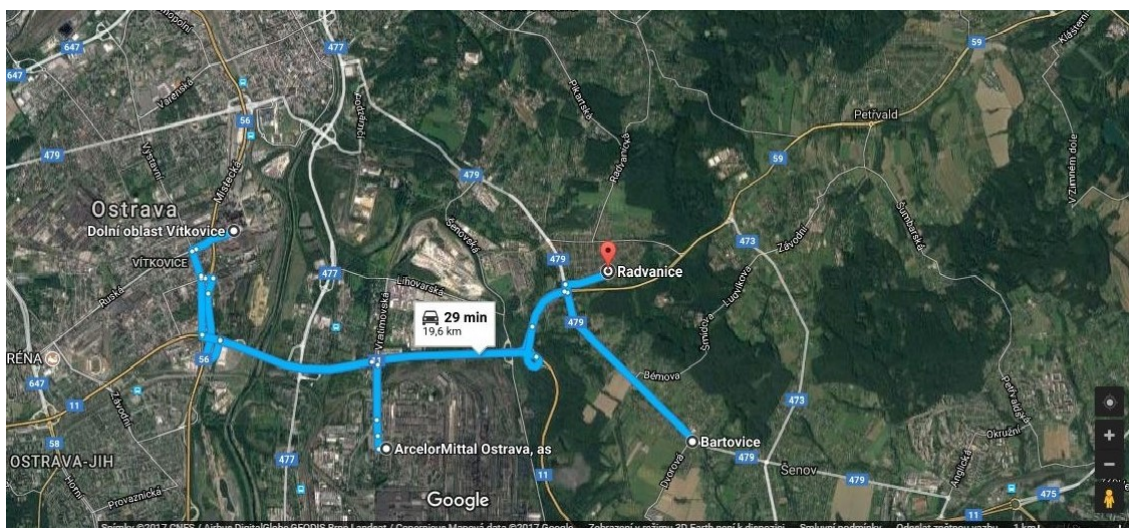
„Lokalita Cholupice u Prahy – výstup Komořanského tunelu ve směru na dálnici D1 byla vybrána jako modelová oblast pro řešení části grantového projektu Grantové agentury AV ČR (registrační číslo: IAA300120903) s názvem „Magnetická speciace atmosférických částic PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀ z míst s různou kvalitou ovzduší“. Dopravou, respektive liniovým zdrojem znečištění ovzduší, zatížená lokalita ležící na hraně emisního prostoru pražského okruhu

s intenzitou dopravy na úrovni 20 až 45 tisíc vozidel za den, vyhovuje požadavkům definovaným při přípravě projektu“ (SZÚ 2012).

Důvodem výběru tohoto místa pro účely monitoringu znečištění ovzduší z automobilové dopravy byla jeho výhodná pozice. Nejen že se místo měření nachází přímo u dálnice, ale jeho vhodnost je utvrzena pozicí v zářezu, a tak větry, které by mohly znečištění polévatým prachem z dopravy rozfoukat, nemají přímo u silnice ve výškách do dvou metrů, ve kterých se nacházela monitorovací zařízení, skoro žádný vliv. A tedy působení znečištění ovzduší prachovými částicemi z jiných zdrojů je zcela zanedbatelné. Primárním zdrojem znečištění PMX je zde tedy automobilová doprava.

4.2 Lokalita 2: Ostrava-Bartovice

Druhou lokalitou odběru prachových částic byla **Ostrava-Bartovice**. Tento městský okruh o rozloze 1 665,92 ha zahrnuje celá katastrální území Bartovic a Radvanic na jihovýchodě statutárního města Ostrava (ČSÚ 2013). Lokalita je od centra ostravských hutí, Dolní oblasti Vítkovic vzdálená vzdušnou čarou 5 km (Obr. 4.5).



Obr. 4.5 Mapa míst odběrů: ostravských vzorků (Ostrava-Bartovice) a meteorologických parametrů (Ostrava-Radvanice), zdroj: google.maps.com.

Hlavním důvodem pro vybrání této lokality pro monitoring znečištění ovzduší oxidy železa a těžkými kovy z průmyslu bylo, že tato městská část dlouhodobě patří mezi lokality

s nejhorším ovzduším v Evropské unii* (WHO¹, idnes.cz). Oblast leží jihovýchodně od ostravských průmyslových závodů a hutí (ocelárny, strojírna, slévárny, železárny). Navíc vítr nejčastěji fouká z tohoto směru, což bylo také důvodem k vybrání této lokality k odběru vzorků polétavého prachu.



Obr. 4.6 Pohled na ostravské hutě, zdroj: idnes.cz¹.

* Například za rok 2014 byl emisní limit nejvíce překračován na stanicích Ostrava/Karviná/Frydek–Místek (O/K/F–M) (průměrně 38,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) a Kladno–Švermov.

Tab. 4.2 Meteorologické parametry v Ostravě–Radvanicích a časy odběrů jednotlivých PM filtrů, zdroje: GFÚ AV ČR, SZÚ Ova, vlastní výpočty.

Filtr PM10	Filtr PM1	2012	čas odběru [hh:mm]	minut	ČHMÚ čas [hh:mm]	p [hPa]	w [%]	t [°C]	v _{vitr} [m/s]	směr větru
G180	G181	30. 1.	8:50–18:55	605	9:00–19:00	1031,0	65,67	-10,25	1,75	SV (VSV)
G178	G179	30. 1. – 31. 1.	18:55–7:00	715	19:00–7:00	1030,8	78,26	-13,86	1,03	SV (VSV)
G176	G177	31. 1.	7:05–19:05	720	7:00–19:00	1029,4	71,60	-12,76	1,37	SV (VSV)
G174	G175	31. 1. – 1. 2.	19:15–7:15	720	19:00–7:00	1028,4	75,71	-14,08	0,92	SV
G172	G173	1. 2.	7:45–19:00	675	8:00–19:00	1028,6	70,27	-14,17	2,23	SV
G170	G171	1. 2. – 2. 2.	19:15–7:15	720	19:00–7:00	1028,9	76,77	-16,82	1,65	SV
G168	G169	2. 2.	7:45–19:25	700	8:00–19:00	1029,2	71,78	-15,65	1,35	S
G166	G167	2. 2. – 3. 2.	19:45–7:07	692	20:00–7:00	1029,7	78,55	-17,70	0,90	SV (SSV, VSV)
G164	G165	3. 2.	7:10–19:05	715	7:00–19:00	1030,0	63,74	-15,98	1,75	SV (VSV)
G162	G163	3. 2. – 4. 2.	19:10–7:05	715	19:00–7:00	1031,7	73,34	-18,20	1,30	SSV
G160	G161	4. 2.	7:20–19:20	720	7:00–19:00	1031,2	67,49	-16,44	1,70	SSV
G158	G159	4. 2. – 5. 2.	19:20–7:20	720	19:00–7:00	1030,5	64,06	-14,98	1,51	SV (SSV)
G156	G157	5. 2.	7:25–19:00	675	7:00–19:00	1030,2	57,96	-13,21	2,12	SV (VSV)
G154	G155	5. 2. – 6. 2.	19:05–7:00	715	19:00–7:00	1029,9	74,63	-15,49	1,19	SSV (i VSV)
G152	G153	6. 2.	7:05–19:05	720	7:00–19:00	1028,8	72,80	-14,48	1,66	S (SSZ, SSV)
G150	G151	6. 2. – 7. 2.	19:05–7:05	720	19:00–7:00	1028,0	74,53	-13,63	2,15	SV (SSV)
G148	G149	16. 2.	9:30–18:55	685	9:00–19:00	1013,8	83,01	-2,91	1,85	SSZ
G146	G147	16. 2. – 17.2.	19:10–7:00	710	19:00–7:00	1016,5	84,59	-3,11	1,44	Z či ZJZ (SZ až ZJZ)
G144	G145	17. 2.	7:05–19:05	720	7:00–19:00	1012,2	92,99	-1,25	1,93	JZ (mírně i ZSZ)
G74	G143	17. 2. – 18. 2.	19:10–7:00	710	19:00–7:00	1014,8	88,33	1,31	1,42	Z (ZJZ až ZSZ)

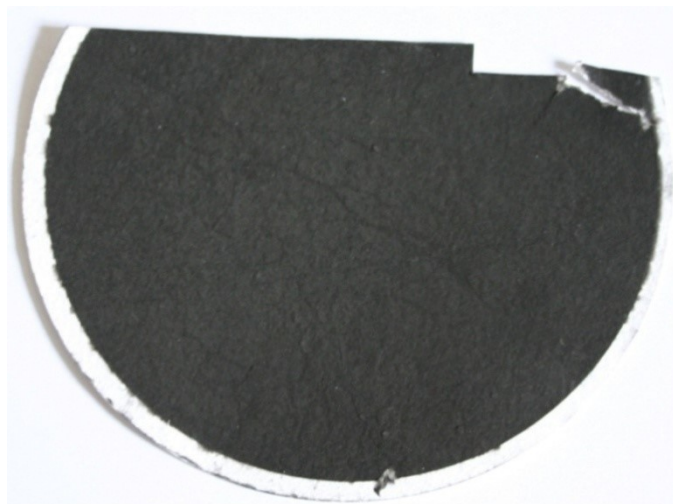
* poznámka: čas je ve středoevropském čas. pásmu: GMT + 2h; GMT = světový čas

5 Měření

5.1 In situ měření koncentrací polévatého prachu v ovzduší

Prachové částice byly zachytávány na **filtry pro různé velikostní frakce částic: PM1, PM2,5, PM10 a TSP** při měření znečištění u Pražského okruhu a na filtry PM1 a PM10 při měření emisí v Ostravě. K odběru byla použita zařízení Digitel FH78 (Obr. 4.2, před tunelem). Každý filtr sbíral prach přibližně po dobu půl dne, tedy vždy okolo 12 hodin (podrobnější informace o časech odběru ostravských vzorků v tabulce 4.2).

Celkem bylo odebráno **71 vzorků polévatého prachu: 31 na lokalitě u Komořanského tunelu** (8 PM1, 8 PM2,5, 8 PM10 a 7 TSP) a **40 vzorků v Ostravě-Bartovicích** (20 PM1 a 20 PM10). Terénní měření probíhala v roce 2012 a jsou tedy převzata. Na lokalitě u Komořanského tunelu probíhalo měření od 23. 7. do 27. 7. 2012. Na lokalitě Ostrava–Bartovice se měřilo v obdobích 30. 1. – 7. 2. 2012 a 16. 2. – 18. 2. 2012. Vstupními daty pro analýzy tedy jsou jak měření z různých zdrojů emisí, tak měření v různých ročních obdobích. Pro ostravská měření jsou k dispozici údaje ČHMÚ o tlaku, vlhkosti a teplotě vzduchu a rychlosti a směru větru z nedaleké lokality Ostrava-Radvanice.



Obr. 5.1 Část filtru PM10 vystaveného po 12 hodin emisím z průmyslu na lokalitě Ostrava-Bartovice (přibližné zmenšení fotky oproti realitě: 0,7x), foto: RNDr. E. Petrovský, CSc.

Obr. 5.1 ukazuje jeden z filtrů z lokality u ostravských hutí po dvanácti hodinách zachytávání emisí. Pro srovnání: čistý filtr před vystavením se emisím měl bílou barvu, která je nyní patrná jen na jeho okraji (kde se polévatý prach nezachytával).

5.2 Laboratorní analýzy filtrů PM částic

5.2.1 Informace o použitých metodách a přístrojích

XRF spektrometrie nebo také **rentgenofluorescenční analýza** či zkráceně **XRF** je jednou nejpoužívanějších metod při průzkumu chemického složení látek. Analýza XRF je nedestruktivní, nevyžaduje žádnou nebo velmi omezenou přípravu vzorků, avšak analyzuje pouze povrchovou vrstvu předmětu a **výsledek analýzy proto může být zkreslen** (např. **korozní vrstvou na povrchu studovaného materiálu**). Metoda se používá při stanovování širokého rozsahu prvků – od sodíku $_{11}\text{Na}$ po uran $_{92}\text{U}$ a na vzorky různých skupenství. Nejrychlejší bývá analýza pevné fáze. **Citlivost** na koncentrace prvků je již od **X ppm** (několika jednotek ppm) a koncentrace lze měřit až do 100% nasycení.

Primární rentgenové **záření RTG** dopadající na analyzovaný vzorek **ionizuje** jeho **atomy**. Dopad RTG záření vyrazí elektrony z vnitřních obalových slupek atomů (K, L, M, N). Další **elektrony přeskakují z vyšších hladin na uvolněná místa po vyražených elektronech**. **Při přeskoku je uvolněno charakteristické fluorescenční RTG záření**. XRF sleduje toto sekundární RTG záření a výsledkem měření je **čárové spektrum**, které přiřazuje každé vlnové délce (vlnově–disperzní analýza WLD–XRF) či energii (energieově–disperzní analýza ED–XRF) počet pulsů za sekundu (imp/s), tedy počet elektronů přeskakujících na vnitřní obalové slupky.

XRF závisí na složení matrice vzorku. **Vliv tedy má jak fyzikální stav látky: její skupenství a granulace, tak chemické složení matrice, které ovlivňuje sekundární absorpci charakteristického záření stanovovaného prvku prvky matričními (doprovodnými)**. Matriční prvky také mohou rušit stanovení svým charakteristickým zářením a absorbcí primárního záření rentgenky.

Spektrometry zkoumají **prvkové chemické složení** látky měřením: spektra odraženého světla a jeho absorpce v látce nebo též spektra světla vznikajícího ve vzorku po vnější excitaci (plazmou, jiskrou, RTG zářením atd.), neboť spektrální vlastnosti chemických prvků se liší spolu s rozdílností chemických vazeb (wikipedia, enpedie.cz).

K měření magnetických vlastností filtrů poléťavého prachu byl použit vibrační vzorkovací magnetometr VSM (Obr. 5.2). **Vibrační vzorkovací magnetometr VSM** (VSM z anglického názvu “vibrating sample magnetometer”) patří k nejvhodnějším zařízením pro měření magnetické hystereze pracujícím na principu **indukce**. VSM **vibruje vzorek v**

homogenní oblasti laboratorního **pole tvořeného elektromagnetem**. Výsledný magnetický moment vyvolává odpovídající signál ve snímacích cívkách.

Maximální magnetické pole 2,2 T závisí na vzdálenosti pólů elektromagnetu. Vysoká citlivost umožňuje měřit velmi nízké koncentrace feromagnetik (okolo X ppb). Nejvíce se používá pro měření hysterezních vlastností environmentálních vzorků. Má vysokou citlivost a kapacitu pro hysterezní měření. Lze s ním měřit při velkém rozmezí teplot.



Obr. 5.2 Vibrační vzorkovací magnetometr VSM (ADE Corporation, USA) v laboratoři Geofyzikálního ústavu AV ČR, *foto: RNDr. E. Petrovský, CSc.*

Magnetizace vzorku se detekuje jako napětí ve snímacích cívkách. Napětí generované vibrováním (změnou pozice) vzorku na dané frekvenci v systému cívek vyvolá změny proudu ve snímacích cívkách. Při běžné konfiguraci VSM je vzorek vibrován kolmo ke směru působení siločar magnetického pole. Průběh de/magnetizování vzorku znázorňují grafy hysterezních smyček a demagnetizačních křivek DCD (Evans, Heller 2003). Příklad ADE EV9 VSM pracuje v magnetickém poli od $-2,6$ do $+2,6$ T při teplotách do 750 °C a rozlišení pole od 0,001 do 1 Oe s šumem (RPM) od 0,004 do 0,05 Oe. Přesnost magnetického momentu se pohybuje v rozmezí ± 1 % + šum (Petrovský 2014).

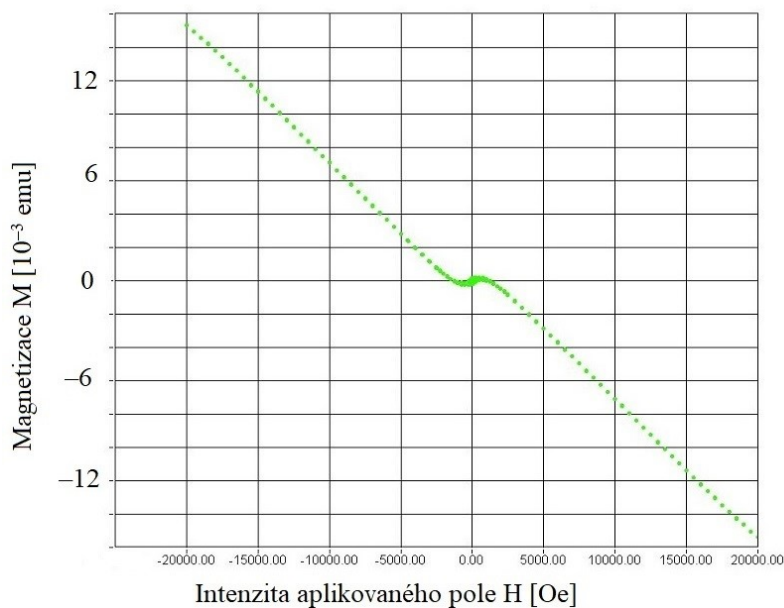
Výchozími magnetometrickými daty jsou parametry získané z hysterezních smyček (ukázka na Obr. 5.4) měřené vibračním magnetometrem. **Hysterezní smyčky** znázorňují

průběh magnetizace látky M v závislosti na intenzitě vnějšího magnetického pole H . M se uvádí buď v jednotkách Am^2/kg anebo v emu (electromagnetic unit). Vibrační magnetometr v tomto průzkumu udává výsledné hodnoty M v emu/g a H v Oerstedech.

Jednotky lze převést:

$$1 \text{ Am}^2/\text{kg} = 1 \text{ emu/g}, \quad (5.1)$$

$$1 \text{ A/m} = 12,75 \text{ Oe}. \quad (5.2)$$



Obr. 5.3 Hysterezní smyčka – před odečtením signálu prázdného filtru a lineární části určující podíl diamagnetické a paramagnetické složky, zdroj: vlastní data.

5.2.2 Metodika a zpracování měření

V laboratorních podmínkách Geofyzikálního ústavu AV ČR byly vzorky filtrů s polétavým prachem podrobeny **spektrometrickým** a **magnetometrickým** a **váhovým analýzám**. Spolu s obdrženými filtry byla k dispozici i data o jejich hmotnostech před (H_{filtr}) a po expozici polétavému prachu (H_1) a hmotnost navážky H_{PN} (v miligramech), kde:

$$H_{\text{PN}} = H_1 - H_{\text{filtr}}. \quad (5.3)$$

K tomu byly k dispozici i již spočtené koncentrace prachu v mikrogramech na m^3 .

Z těchto koncentrací se vycházelo při zpracování výsledků energiově-diperzních spektrometrických (ED–XRF) měření.

K účelům analýzy pomocí XRF spektrometrie byl použit spektrometr Niton XL3t GoldD+ (Obr. 5.4). Filtry PM byly vloženy vždy po jednom do spektrometru, který zaznamenal hodnoty koncentrace chemických prvků. Každý filtr (kromě 2 výjimek) byl měřen minimálně na deseti rozdílných místech na filtru. Každé jednotlivé měření trvalo 90 sekund (tj. min. 900 s/filtr čistého času měření).



Obr. 5.4 Rentgenfluorescenční spektrometr, Niton XL3t GoldD+, celkový pohled a detail výstupu monitoru, zdroj: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/10131166>.

Pro kalibraci měření: porovnání a odečtení chybových hodnot „čistého“ filtru (tedy kovové frakce na filtrech nepoužitých k odběru prachových částic) se ke všem 71 analyzovaným filtrům přidaly i dva tzv. „blank“ filtry (blanky), tedy slepé vzorky filtrů nepoužitých k zachytávání prachových částic. Díky nim byly získány přesnější informace o charakteristikách jednotlivých frakcí polétavého prachu z každé lokality. Průměry výsledných hodnot deseti měření koncentrace zkoumaných kovů na každém „blanku“ se odečtly od průměrných výsledků měření na filtrech s prachovými částicemi.

Prvotní obsahy jednotlivých kovů všech filtrů měřených ED–XRF spolu s odchylkami se nachází v mých datech, koncentrace jednotlivých kovů filtrů s prachovými částicemi po opravě na blanky v tabulkách 5.2 až 5.5.

Potom byl pro účely magnetometrické analýzy (VSM) z každého filtru vystřižen a třikrát přeložen proužek délky 10 cm a šířky 1 cm. Takto upravený vzorek byl pomocí teflonové pásky rovnoměrně přichycen na lopatku skleněné tyčinky (sklo se pro tyto účely používá kvůli své odolnosti vůči magnetizování) a instalován mezi cívky vibračního vzorkovacího **magnetometru**. Po zkontrolování a kalibraci jeho polohy přesně na střed byl vystaven působení magnetického pole cívek. Měření každého vzorku probíhalo téměř 120 minut. Stanovovaly se tyto hodnoty: H_c , H_r , M_s a M_{rs} . Při zpracování výsledků VSM měření, se vycházelo z hmotnosti vystřiženého proužku filtru s prachovou frakcí H_2 zjištěné na laboratorních vahách Helago HR–200 s přesností 0,1 mg (Obr. 5.5). Z H_2 se převodem vypočítala hmotnost čisté prachové frakce na proužku H_{VZ} podle rovnice:

$$\frac{H_2}{H_1} \times H_{PN} = H_{VZ} [g] \quad (5.4)$$

a dále se postupovalo podle vztahu (5.1), tedy:

$$M_{SH} [Am^2/kg] = \frac{M_s [emu]}{H_{VZ} [g]}, \quad (5.1b)$$

kde M_{SH} jsou hodnoty nasycené magnetizace prachové frakce na proužku (H_{VZ}). Tímto převodem se z jednotek *emu* („electromagnetic units“) získaly jednotky Am^2/kg a výsledky magnetometrických měření byly normovány vahou jednotlivých prachových frakcí z proužků. Jednotky H_c byly ponechány ve výchozím stavu z magnetometru: Oerstedy.



Obr. 5.5 Laboratorní váhy Helago HR–200, přesnost: 0,1 mg, foto: Helago.

Výsledná data ze spektrometrických měření byla převedena z formátu .ndt do programu MS Office Excel, kde bylo odstraněno několik duplicitních hodnot. Hodnoty

z magnetometrických a váhových měření byly přepsány tamtéž. Vstupní meteorologická data pro korelace ostravských vzorků s meteorologickými parametry byla již v tomto programu obdržena.

Zpracovávány byly **grafy** závislosti saturované magnetizace M_s a koercitivity H_c na koncentracích zkoumaných kovů, obsahu prachové frakce a v případě ostravských vzorků i na meteorologických parametrech v místě a čase měření (Tab. 4.2) a vzájemné závislosti těchto veličin.

Koncentracemi kovů se rozumí součet koncentrací všech těchto kovů (na základě poznatků kapitol 2.3 a 2.4):

- Z těžkých kovů to byl, kromě zmíněného olova, zinku a niklu, prvek měď Cu (který se též řadí mezi potenciálně toxické kovy). Hodnoty koncentrace kobaltu Co nebyly použity, protože se nacházely pod mezí detekce přístroje.
- Ze silně toxických kovů byly, kromě již uvedeného olova a chromu a niklu, porovnávány: arsen As a rtuť Hg. Kadmium Cd a thalium Th nebyly použity kvůli jejich nízkým koncentracím pod mezí detekce přístroje.
- Z potenciálně toxických kovů byly, kromě již zmíněného železa a zinku sledovány koncentrace manganu Mn, již zmíněné mědi. Kobalt, jak uvedeno dříve, byl pod mezí detekce přístroje. Doplňkově byly sledovány i signály selenu Se.
- Z méně toxických kovů byl sledován vanad. Hodnoty antimonu Sb a cínu Sn nebyly použity neboť koncentrace byly pod mezí detekce přístroje. Stroncium Sr bylo kvůli svým vyšším koncentracím do výzkumu také zahrnuto.

5.2.3 Statistické analýzy

Výchozí data byla kromě grafických zpracování podrobena i statistickým analýzám pomocí Pearsonova korelačního koeficientu standardně používaného pro měření intenzity lineární závislosti mezi dvěma spojitými náhodnými veličinami, počítaného podle vzorce:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5.5)$$

kde \bar{x} a \bar{y} jsou průměrné hodnoty proměnných x a y . Hodnota korelačního koeficientu se pohybuje od -1 do 1 . Hodnoty ± 1 nabývá, když všechny body $[x_i, y_i]$ leží na přímce. V případně nezávislosti veličin je Pearsonův korelační koeficient nula. Korelační koeficient však může být roven nule i v případě funkční závislosti veličin, kdy ale jejich závislost není lineární. Při použití Pearsonova korelačního koeficientu je tedy vždy třeba posoudit vhodnost jeho aplikace. Při stanovování lineární závislosti, je znaménko korelačního koeficientu kladné, pokud obě veličiny x, y zároveň rostou nebo zároveň klesají a dochází tedy k přímé závislosti. Pokud jedna z veličin roste, zatímco druhá klesá, jde o nepřímou závislost a znaménko Pearsonova korelačního koeficientu je záporné (Ježek 2012).

Tab. 5.1 Přibližná interpretace hodnot korelačního koeficientu, zdroj: Evans (1996).

$ r $	Závislost
0,9 – 1,0	velmi vysoká
0,7 – 0,9	vysoká
0,4 – 0,7	střední
0,2 – 0,4	nízká
0,0 – 0,2	slabá (nepoužitelná)
0	nezávislost

Při interpretaci hodnot r byla zkoumána míra závislosti podle tabulky 5.1. Korelace mezi dvěma množinami dat je statisticky významná, pokud se absolutní hodnota korelačního koeficientu r pohybuje v předepsaných intervalech alespoň pro střední či vyšší (tj. vysokou a velmi vysokou) míru závislosti daných množin.

Tab. 5.2 ED–XRF signály (v [keV]; < = pod mezí detekce) jednotlivých prvků pro pražské (komořanské) vzorky, filtry PM1 a PM2,5.

Datum 2012	Filtr PM1	Měření	Sr	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Se	Σ kovy
23. 7.	G213	10	<	<	<	<	<	<	<	<	1,61	0,03	<	1,64
23. 7. – 24. 7.	G217	10	0,62	<	0,19	<	<	5,74	9,66	3,85	2,49	0,08	0,37	22,99
24. 7.	G221	9	<	<	<	<	<	<	<	<	2,25	0,03	<	2,28
24. 7. – 25. 7.	G225	10	0,55	<	0,17	0,39	<	4,58	7,58	3,76	2,36	0,06	0,31	19,77
25. 7.	G229	10	0,12	0,03	0,07	<	<	1,28	3,23	1,89	1,89	0,06	0,16	8,73
25. 7. – 26. 7.	G233	11	1,50	<	0,45	0,60	0,13	11,24	18,81	6,86	2,39	0,08	0,67	42,72
26. 7. – 27. 7.	G241	11	2,34	<	0,62	1,01	<	17,86	30,00	8,40	0,97	0,08	1,06	62,34
26. 7.	G246	10	2,41	<	0,44	<	<	15,63	24,96	7,46	0,87	0,08	0,96	52,80

2012	Filtr PM2,5	měření	Sr	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Se	Σ kovy
23. 7.	G214	10	<	<	<	<	<	<	<	0,32	2,15	0,04	<	2,512
23. 7. – 24. 7.	G218	10	2,93	<	0,75	0,30	<	24,50	38,96	22,24	2,40	0,07	1,55	93,711
24. 7.	G222	10	<	<	<	<	<	<	<	2,82	1,74	0,05	0,01	4,617
24. 7. – 25. 7.	G226	10	0,43	<	0,15	<	<	4,15	7,35	6,61	1,61	0,00	0,32	20,629
25. 7.	G230	10	<	0,05	<	<	<	<	<	0,34	2,52	0,10	<	3,014
25. 7. – 26. 7.	G234	10	1,34	<	0,39	0,74	<	11,93	22,11	9,66	1,89	0,05	0,92	49,047
26. 7.	G238	10	2,50	<	0,51	<	<	17,91	29,18	16,11	2,17	0,07	1,13	69,579
26. 7. – 27. 7.	G242	11	2,42	<	0,43	0,74	<	15,95	26,15	12,55	0,88	0,07	0,98	60,183

Tab. 5.3 ED–XRF signály (v [keV]; < = pod mezí detekce) jednotlivých prvků pro pražské (komořanské) vzorky, filtry PM10 a TSP.

2012	Filtr PM10	měření	Sr	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Se	Σ kovy
23. 7.	G215	11	<	<	<	<	<	<	<	1,40	1,80	0,03	<	3,232
23. 7. – 24. 7.	G219	10	<	<	<	0,23	<	<	<	4,10	1,95	0,06	<	6,337
24. 7. – 25. 7.	G227	10	0,69	<	0,12	0,36	<	5,41	7,57	16,15	1,87	0,06	0,25	32,493
25. 7.	G231	10	<	<	<	<	<	<	<	5,73	0,59	0,05	<	6,365
25. 7. – 26. 7.	G235	10	2,45	<	0,59	0,64	<	19,16	30,79	24,77	2,35	0,08	1,17	81,990
26. 7.	G239	14	0,75	<	0,26	0,75	<	7,47	12,75	17,10	1,89	0,04	0,43	41,444
26. 7. – 27. 7.	G243	10	2,99	<	0,55	0,70	<	19,74	32,81	30,73	0,57	0,05	1,23	89,376
24. 7.	G245	10	0,23	<	<	<	<	1,09	0,73	8,67	2,34	0,12	0,07	13,252

2012	Filtr TSP	měření	Sr	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Se	Σ kovy
23. 7. – 24. 7.	G220	10	<	<	0,01	0,39	<	0,57	0,46	8,89	1,99	0,04	0,05	12,398
24. 7.	G224	10	0,68	<	0,17	<	<	6,51	9,33	22,39	0,84	0,06	0,38	40,370
24. 7. – 25. 7.	G228	10	3,50	<	0,59	<	<	24,74	35,22	68,65	2,25	0,08	1,39	136,417
25. 7.	G232	10	1,25	<	0,30	1,37	0,69	11,93	17,30	49,98	0,57	0,04	0,66	84,075
25. 7. – 26. 7.	G236	10	2,20	<	0,49	<	<	17,39	27,65	27,41	2,16	0,08	0,99	78,375
26. 7.	G240	10	1,78	<	0,49	1,33	<	16,35	27,91	37,67	2,14	0,07	0,89	88,618
26. 7. – 27. 7.	G244	10	4,75	<	0,70	<	<	26,41	41,78	53,99	0,87	0,08	1,62	130,193

Tab. 5.4 ED–XRF signály (v [keV]; < = pod mezí detekce) jednotlivých prvků pro ostravské vzorky, filtr PM1.

2012	Filtr PM1	měření	Sr	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Mn	Se	Σ kovy
17.2.-18.2.	G143	10	<	0,98	<	<	0,73	<	<	11,22	1,56	0,05	<	<	14,54
17.2.	G145	10	0,20	0,27	0,11	0,92	9,93	2,54	5,16	36,26	0,59	0,03	0,10	0,22	56,34
16.2.-17.2.	G147	11	0,20	0,02	0,05	<	3,30	1,56	2,62	17,88	2,22	0,06	<	0,11	28,02
16.2.	G149	10	<	0,02	<	<	<	<	<	<	0,16	<	<	<	0,18
6.2.-7.2.	G151	10	0,50	<	<	<	0,94	3,20	6,67	3,22	0,44	0,05	<	0,19	15,21
6.2.	G153	10	<	0,09	<	<	0,29	<	<	0,10	0,60	0,05	<	<	1,12
5.2.-6.2.	G155	10	<	0,02	<	<	0,03	<	<	<	0,12	<	<	<	0,17
5.2.	G157	8	<	<	<	<	<	<	<	<	0,79	0,05	<	<	0,84
4.2.-5.2.	G159	10	<	0,02	<	<	0,46	<	<	0,86	0,57	0,01	<	<	1,91
4.2.	G161	10	<	<	<	<	0,17	<	<	0,09	0,57	0,05	<	<	0,88
3.2.-4.2.	G163	10	<	0,04	<	<	0,15	<	<	<	0,72	0,05	<	<	0,96
3.2.	G165	10	<	0,02	<	<	<	<	<	<	0,29	0,03	<	<	0,34
2.2.-3.2.	G167	11	<	0,02	<	<	0,22	<	<	0,08	0,75	0,07	<	<	1,13
2.2.	G169	10	0,20	0,03	0,02	<	1,14	0,91	0,93	1,34	0,72	0,06	<	0,09	5,43
1.2.-2.2.	G171	10	<	<	<	<	<	<	<	0,05	0,40	0,03	<	<	0,47
1.2.	G173	10	<	<	<	<	<	<	<	<	0,58	0,06	<	<	0,64
31.1.-1.2.	G175	12	<	<	<	<	<	<	<	<	0,66	0,06	<	<	0,72
31.1.	G177	10	<	0,02	<	<	0,41	<	<	1,07	0,69	0,05	<	<	2,23
30.1.-31.1.	G179	10	0,05	<	<	<	5,53	<	<	0,91	0,62	0,07	<	0,01	7,19
30.1.	G181	10	0,21	<	0,08	<	8,90	1,80	3,17	1,83	0,43	0,07	<	0,14	16,62

Tab. 5.5 ED–XRF signály (v [keV]; < zn. pod mezí detekce) jednotlivých prvků pro ostravské vzorky, filtr PM10.

2012	filtr PM10	měření	Sr	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Mn	Se	Σ kovy
17. 2.	G144	10	0,07	0,82	<	<	13,01	0,56	0,91	102,27	2,33	0,08	1,80	0,08	121,94
16. 2. – 17.2.	G146	10	1,19	0,22	0,22	<	12,66	8,71	14,15	110,31	0,50	0,02	0,06	0,57	148,61
16. 2.	G148	10	<	<	<	<	0,11	<	<	3,97	0,75	0,07	<	<	4,89
6. 2. – 7. 2.	G150	10	<	0,42	<	<	0,87	<	<	6,10	1,81	0,08	<	<	9,27
6. 2.	G152	10	0,85	1,62	0,11	<	5,90	5,09	8,38	20,11	2,48	0,08	<	0,39	45,00
5. 2. – 6. 2.	G154	10	<	0,42	<	<	0,76	<	<	1,91	0,75	0,09	<	<	3,92
5. 2.	G156	10	0,30	0,05	0,09	<	2,12	1,96	3,53	8,63	0,58	0,06	<	0,16	17,47
4. 2. – 5. 2.	G158	10	1,19	0,81	0,35	0,35	6,88	6,34	10,10	21,53	0,77	0,08	<	0,44	48,85
4. 2.	G160	11	<	0,32	<	<	0,91	<	<	4,17	0,56	0,06	<	<	6,01
3. 2. – 4. 2.	G162	10	<	0,06	<	<	1,40	<	<	4,30	0,51	0,06	<	<	6,32
3. 2.	G164	11	<	0,02	<	<	0,34	<	<	1,02	0,73	0,07	<	<	2,17
2. 2. – 3. 2.	G166	10	<	0,23	<	<	0,79	<	<	1,25	0,27	0,04	<	<	2,59
2. 2.	G168	10	3,84	1,72	0,92	<	16,25	24,67	38,02	43,98	0,77	0,08	<	1,73	131,97
1. 2. – 2. 2.	G170	10	<	<	<	<	0,16	<	<	2,67	0,61	0,05	<	<	3,49
1. 2.	G172	10	<	<	<	<	<	<	<	2,72	0,69	0,06	<	<	3,47
31. 1. – 1. 2.	G174	10	<	<	<	<	0,46	<	<	2,23	0,78	0,09	<	<	3,57
31. 1.	G176	11	0,10	0,13	0,03	<	1,49	0,23	1,15	5,14	0,75	0,05	<	0,09	9,15
30. 1. – 31. 1.	G178	10	<	0,02	<	<	0,78	<	<	2,90	0,48	0,03	<	<	4,21
30. 1.	G180	10	<	<	<	<	0,11	<	<	2,27	0,70	0,09	<	<	3,17
17. 2. – 18. 2.	G74	10	<	3,03	<	0,46	2,98	<	0,32	51,27	1,58	0,04	0,74	0,03	60,45

Tab. 5.6 Výsledky hmotnostních a magnetometrických analýz ve srovnání s koncentrací kovů, komořanské filtry PM1 a PM2,5.

Filtr PM1	H ₁ [g]	H ₂ [g]	H _{PN} [g]	H _{VZ} [g]	Σ kovy	M _S [emu]	M _S [Am ² /kg]	M _r [emu]	M _r [Am ² /kg]	H _c [Oe]	H _r [Oe]	prach [μg/m ³]
G213	0,58026	0,0382	0,00124	0,00008	1,64	8,48E-05	1,039	5,85E-06	7,16E-02	68,566	n.a.	15,3
G217	0,58521	0,0389	0,00391	0,00026	22,99	1,12E-04	0,429	4,39E-06	1,69E-02	45,401	n.a.	14,4
G221	0,58503	0,0370	0,00138	0,00009	2,28	7,90E-05	0,906	7,27E-06	8,33E-02	97,923	n.a.	12,5
G225	0,57568	0,0348	0,00662	0,00040	19,77	1,38E-04	0,345	1,15E-05	2,87E-02	63,398	n.a.	23,5
G229	0,59210	0,0375	0,00592	0,00037	8,73	1,59E-04	0,425	1,52E-05	4,06E-02	78,512	436	20,2
G233	0,55757	0,0337	0,00711	0,00043	42,72	8,69E-05	0,202	7,75E-06	1,80E-02	65,823	431	25,2
G241	0,56592	0,0374	0,00733	0,00048	62,34	7,30E-05	0,151	4,77E-06	9,84E-03	54,249	n.a.	25,0
G246	0,56747	0,0423	0,00272	0,00020	52,80	9,55E-05	0,471	8,63E-06	4,25E-02	48,136	n.a.	26,2

Filtr PM2,5	H ₁ [g]	H ₂ [g]	H _{PN} [g]	H _{VZ} [g]	Σ kovy	M _S [emu]	M _S [Am ² /kg]	M _r [emu]	M _r [Am ² /kg]	H _c [Oe]	H _r [Oe]	prach [μg/m ³]
G214	0,59067	0,0371	0,00193	0,00012	2,512	2,18E-04	1,797	1,88E-05	1,55E-01	100,64	486,72	23,7
G218	0,58960	0,0390	0,00600	0,00040	93,711	2,69E-04	0,677	2,56E-05	6,46E-02	89,42	401,19	21,7
G222	0,58326	0,0363	0,00267	0,00017	4,617	3,37E-04	2,026	3,32E-05	2,00E-01	96,91	545,31	23,6
G226	0,58566	0,0359	0,00824	0,00051	20,629	3,17E-04	0,628	3,19E-05	6,31E-02	103,86	n.a.	28,8
G230	0,61139	0,0389	0,00885	0,00056	3,014	3,68E-04	0,654	4,09E-05	7,26E-02	84,57	435,00	29,6
G234	0,56019	0,0347	0,00737	0,00046	49,047	1,27E-04	0,279	1,67E-05	3,66E-02	83,82	513,06	25,7
G238	0,58660	0,0383	0,00269	0,00018	69,579	2,01E-04	1,146	2,03E-05	1,15E-01	96,04	517,15	25,4
G242	0,55051	0,0352	0,00884	0,00057	60,183	1,90E-04	0,335	2,30E-05	4,08E-02	80,83	413,90	29,5

Vysvětlivky: n.a. – neměřitelné hodnoty.

Tab. 5.7 Výsledky hmotnostních a magnetometrických analýz ve srovnání s koncentrací kovů, komořanské filtry PM10 a TSP.

Filtr PM10	H ₁ [g]	H ₂ [g]	H _{PN} [g]	H _{VZ} [g]	Σ kovy	M _s [emu]	M _s [Am ² /kg]	M _r [emu]	M _r [Am ² /kg]	H _c [Oe]	H _r [Oe]	prach [μg/m ³]
G215	0,56722	0,0353	0,00232	0,00014	3,232	5,79E-04	4,014	5,90E-05	4,08E-01	108,61	576,00	26,2
G219	0,59411	0,0389	0,00885	0,00058	6,337	8,00E+02	n.a.	8,39E-05	1,45E-01	119,12	558,92	29,5
G227	0,59003	0,0353	0,01138	0,00068	32,493	1,74E-04	0,256	1,81E-05	2,65E-02	73,414	n.a.	36,5
G231	0,59644	0,0388	0,01364	0,00089	6,365	1,02E-03	1,147	1,11E-04	1,25E-01	90,869	494,43	41,9
G235	0,59523	0,0375	0,00962	0,00061	81,990	3,78E-04	0,623	4,12E-05	6,80E-02	95,417	528,44	30,8
G239	0,57192	0,0350	0,00462	0,00028	41,444	6,29E+02	n.a.	6,57E+01	2,33E+05	102,44	543,41	40,1
G243	0,55483	0,0347	0,01059	0,00066	89,376	3,29E-04	0,496	2,68E-05	4,05E-02	107,77	434,33	32,6
G245	0,55116	0,0492	0,00465	0,00042	13,252	9,43E-04	2,273	1,06E-04	2,54E-01	111,91	605,31	37,9

Filtr TSP	H ₁ [g]	H ₂ [g]	H _{PN} [g]	H _{VZ} [g]	Σ kovy	M _s [emu]	M _s [Am ² /kg]	M _r [emu]	M _r [Am ² /kg]	H _c [Oe]	H _r [Oe]	prach [μg/m ³]
G220	0,61800	0,0439	0,01435	0,00102	12,398	1,03E-03	1,014	1,21E-04	1,19E-01	110,37	568,90	48,3
G224	0,59012	0,0371	0,00579	0,00036	40,370	9,58E-04	2,632	1,01E-04	2,76E-01	125,26	545,54	47,6
G228	0,60303	0,0366	0,01577	0,00096	136,417	1,02E-03	1,061	1,13E-04	1,18E-01	113,97	502,90	51,1
G232	0,60580	0,0391	0,01831	0,00118	84,075	1,53E-03	1,296	1,55E-04	1,31E-01	101,62	528,86	56,8
G236	0,61331	0,0414	0,01228	0,00083	78,375	5,15E-04	0,621	5,64E-05	6,81E-02	108,32	444,09	39,7
G240	0,58356	0,0360	0,00620	0,00038	88,618	7,19E-04	1,879	7,98E-05	2,09E-01	126,92	564,56	54,4
G244	0,55872	0,0364	0,01502	0,00098	130,193	4,97E-04	0,508	5,27E-05	5,38E-02	85,751	473,00	46,7

Vysvětlivky: n.a. – neměřitelné hodnoty (příliš vysoké)

Tab. 5.8 Výsledky hmotnostních a magnetometrických analýz ve srovnání s koncentrací kovů, ostravské filtry PM1.

Filtr PM1	H ₁ [g]	H ₂ [g]	H _{PN} [g]	H _{VZ} [g]	Σ kovy	M _s [emu]	M _s [Am ² /kg]	M _r [emu]	M _r [Am ² /kg]	H _c [Oe]	H _r [Oe]	prach [μg/m ³]
G143	0,59485	0,0392	0,00625	0,00041	14,54	3,56E-03	8,636	2,96E-04	7,19E-01	94,000	377,3	17,9
G145	0,59732	0,0387	0,01031	0,00067	56,34	6,14E-03	9,192	4,83E-04	7,22E-01	80,375	347,8	29,4
G147	0,58934	0,0369	0,00629	0,00039	28,02	3,33E-03	8,448	3,07E-04	7,79E-01	85,333	325,6	17,9
G149	0,59999	0,0377	0,00739	0,00046	0,18	1,16E-04	0,249	8,03E-06	1,73E-02	58,431	n.a.	27,5
G151	0,59983	0,0408	0,01162	0,00079	15,21	1,93E-04	0,244	2,03E-05	2,56E-02	73,682	n.a.	32,8
G153	0,59212	0,0373	0,01602	0,00101	1,12	1,47E-04	0,146	6,97E-06	6,90E-03	78,454	n.a.	46,3
G155	0,59403	0,0367	0,01687	0,00104	0,17	1,02E-04	0,098	1,41E-05	1,35E-02	84,322	n.a.	49,0
G157	0,59795	0,0382	0,00895	0,00057	0,84	1,39E-04	0,243	1,77E-05	3,09E-02	77,609	n.a.	25,9
G159	0,60773	0,0405	0,01433	0,00095	1,91	2,15E-04	0,225	1,99E-05	2,08E-02	89,543	n.a.	40,8
G161	0,60201	0,0387	0,01998	0,00128	0,88	1,67E-04	0,175	1,76E-05	1,84E-02	68,270	n.a.	56,6
G163	0,60910	0,0383	0,02508	0,00158	0,96	2,00E-04	0,127	3,09E-05	1,96E-02	82,043	n.a.	70,5
G165	0,60115	0,0386	0,02068	0,00133	0,34	1,50E-04	0,113	1,55E-05	1,16E-02	47,994	n.a.	59,8
G167	0,61008	0,0409	0,02191	0,00147	1,13	9,76E-05	0,066	1,42E-05	9,70E-03	52,718	n.a.	103,8
G169	0,61233	0,0390	0,02063	0,00131	5,43	1,36E-04	0,104	1,30E-05	9,86E-03	83,155	364,0	73,6
G171	0,58719	0,0390	0,01241	0,00082	0,47	2,41E-04	0,293	2,74E-05	3,33E-02	74,996	430,0	39,0
G173	0,59445	0,0378	0,01005	0,00064	0,64	1,10E-04	0,172	9,86E-06	1,54E-02	123,170	329,0	30,7
G175	0,59123	0,0383	0,01618	0,00105	0,72	1,71E-04	0,163	1,76E-05	1,68E-02	65,035	315,0	45,7
G177	0,59021	0,0379	0,01746	0,00112	2,23	1,91E-04	0,170	2,48E-05	2,21E-02	91,435	n.a.	49,5
G179	0,59643	0,0390	0,01309	0,00086	7,19	1,30E-04	0,152	1,52E-05	1,77E-02	74,031	n.a.	39,7
G181	0,58790	0,0359	0,01565	0,00096	16,62	1,33E-04	0,140	1,19E-05	1,24E-02	77,772	n.a.	52,6

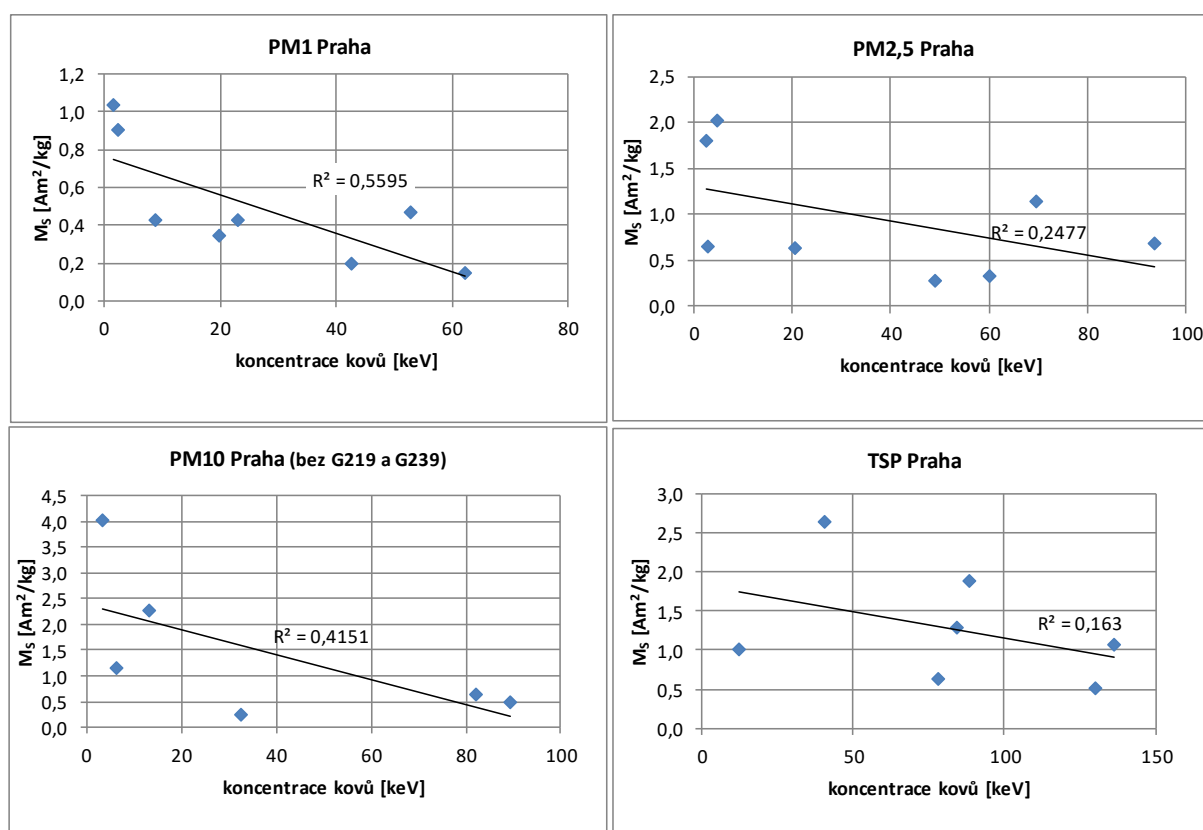
Tab. 5.9 Výsledky hmotnostních a magnetometrických analýz ve srovnání s koncentrací kovů, ostravské filtry PM10.

Filtr PM10	H ₁ [g]	H ₂ [g]	H _{PN} [g]	H _{VZ} [g]	Σ kovy	M _s [emu]	M _s [Am ² /kg]	M _r [emu]	M _r [Am ² /kg]	H _c [Oe]	H _r [Oe]	prach [μg/m ³]
G144	0,60711	0,0385	0,02259	0,00143	121,94	2,14E-02	14,971	1,83E-03	1,28E+00	98,000	385,5	63,4
G146	0,60384	0,0397	0,01184	0,00078	148,61	8,52E-03	10,944	7,77E-04	9,98E-01	98,463	377,1	33,2
G148	0,60376	0,0409	0,01128	0,00076	4,89	7,28E-04	0,953	7,65E-05	1,00E-01	104,391	422,9	41,7
G150	0,61900	0,0408	0,03101	0,00204	9,27	8,99E-04	0,440	1,05E-04	5,14E-02	106,094	422,7	87,1
G152	0,62434	0,0399	0,03603	0,00230	45,00	9,68E-04	0,421	9,18E-05	3,99E-02	91,794	501,2	102,9
G154	0,61701	0,0390	0,03642	0,00230	3,92	4,90E-04	0,213	5,63E-05	2,45E-02	110,979	437,7	107,4
G156	0,59586	0,0404	0,01954	0,00132	17,47	5,52E-04	0,416	6,11E-05	4,61E-02	118,001	480,8	56,0
G158	0,61994	0,0404	0,03187	0,00208	48,85	9,66E-04	0,465	9,48E-05	4,57E-02	91,017	448,3	90,5
G160	0,62930	0,0417	0,04141	0,00274	6,01	7,83E-04	0,285	9,49E-05	3,46E-02	104,471	544,2	140,0
G162	0,63322	0,0421	0,04254	0,00283	6,32	6,68E-04	0,236	6,39E-05	2,26E-02	97,750	410,5	171,3
G164	0,62380	0,0403	0,03467	0,00224	2,17	4,34E-04	0,194	4,73E-05	2,11E-02	77,466	434,6	150,7
G166	0,62050	0,0405	0,04558	0,00298	2,59	4,15E-04	0,140	4,31E-05	1,45E-02	83,251	352,9	166,4
G168	0,62162	0,0403	0,03429	0,00222	131,97	6,83E-04	0,307	7,16E-05	3,22E-02	103,823	478,7	95,5
G170	0,61407	0,0417	0,02628	0,00178	3,49	8,34E-04	0,467	8,24E-05	4,62E-02	86,725	336,9	73,2
G172	0,60404	0,0382	0,02221	0,00140	3,47	5,52E-04	0,393	5,97E-05	4,25E-02	101,766	470,8	67,5
G174	0,61991	0,0396	0,03207	0,00205	3,57	5,83E-04	0,284	6,02E-05	2,94E-02	88,919	378,0	90,2
G176	0,61218	0,0395	0,03333	0,00215	9,15	6,57E-04	0,306	6,71E-05	3,12E-02	102,172	387,1	93,9
G178	0,61400	0,0408	0,02897	0,00193	4,21	3,85E-04	0,200	4,96E-05	2,58E-02	84,042	313,5	80,5
G180	0,61134	0,0379	0,02775	0,00172	3,17	4,26E-04	0,247	4,41E-05	2,56E-02	90,826	429,9	93,2
G74	0,55707	0,0359	0,01419	0,00091	60,45	1,35E-02	14,733	1,08E-03	1,18E+00	96,500	393,7	39,8

6 Výsledky

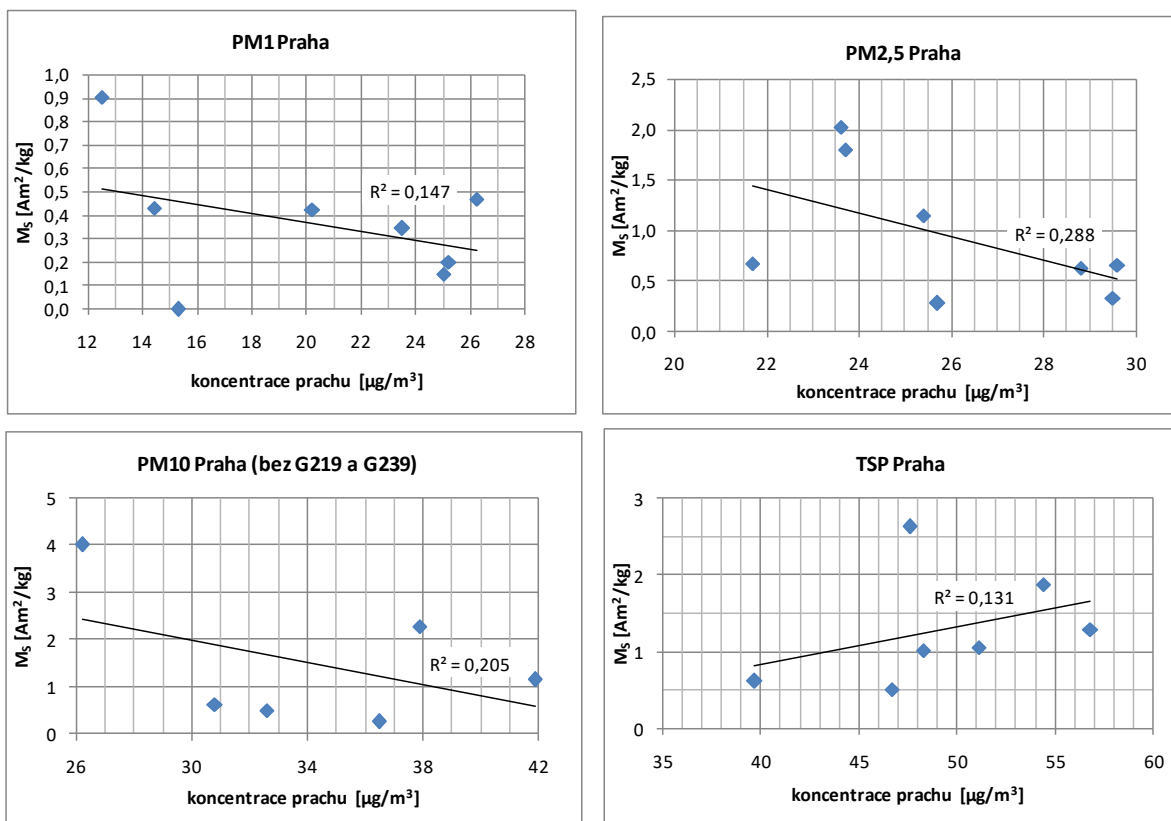
6.1 Komořanské vzorky

Pro komořanské („pražské“) filtry byly zkoumány především závislosti nasycené magnetizace na výsledcích ED–XRF a hmotnostních analýz (M_s /signál kovů a M_s /prach).



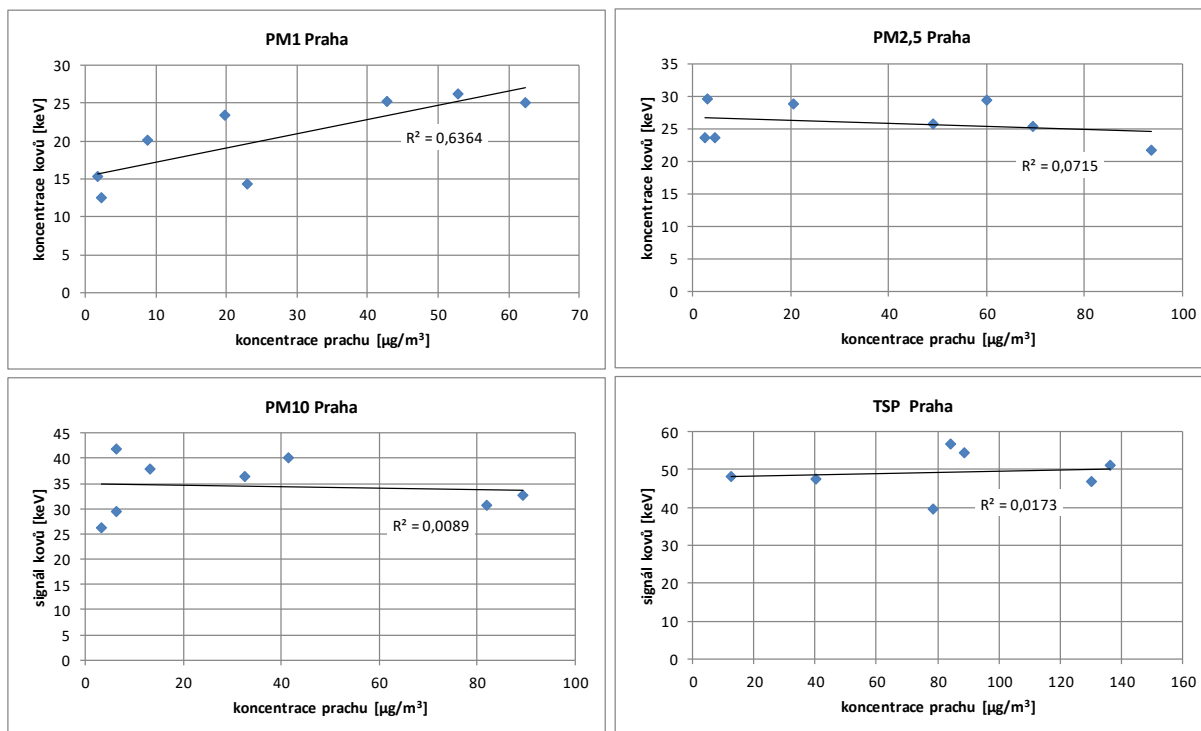
Obr. 6.1 Grafy M_s /koncentrace kovů pro komořanské filtry.

Z grafů závislosti nasycené magnetizace M_s a signálu kovů pro komořanské filtry lze vyčíst překvapivé výsledky. U všech tří filtrů byla nalezena nepřímá závislost. Tedy čím vyšší zastoupení zkoumaných kovů prokázaných na filtru, tím nižší byla jeho celková nasycená magnetizace.



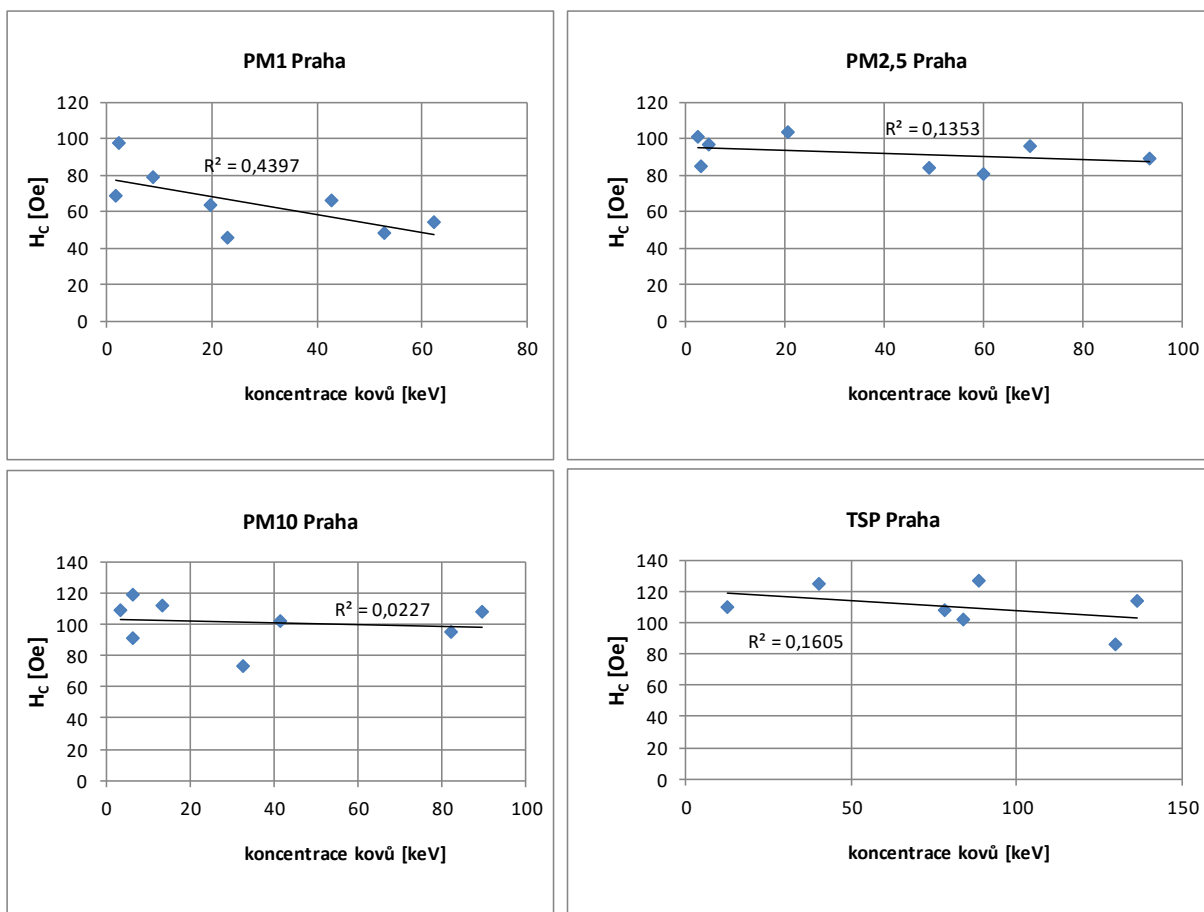
Obr. 6.2 Grafy M_s /koncentrace prachu pro komořanské filtry.

V grafech závislosti nasycené magnetizace na koncentracích prachu na komořanských filtrech (Obr. 6.2) pozorujeme jak nepřímou (pro PM1, PM2,5 a PM10), tak přímou úměrnost (pro TSP), která by se dala očekávat spíše nežli převládající nepřímá.



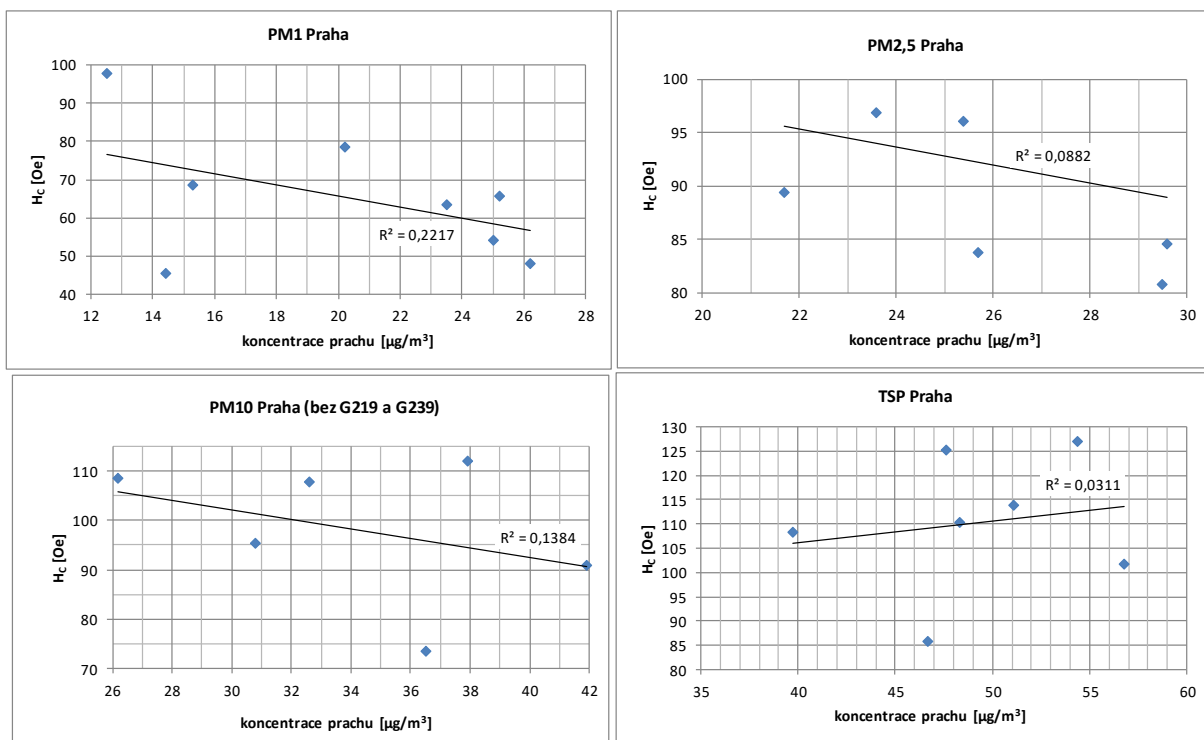
Obr. 6.3 Grafy koncentrace kovů/měrná hmotnost prachu, komořanské filtry.

Na základě obrázku 6.3 lze tvrdit, že zde koncentrace kovů v podstatě nemají na měrnou hmotnost prachu vliv. Jedinou výjimkou je frakce PM1, kde byla nalezena celkem relevantní ($R^2 = 0,636$) přímá závislost, která by se dala předpokládat.



Obr. 6.4 H_c /koncentrace kovů, komořanské filtry.

Zajímavé výsledky poskytuje porovnání H_c a koncentrací kovů: ve všech měřeních (pro PM1, PM2,5 a PM10 i TSP) se projevila nepřímá úměrnost, i když statisticky malého významu. Statisticky významnější hodnoty nabývá jen pro frakci PM1.

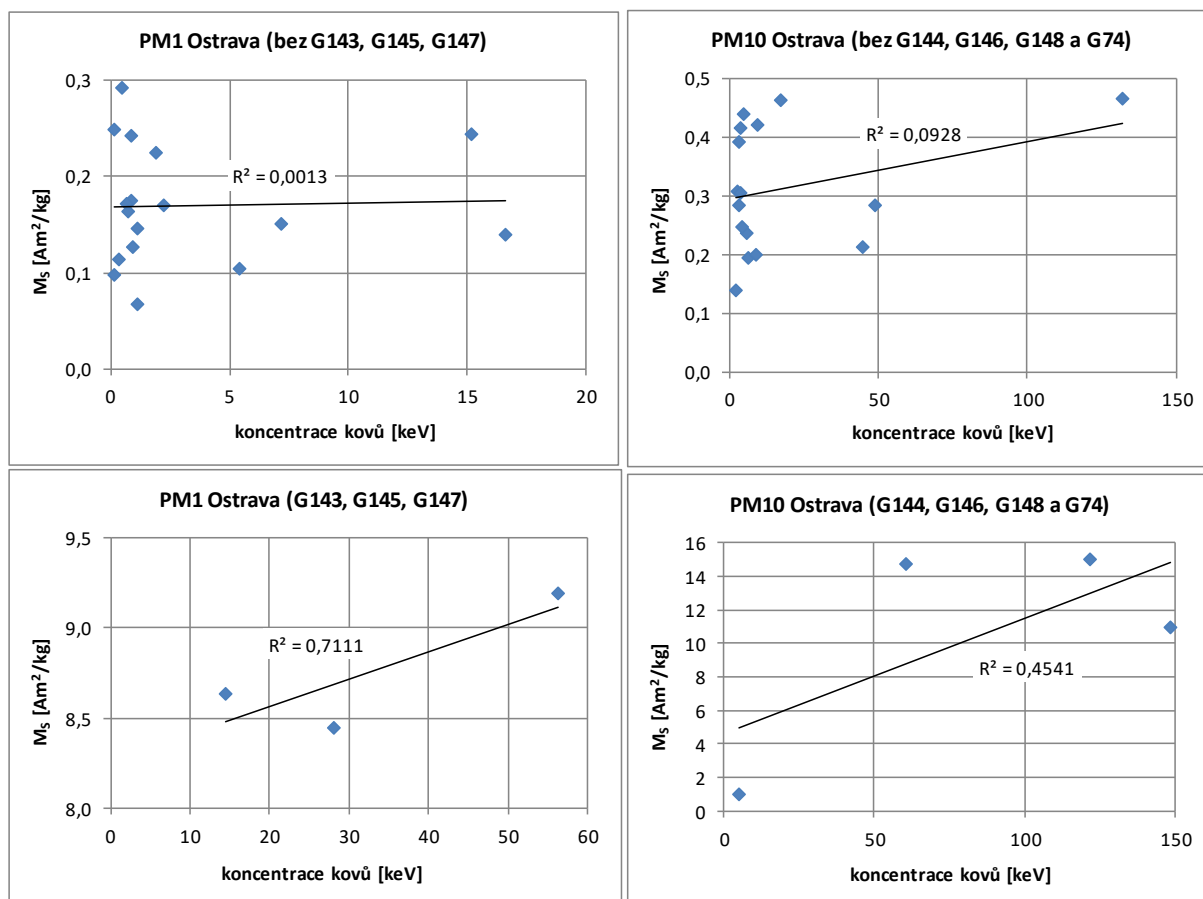


Obr. 6.5 H_c /koncentrace prachu, komořanské filtry.

U komořanských vzorků se projevila nepřímá úměrnost mezi koercivitou H_c a koncentracemi detekovaných kovů ve třech případech (PM1, PM2,5, PM10), a u TSP se naopak projevila úměrnost přímá.

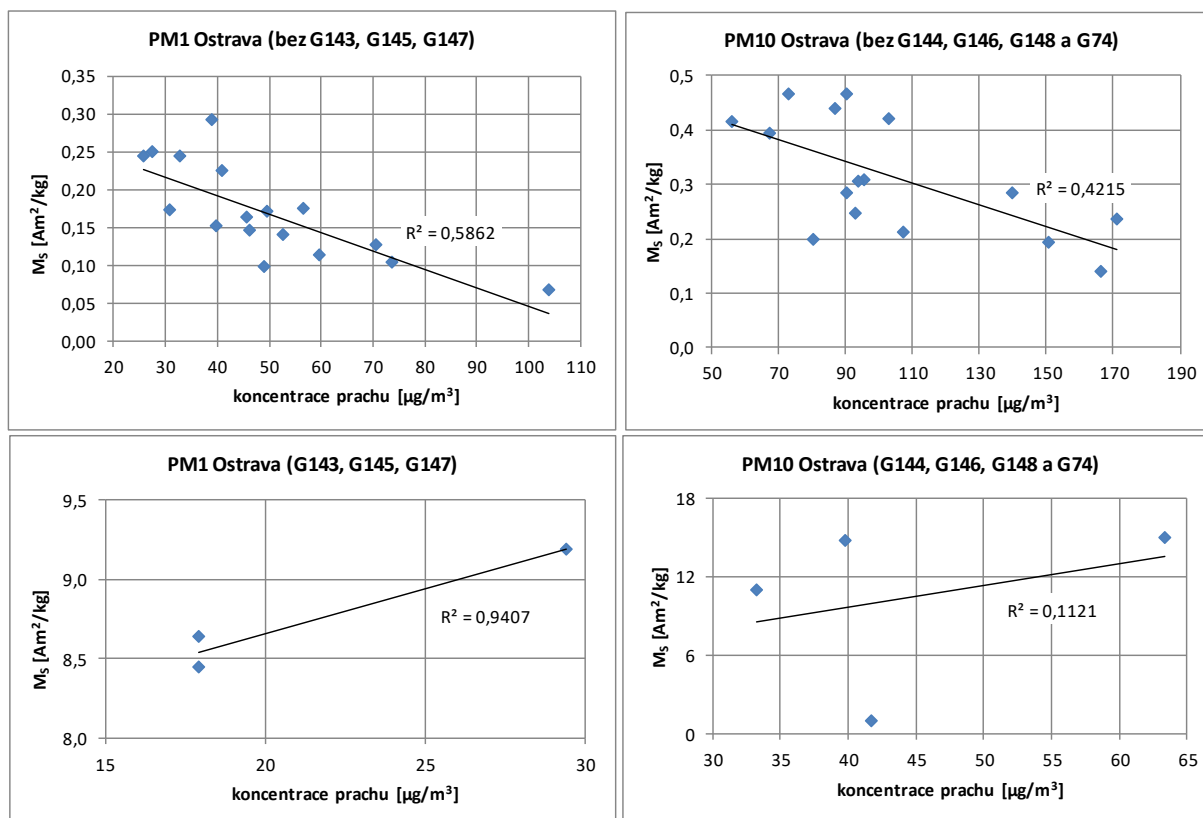
6.3 Ostravské vzorky

U ostravských filtrů byly zkoumány jak závislosti nasycené magnetizace na výsledcích ED–XRF a hmotnostních analýz (M_s /signál kovů a M_s /prach), tak závislosti magnetometrických měření na meteorologických parametrech.



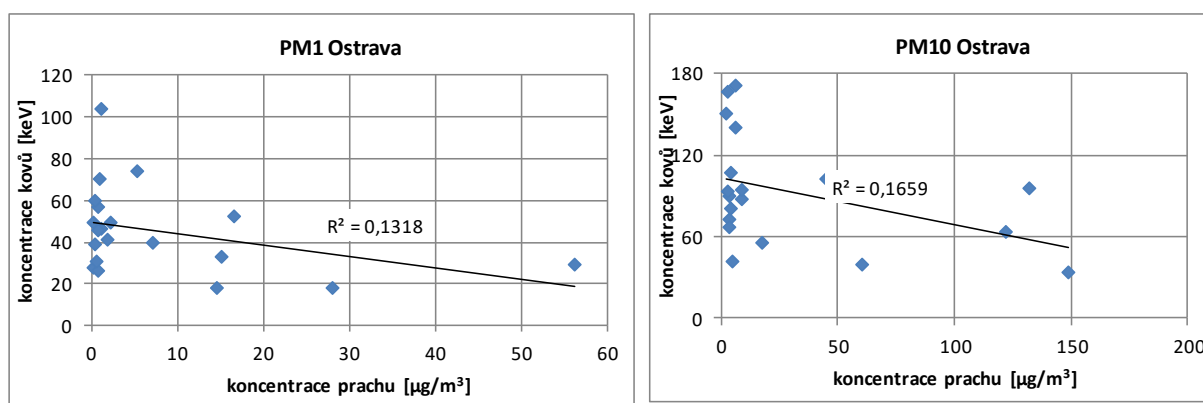
Obr. 6.6 Grafy M_s /koncentrace kovů pro nízké i vysoké hodnoty M_s ostravských filtrů.

U korelací nasycené magnetizace s koncentracemi sledovaných kovů pro ostravské filtry se celkově pro vzorky s nízkými i s vysokými hodnotami M_s potvrdila přímá úměrnost (Obr. 6.6), nicméně ve všech případech se jedná o data, na jejichž interpretaci mají velký vliv odlehlé hodnoty.



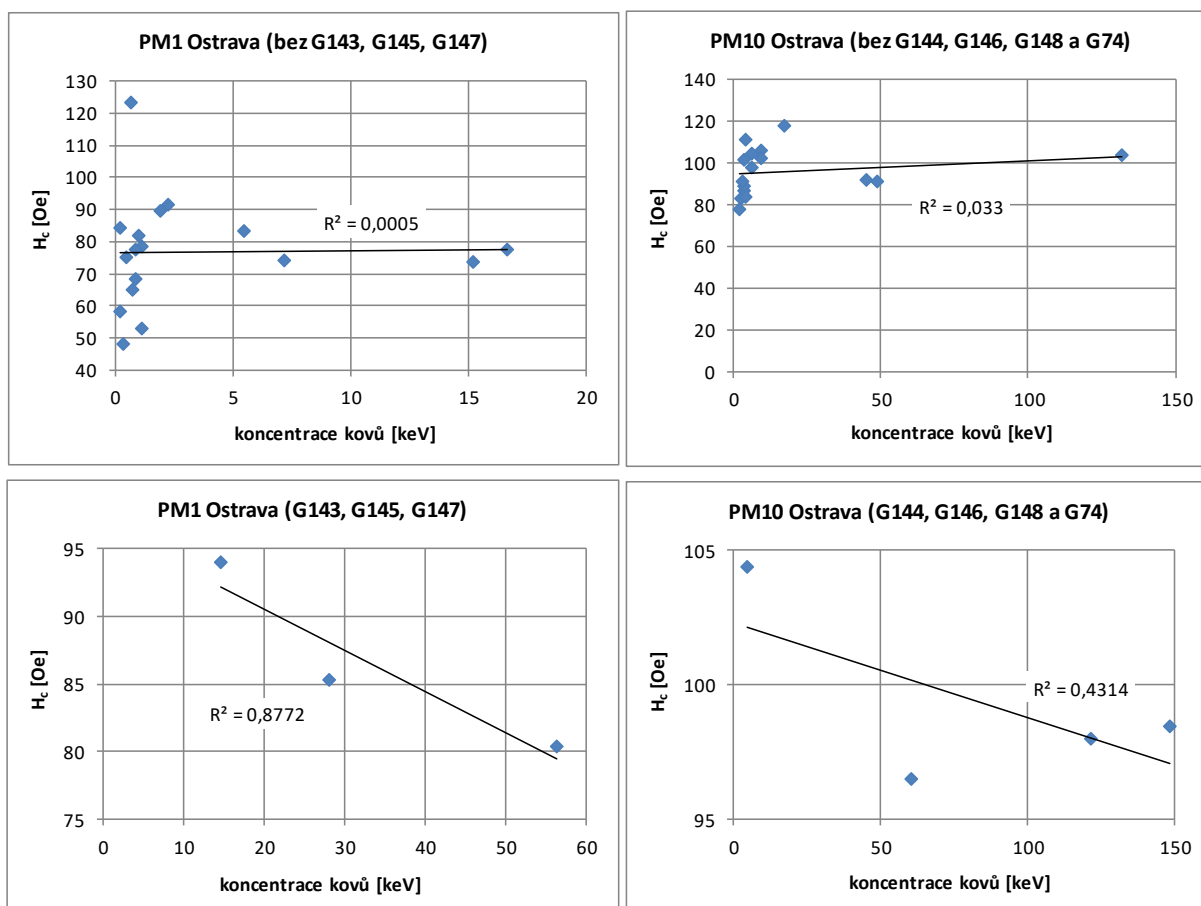
Obr. 6.7 Grafy M_s /koncentrace prachu pro nízké i vysoké hodnoty M_s ostravských filtrů.

Zajímavější a také statisticky významnější trendy vidíme na obrázku 6.7. Liší se zde chování magnetické frakce nízkých hodnot nasycené magnetizace od chování magnetické frakce o vysokých M_s . U vzorků o nízkých M_s závisí nasycená magnetizace na koncentraci prachu nepřímo úměrně, kdežto vzorky o vysokých M_s vykazují závislost nasycené magnetizace na koncentraci prachu přímou. Pro hodnoty o vysokých M_s je však k dispozici velmi malý počet dat.



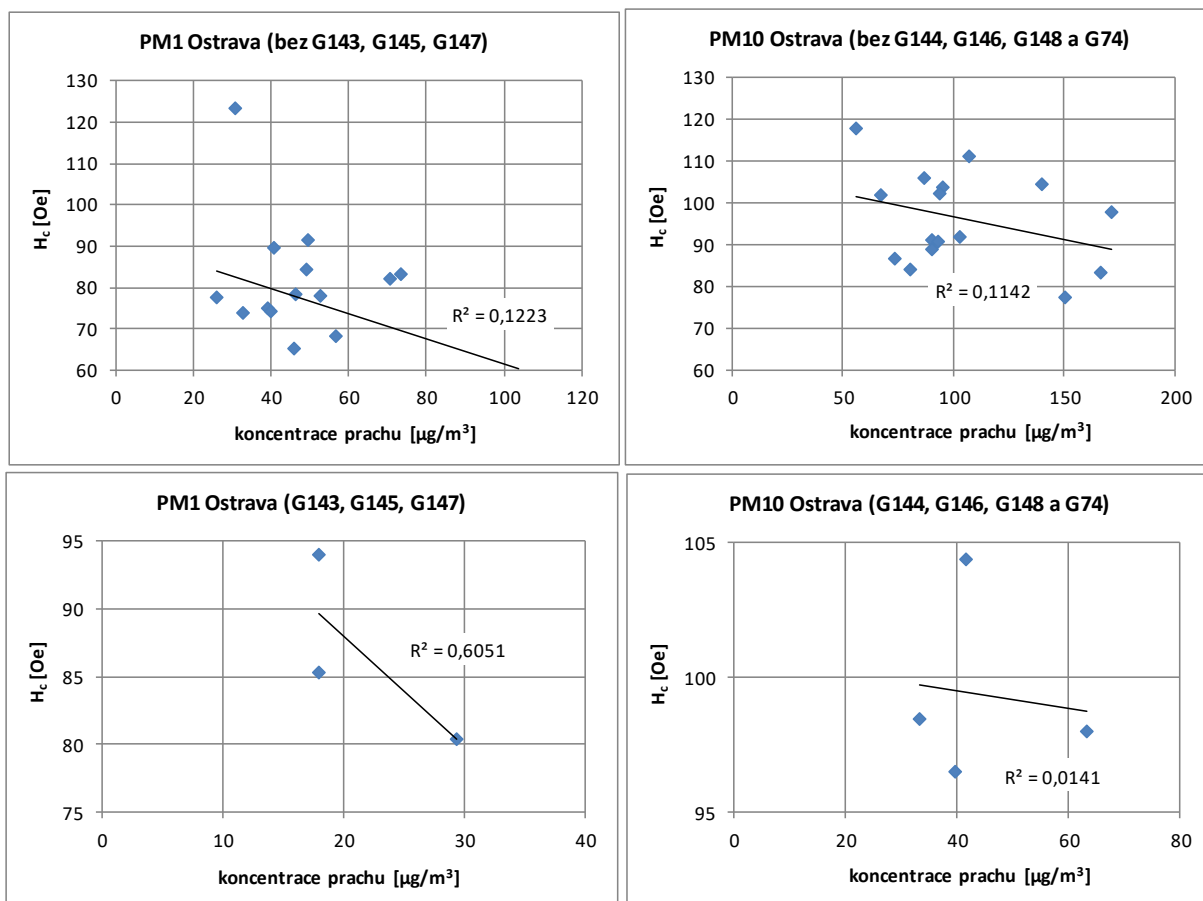
Obr. 6.8 Grafy závislosti koncentrací kovů na koncentracích prachu pro ostravské filtry.

Překvapivým výsledkem jsou nepřímé úměrnosti mezi koncentracemi kovů a koncentracemi prachu pro obě PM frakce (Obr. 6.8). Data jsou ale opět velmi málo statisticky významná a v případě frakce celkem citlivá na odlehlejší hodnoty.



Obr. 6.9 Grafy závislosti koercitivit na koncentracích kovů, ostravské filtry.

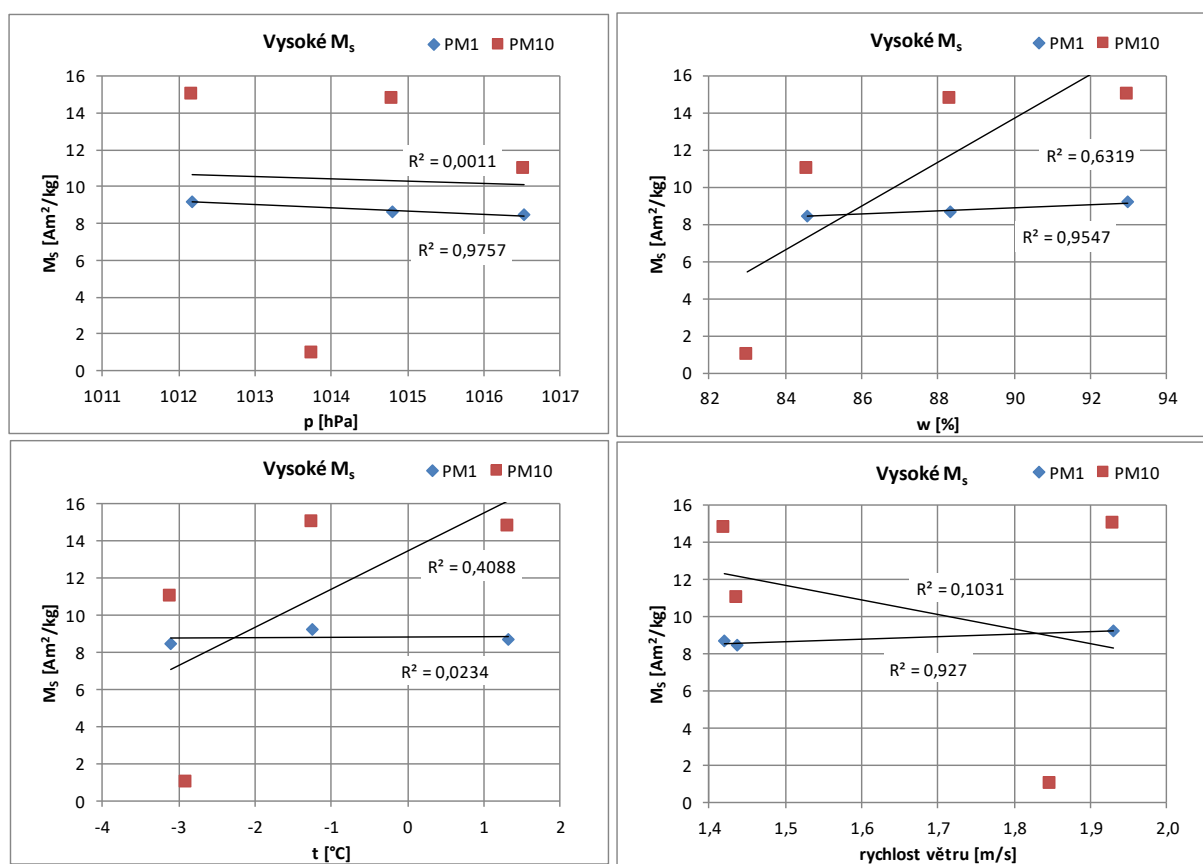
Mezi hodnotami koercitivní síly a hodnotami koncentrací kovů v ostravských vzorcích (Obr. 6.10) o nižších hodnotách nasycené magnetizace nebyla nalezena závislost (jedná se o data velmi závislá na odlehlých hodnotách), mezi H_c a koncentracemi kovů s vyššími hodnotami M_s byla nalezena statisticky významná nepřímá úměrnost, avšak zde se statisticky nevýznamným počtem dat.



Obr. 6.10 Grafy závislosti koercitivit na koncentracích prachu, ostravské filtry.

Ostravské filtry vykazují zajímavou shodu – nepřímé úměrnosti mezi koercitivitou vzorků koncentrací prachu jak pro obě měřené frakce: PM1 i PM10 (pro vzorky o vysokých i nízkých hodnotách nasycené magnetizace).

Korelace s meteorologickými daty



Obr. 6.11 Grafy srovnání vysokých M_s a meteorologických parametrů, ostravské filtry (PM1: vzorky G143, G145, G147; PM2: vzorky G144, G146, G148 a G74).

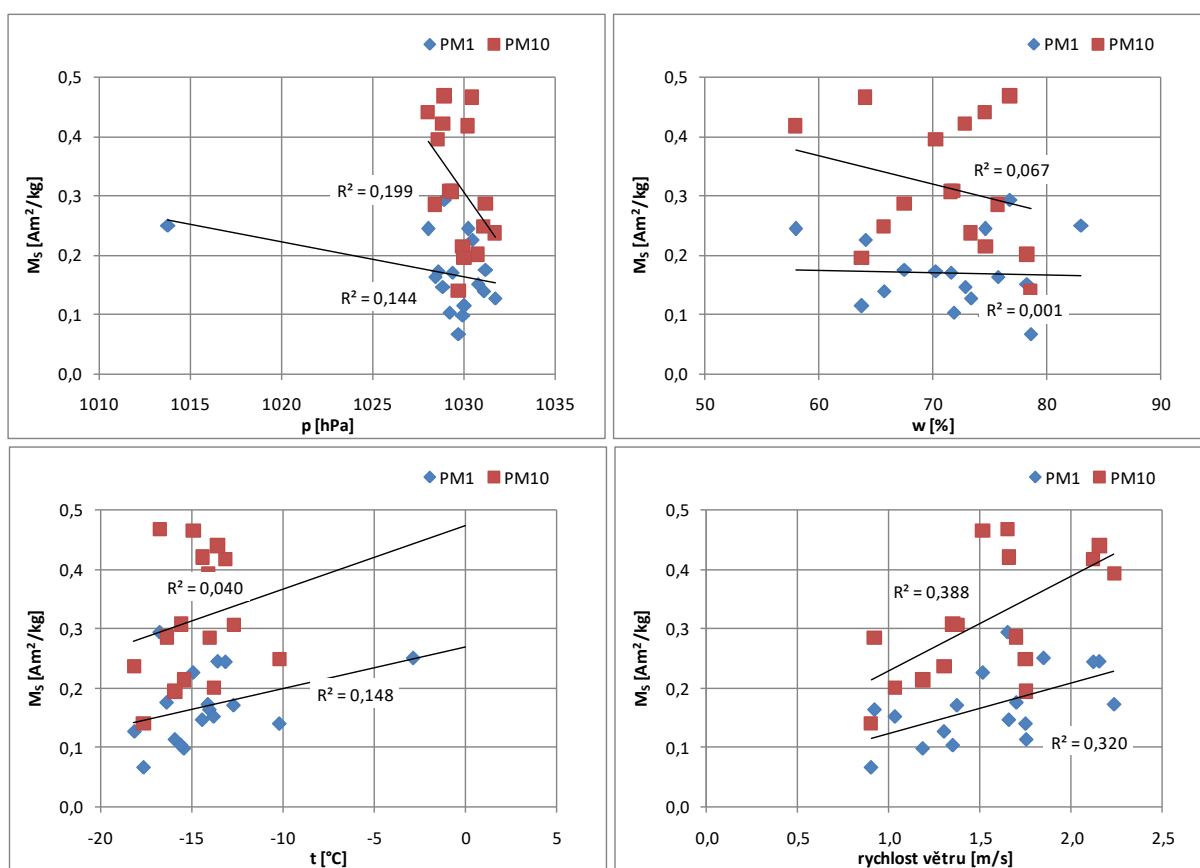
Z hlediska malého počtu dat pro ostravské filtry s vysokými hodnotami nasycené magnetizace (Obr. 6.11) nelze vyvozovat o závislostech daných parametrů významnější závěry. Nicméně ukazují velmi pozoruhodné fenomény.

Jednou ze zajímavostí těchto dat je závislost vlhkosti na teplotě, zde pro zimní období je to přímá úměrnost (což souhlasí s teorií o tom, že teplota a vlhkost vzduchu jsou vzájemně propojené veličiny, viz kapitola 2.5).

Další zajímavostí je přímá úměrnost mezi M_s frakce PM1 a rychlostí větru. Pakliže se ve frakci PM1 vyskytují právě částice z průmyslového spalování, a kromě organických složek i kovy (viz kapitola 2.2, Obr. 2.2) – což právě vysoká magnetizace potvrzuje, tak je velmi pozoruhodné, že se tyto částice opravdu vyskytují při vyšších rychlostech větru. Pro PM10 je tomu sice naopak, ale tato data zdaleka nemají takovou statistickou významnost (mnohem nižší hodnota spolehlivosti R²).

Neméně pozoruhodným fenoménem je, že všechny vysoké hodnoty M_s byly naměřeny na filtrech odebraných v těchto obdobích: 16. 2. – 17. 2., 17. 2. a 17. – 18. 2., což jsou právě ty z analyzovaných dnů, ve kterých byl směr vanoucího větru především od ostravských hutí a průmyslových závodů (na rozdíl od všech ostatních dnů, kdy převažoval vítr spíše severovýchodní, a naměřená frakce mohla také hojněji pocházet ze sekundární prašnosti).

Dále lze interpretovat, že se při vyšších teplotách zvyšuje magnetismus jak frakce PM1 (i když zde nepatrně), tak frakce PM10 (významněji), což opět potvrzuje myšlenky v kapitole 2.5.



Obr. 6.12 Grafy nízké M_s /meteorologické parametry, ostravské filtry.

Z obrázku 6.12 již určité trendy pro běžné hodnoty nasycené magnetizace a meteorologické parametry také lze vyčíst, neboť hodnoty vždy pro obě měřené frakce (PM1 i PM10) zároveň vykazují vždy buď přímou, nebo nepřímou úměrnost. Celkově lze tedy

shrnout, že pro ostravské filtry o nižší nasycené magnetizaci (Zajímavé je, že nyní teplota závisí na vlhkosti vzduchu nepřímo úměrně.)

Také je zajímavé, že vzorky o nižší magnetické susceptibilitě se v prachu vyskytovaly za nižších teplot vzduchu než vzorky s vyššími M_s , což ale spolu souviset nemusí, protože data jsou jen z omezeného rozmezí teplot a dat není mnoho.

6.4 Korelace mezi magnetometrickými a spektrometrickými výsledky

Hodnoty Pearsonových korelačních koeficientů mezi výsledky magnetometrických a spektrometrických analýz lze najít v tabulkách 6.10 a 6.11.

Tab. 6.10 Korelační koeficienty pro M_s /kovy.

Hodnoty r pro dané parametry	M_s [Am ² /kg]/kovy [keV]	Počet dat (filtrů)	Nepoužité vzorky
Praha PM1	-0,75	8	---
Praha PM2,5	-0,50	8	---
Praha PM10	-0,64	6	G219, G239
Praha TSP	-0,40	7	---
Praha PM1, PM2,5, PM10, TSP	-0,25	29	G219, G239
Ostrava PM1 (vysoké M_s)	0,84	3	vše kromě G143, G145 a G147
Ostrava PM10 (vysoké M_s)	0,33	4	vše kromě G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1 (nízké M_s)	0,04	17	G143, G145, G147
Ostrava PM10 (nízké M_s)	0,23	16	G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1	0,81	20	---
Ostrava PM10	0,67	20	---
Ostrava PM1 i PM10 (vysoké M_s)	0,65	7	vše kromě G143, G145, G147, G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1 i PM10 (nízké M_s)	0,35	33	vše kromě G143, G145, G147, G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1 i PM10	0,66	40	---

Tab. 6.11 Korelační koeficienty pro H_c /kovy.

Hodnoty r pro dané parametry	H_c [Oe]/kovy [keV]	Počet dat (filtrů)	Nepoužité vzorky
Praha PM1	-0,66	8	---
Praha PM2,5	-0,37	8	---
Praha PM10	0,01	6	G219, G239
Praha TSP	-0,40	7	---
Praha PM1, PM2,5, PM10, TSP	0,17	29	G219, G239
Ostrava PM1 (vysoké M_s)	-0,94	3	vše kromě G143, G145 a G147
Ostrava PM10 (vysoké M_s)	-0,12	4	vše kromě G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1 (nízké M_s)	0,02	17	G143, G145, G147
Ostrava PM10 (nízké M_s)	0,18	16	G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1	0,12	20	---
Ostrava PM10	0,14	20	---
Ostrava PM1 i PM10 (vysoké M_s)	0,15	7	vše kromě G143, G145, G147, G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1 i PM10 (nízké M_s)	0,26	33	vše kromě G143, G145, G147, G144, G146, G148 a G74
Ostrava PM1 i PM10	0,27	40	---

7.1 Diskuze

Z výsledků těchto měření nelze udělat jednoznačné posudky dané problematiky (ani pro jedno z měření). Důvodů je několik:

- o nedostatečný počet dat a tím malé statistické významy výsledků,
- o analýzy dva roky starých vzorků – laboratorní měření proběhla v roce 2014, kdežto in situ měření (odběr vzorků) v roce 2012,

Během této doby mohlo dojít a pravděpodobně také došlo k různým chemickým procesům, například k mikroskopické korozi, která ovlivňuje jak chemické složení látek (a tím také výsledky rentgenfluorescenčního měření), tak částečně jejich magnetické vlastnosti. Ačkoli byly filtry ihned po použití zapečetěny v ochranné atmosféře “polyethylenového” obalu, stále byly do určité míry

vystaveny působení vnějších vlivů (změn teploty, osvětlení atp.), navíc nešlo o vakuum.

- meteorologická data nepocházela přímo z místa měření (ale z lokality vzdálené několik minut chůze),

Zde mohly být poněkud odlišné meteorologické podmínky (především vítr se mohl stáčet trochu jiným směrem).

Doporučuji pokračovat ve výzkumu tohoto atraktivního a vysoce důležitého tématu k zevrubnějšímu prozkoumání: bylo by dobré odebrat a zkoumat větší počet vzorků, aby výsledky poskytly relevantní závěry.

Rovněž si myslím, že by bylo vhodné vzorky odebírat na obou lokalitách ve stejnou dobu, aby se znečištění dalo porovnávat za podobných až totožných vnějších podmínek. A zároveň doporučuji měření na lokalitě jak v zimě, tak v létě, pro porovnání účinku klimatických vlivů.

Co se týká lokality Ostrava-Bartovice, bylo by lepší, měřit meteorologické parametry přímo u stanoviště odběru. Zároveň navrhuji i měření meteorologických parametrů i při (a též v místě) odběru prachových částic.

Domnívám se proto, že by bylo vhodné prozkoumat vzorky také pomocí mikroskopu a blíže určit obsah a vzhled jednotlivých magnetických minerálů a porovnat minerální charakteristikami prachu z obou lokalit. A dále určit vliv koroze na mikroskopické kovové částice.

7.2 Závěr

Tato diplomová práce porovnávala magnetometrické, spektrometrické a hmotnostní charakteristiky PM₁, PM₂, PM₁₀ a TSP frakcí polétavého prachu ze dvou odlišných lokalit: u Pražského okruhu (dálnice D0) a v blízkosti ostravských hutí. Na druhém stanovišti probíhalo zároveň i měření meteorologických podmínek.

Svémi výsledky se snažila přispět především k výzkumu vhodnosti a limitů magnetometrického zkoumání emisí polétavého prachu v místech, kde automobilová doprava nebo průmyslové činnosti nejvýznamněji přispívají k těmto emisím.

Z vzorků prachových částic se po průzkumu vibračním vzorkovacím magnetometrem a RTG fluorescenčním spektrometrem vyšetřily magnetické vlastnosti (především hodnoty nasycené magnetizace a koerzivní síly) a koncentrace těžkých a toxických kovů často se vyskytujících v emisích z těchto antropogenních zdrojů.

V případě vzorků prachových frakcí z průmyslového zdroje se odhalily též vzájemné vztahy těchto veličin k meteorologickým parametrům.

Z několika zajímavějších fenoménů výsledků studie (viz kapitola 6) lze například akcentovat statisticky významnější nepřímou úměrnost mezi hodnotami nasycené magnetizace M_s a koncentrací prachu pro ostravské vzorky frakcí PM1 i PM10 (Obr. 6.10). Výsledek v podstatě odkazuje na myšlenku, že čím více bylo v ovzduší prachu, tím méně oxidů železa se v něm nacházelo. Je to něco zcela překvapivého a neočekávaného a mohlo by to být přínosné pro další analýzy. Možné je, že polévatý prach například za specifických povětrnostních podmínek nepochází ve větší míře právě z ostravských hutí, ale odlišných míst v okolí je bohatší na nemagnetické částice (poznámka: vlivy však mohou být různé anebo se může jednat o kombinaci několika faktorů: například i jiné meteorologické parametry než vítr a jiné faktory vstupující „na scénu“, jako jsou státní svátky a prázdninový provoz průmyslové části, nabohacení ovzduší jinými – chemicky reaktivními – látkami potlačujícími a možná i zdánlivě nesmyslné faktory jako je blízkost ostravské zoologické zahrady, to vše jsou ale pouze domněnky hodné objasnění).

Diplomová práce dokládá, že nebyla potvrzena statisticky významnější regrese ani korelace mezi posuzovanými dvojicemi proměnných. Shromážděná data a jejich tabulkovou a grafickou prezentaci lze použít jako doplněk k rozsáhlejším průzkumům.

Literatura

- ČHMÚ (2015): *Předběžné zhodnocení kvality ovzduší a rozptylových podmínek v roce 2014, Zpráva ČHMÚ ze dne 29. 1. 2015, 10 str.*
- Munzar J. (1989): *Malý průvodce meteorologií, Mladá fronta, 1. vyd., Praha, 248 str.*
- Dunlop S. (2001): *A dictionary of the weather, Oxford University Press, 2. vydání, ISBN 0-19-861049-1, Oxford, 268 str.*
- Vejvoda J., Machač P., Buryan P. (2003): *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů, Praha, VŠCHT, 226 s.*
- Heller F., Strzyszczyński Z., Magiera T. (1998): *Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland, Journal of Geophysical Research, vol. 103, No. B8, str. 17767–17774.*
- Hykyšová S. (2006): *Neviditelný prach, Vesmír 6/2006, roč. 85 (136), str. 344–345.*
- Hunt A. (1986): *The application of mineral magnetic methods to atmospheric aerosol discrimination, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 42, str. 10–21.*
- Marié D. C., Chaparro M. A. E., Gogorza C. S. G., Navas A., Sinito A. M. (2010): *Vehicle-derived emissions and pollution on the road Autovia 2 investigated by rock-magnetic parameters: A case study from Argentina, Stud. Geophys. Geod. 54, str. 135–152.*
- Skácel F., Tekáč V. (2007): *Podklady pro Ministerstvo životního prostředí k provádění Protokolu o PRTR – přehled metod měření a identifikace látek sledovaných podle Protokolu o registrech uniků a přenosů znečišťujících látek v únicích do ovzduší, VŠCHT Praha, MŽP Praha.*
- Pope C. A., Dockery D. W. (2006): *Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect, Journal of the Air & Waste Management Association, 56, ISSN 1047-3289, str. 709–742.*
- Chaparro M. A. E., Marié D. C., Gogorza C. S. G., Navas A., Sinito A. M. (2010): *Magnetic studies and scanning electron microscopy – X-ray energy dispersive spectroscopy analyses of road sediments, soils and vehicle derived emissions, Stud. Geophys. Geod., 54, str. 633–650.*
- Heyder J. (1986): *Single particle deposition in human airways, v Spurny, K. R. (ed.), Physical and Chemical Characterization of Individual Airborne Particles, str. 73–85.*
- Rizzio E., Giaveri G., Arginelli D., Gini L., Profumo A., Gallorini M. (1999): *Trace elements total content and particle sizes distribution in the air particulate matter of rural–residential area in the north Italy investigated by instrumental neutron activation analysis, Science of the Total Environment, 226 (1), str. 47–56.*
- Palmgren F., Wahllin P., Kildesó J., Afsahri A., Fogh C. L. (2003): *Characterisation of particle emissions from the driving car fleet and the contribution to ambient and indoor particle concentrations, Physics and Chemistry of the Earth, 28, str. 327–334.*
- Braníš M. (2003): *Aktuální otázky znečištění ovzduší, Univerzita Karlova, ISBN 80-239-2187-8, Praha, 352 str.*
- Hájek J., Kříž A., Průcha V., Šimeček J. (2016): *Kryogenní zpracování brzdových kotoučů, Západočeská univerzita v Plzni, 11 str.*
- Thorpe A., Harrison R. M. (2008): *Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review, Science of the Total Environment, 400, str. 270–282.*

- Hromádka Jan, Hromádka Jiří, Hönig V., Miler P. (2011): *Spalovací motory: Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol, 1. vyd., Grada, 296 str.*
- Kirschvink J. L., Kobayashi-Kirschvink A., Woodford B. J. (1992): *Magnetite biomineralization in the human brain, Proc Natl Acad Sci U S A, 89 (16), str. 7683-7687.*
- SZÚ (2012): *Měření kvality venkovního ovzduší – Komořanský tunel, Národní referenční laboratoř pro venkovní ovzduší Centra hygieny životního prostředí Státního zdravotního ústavu v Praze, stran 29.*
- Petrovský E. (2014): *Poznámky ke kurzu Magnetomineralogie (PřF UK).*
- Hoffmann V., Knab M., Appel E. (1999): *Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution, Journal of Geochemical Exploration 66, s. 313–326.*
- Heller F., Strzyszczyk Z., Magiera T. (1998): *Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland, Journal Of Geophysical Research, vol. 103, no. B8, s. 17767-17774.*
- Handy, R. L., Davidson D. T. (1953): *On the curious resemblance between fly ash and the meteoritic dust, Proc. Iowa Acad. Sci., 60, 373-379.*
- Pipal A. S., Kulshrestha A., Taneja A. (2011): *Characterization and morphological analysis of airborne PM_{2.5} and PM₁₀ in Agra, located in northcentral India, Atmospheric Environment 45, 3621-3630, str. 3622*
- Revuelta M. A., McIntosh G., Pey J., Pérez N., Querol X., Alastuey A. (2014): *Partitioning of magnetic particles in PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ aerosols in the urban atmosphere of Barcelona (Spain), Environmental Pollution 188, 109-117, s. 109-117.*
- Gscheidle R. a kol. (2007): *Příručka pro automechanika, 3. přeprac. vydání, Europa-Sobotáles, s. 685.*
- Dominick D., Latif M. T., Juahir H., Aris A. Z., Zain S. H. (2012): *An assessment of influence of meteorological factors on PM₁₀ and NO₂ at selected stations in Malaysia, Sustain. Environ. Res., 22(5), s. 305-315.*
- Azmi S. Z., Latif M. T., A. S. Ismail, Juneng L., Jemain A. A. (2010): *Trend and status of air quality at three different monitoring stations in the Klang Valley, Malaysia, Air Qual Atmos Health (3), s. 53–64.*
- Giri D., Krishna Murthy V., Adhikary P. R. (2008): *The Influence of Meteorological Conditions on PM₁₀ Concentrations in Kathmandu Valley, Int. J. Environ. Res., 2(1), s. 49-60.*
- Evans J. D. (1996): *Straightforward statistics for the behavioral sciences, ISBN-13: 978-0534231002, ISBN-10: 0534231004, Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing, s. 122.*
- Awang m. B., Jaafar A. B., Abdullah A. M., Ismail M. B., Hassan M. N., Abdullah R., Johan S., Noor H. (200): *Air quality in Malaysia: Impacts, management issues and future challenges, Respirology (5), s. 183-196.*
- Guo Z. T., Ruddiman W. F., Hao Q. Z., Wu H. B., Qiao Y. S., Zhu R. X., Peng S. Z., Wei J. J., Yuan B. Y. a Liu T. S. (2002): *Onset of desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China, Nature 416, s. 159-163.*
- Maher B. A. (1986): *Characterization of soil by mineral magnetic measurement, Phys. Earth Planet Int. 42, 76-92.*

- Oldfield F. (1981): *Peat and lake sediments: formation, stratigraphy, description and nomenclature*, 306-26, v *Geomorphological techniques*, Goudie A. (ed.), London: George Allen & Unwin.
- Maher B. A. (1984): *Origins and transformations of magnetic minerals in soils*, nepublikovaná Ph.D práce, University of Liverpool.
- Hanzlik M., Winklhofer M., Petersen N. (1996): *Spatial arrangement of chains of magnetosomes in magnetotactic bacteria*, *Earth and Planetary Science Letters* 145, s. 125-134.
- Hanzlik M. (1999): *Elektronenmikroskopische and magnetomineralogische Untersuchungen an magnetotaktischen Bakterien des Chiemsees und an bakteriellem Magnetit eisenreduzierender Bakterien*, Ph.D práce, University of Munich.
- Evans M. E., Heller F. (2003): *Environmental Magnetism*, Elsevier Science (USA), s. 299.
- Williams R. J. P. (1990): *Iron and the origin of life*. *Nature* 343, s. 213-214.
- Flanders P. J. (1994): *Measurement and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment*, *Journal of Applied Physics* 75, s. 5931-5936.
- Dunlop D. J. (2002): *Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 2: Application to data for rocks, sediments and soils*, *Journal of Geophysical Research* 107 (B3), 15 s.
- Dunlop D. J., Özdemir Ö. (1997): *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*, Cambridge Stud. Magn., vol. 3, Cambridge Univ. Press, New York, 266 s. (...)
- Fabian K., Kirchner A., Williams W., Heider F., Leibl T., Hubert A. (1996): *Three-dimensional micromagnetic calculations for magnetite using FFT*, *Journal of Geophysical Research* 124, s. 89-104.
- Thompson R., Oldfield, F. (1986): *Environmental Magnetism*, Allen and Unwin, London, UK, 299 s.
- Dunlop D. J., Ozdemir O. (1997): *Rock Magnetism*, Cambridge University Press, Cambridge, 573 s.
- Kruiver P. P., Dekkers M. J., Heslop D. (2001): *Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation*, *Earth and Planetary Science Letters* 189, s. 269-276.
- Lowrie W. (2007): *Fundamentals of geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 381 s.
- Burianová L., Čmelík M., Machonský L., Panoš S. et al. (2012): *Úvod do fyzikálních měření*, TUL, Liberec, ISBN 978-80-7372-819-9, 80 s.
- Worm H. U., Jackson M. (1999): *The superparamagnetism of Yucca Mountain Tuff*, *Journal of Geophysical Research* 104, s. 25415-25425.
- Bučko M. S., Magiera T., Johanson B., Petrovský E., Pesonen L. J. (2011): *Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses*, *Environmental Pollution* 159, s. 1266-1276.
- Thorpe A., Harrison R. M. (2008): *Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review*, *Science of Total Environment* 400, s. 270-282.
- Blecha V. (2012): *Poznámky k přednáškám předmětu Magnetometrický průzkum*, Praha, PŘF UK.

Internetové zdroje

Biomasa-info.cz: <http://www.biomasa-info.cz/cs/ekotzl.htm> [cit. 2017-05-04]

ČHMÚ¹: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/slovnicek-zakladnich-pojmu>
[cit. 2018-04-17]

EEA: <http://www.eea.europa.eu/publications/eea-signals-2013> [cit. 2014-11-11]

EPA¹: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>,
[cit. 2017-01-07]

Epa.gov: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/pm2.5_scale_graphic-color_2.jpg

Janeček E. (2014): <https://www.novinky.cz/bydleni/nemoci-nemovitosti/344913-azbest-nebezpecny-material-na-nasich-domech-vlastnosti-a-zdravotni-rizika.html> [cit. 2017-12-30]

MŽP¹: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/5BC8D18C9B814A6EC125772E00539B7A/\\$file/OVV-poletavy_prach-20100525.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/5BC8D18C9B814A6EC125772E00539B7A/$file/OVV-poletavy_prach-20100525.pdf) [cit. 2017-12-27]

MŽP²: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpracovani_rozptylovych_studii_metodika/\\$FILE/OOO-Metodicky_pokynRS-20130805.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpracovani_rozptylovych_studii_metodika/$FILE/OOO-Metodicky_pokynRS-20130805.pdf) [cit. 2016-12-05]

WHO¹: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_polluted_cities_by_particulate_matter_concentration
[cit. 2017-12-27]

<http://www.mestodokapsy.cz/mikroklima-okoli-skoly/?rok=2013-2014&skola=zs-namesti-curieovych&kapsa=ovzdusi> [cit. 2017-12-31]

Obr. WHO 2016: http://gamapserver.who.int/mapLibrary/Files/Maps/Global_pm25_cities.png?ua=1
[cit. 2017-01-08]

ČHMÚ²: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/12embil/rezso1_4/rezso1_4_CZ.html
[cit. 2017-01-08]

in-pocasi.cz: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vlhkost-vzduchu/> [cit. 2018-01-09]

en.wikipedia.org:
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_polluted_cities_by_particulate_matter_concentration
[cit. 2017-12-27]

http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/Ulohy_AC.pdf (citováno 9. 5. 2017).

ČHMÚ (Obr.): <http://www.mb-eko.cz/hlavni/aktualita/tak-je-to-zase-za-nami> [cit. 2017-05-10]

https://cs.wikipedia.org/wiki/Komo%C5%99ansk%C3%BD_tunel [cit. 2017-07-09]

ČSÚ: Český statistický úřad, Statistický lexikon obcí 2013. Základní údaje za obce, části obcí a základní sídelní jednotky podle krajů a okresů. Moravskoslezský kraj – okres Ostrava-město [online], 2013-10-31, dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/4116-13-n_2013-05

[cit. 2017-07-10]

http://ostrava.idnes.cz/nejhors-i-ovzdusi-ale-take-levne-pozemky-plati-u-ostravske-huti-psn-/ostrava-zpravy.aspx?c=A110717_070820_ostrava-zpravy_jog [cit. 2015-05-23]

http://ostrava.idnes.cz/foto.aspx?foto1=TOM178c3d_4.JPG [cit. 2015-05-24]

enpedie.cz: [http://enpedie.cz/wiki/Rentgenofluorescen%C4%8Dn%C3%AD_anal%C3%BDza_\(XRF\)](http://enpedie.cz/wiki/Rentgenofluorescen%C4%8Dn%C3%AD_anal%C3%BDza_(XRF)) [cit. 2017-06-20]

<http://www.spectro.cz/fluorescenci-spektrometr-spectro-xsort/> [cit. 2017-06-20]

Wikipedia.cz: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Spektrometr> [cit. 2017-06-24]

<http://www.spectro.cz/rentgenove-spektrometry/> [cit. 2015-07-09]

HELAGO: <https://www.helago-cz.cz/eshop-hr-202i-vaha-jemna-127644.html> [cit. 2018-05-02]

CHMI 2018: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr98cz/kap_0236/kap_0236.htm [cit. 2018-02-20]

<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/10131166> [cit. 2018-05-05]