

Masarykova univerzita  
Přírodovědecká fakulta

Ústav geologických věd



**Rešerše k bakalářské práci využití rentgen-fluorescenční  
spektrometrie při hodnocení anorganických příměsí  
organikou bohatých maticí**

Anna Walterová

3. ročník - Geologie

Brno, únor 2018

## **Obsah**

<b>1. Úvod</b> .....	3
<b>2. Metoda rentgen-fluorescenční spektrometrie</b> .....	4
<b>3. Obory využití</b> .....	7
3.1. Půda a její hlavní složky.....	8
3.2. Uhlí.....	10
3.3. Pigmenty.....	13

## 1. Úvod

Ráda bych ve své rešeršní práci více objasnila a přiblížila téma mojí bakalářské práce nesoucí název „Využití rentgen-fluorescenční spektrometrie při hodnocení anorganických příměsí organikou bohatých maticí“.

Rentgen-fluorescenční analyzátory (RFA) se uplatňují v celé řadě vědních oborů. Jejich obliba je dána poměrně jednoduchou obsluhou a okamžitým stanovením prvkového složení hodnoceného materiálu. Zdánlivá jednoduchost měření ale na druhé straně vzbuzuje velké nejistoty ohledně přesnosti a správnosti stanovení. Z těchto důvodů je velmi žádoucí měření materiálů známého složení a ověření vypovídací schopnosti přístroje pro vybranou matici.

V předložené rešeršní práci nejprve uvedu princip metody rentgenové fluorescenční spektrometrie. Následující kapitoly jsou pak věnovány základnímu popisu maticí, jejichž prvkové složení budu hodnotit ve své bakalářské práci. Jedná se hlavně o využití při hodnocení kontaminaci půd kontaminovaných ropou, uhlí a pigmentů.

## 2. Metoda rentgen-fluorescenční spektrometrie

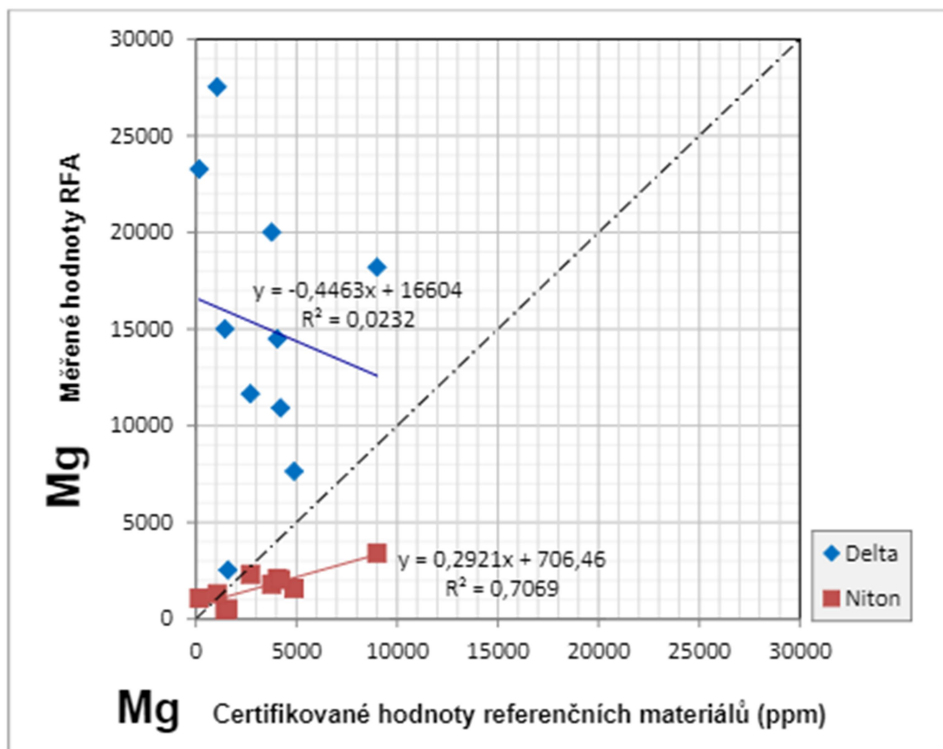
Metoda rentgen-fluorescenční spektrometrie patří mezi instrumentální analytické metody, které jsou využívány především pro prvkovou analýzu pevných, ale i kapalných vzorků. Jedná se o relativně přesnou, rychlou a hlavně nedestruktivní metodu, která umožňuje provést prvkovou analýzu i s malým množstvím zkoumaného materiálu a krátkou dobou přípravy vzorku (Rouessac a Rouessac, 2004).

Rentgenová fluorescenční spektrometrie je metoda, jejíž počátky sahají až do prvních let 20. století. První komerční prototyp fluorescenčního spektrometru byl vyroben v 50. letech. Fluorescenční spektrometry dělíme na dva základní typy - vlnově disperzní a energiově disperzní. Zatímco u vlnově disperzních spektrometrů dochází k separaci rtg záření na krystalu na základě různých vlnových délek, u energiově disperzních spektrometrů dochází k detekci na základě různých energií fotonů sekundárního rtg záření (Koplík, 2011).

Terénní rentgen-fluorescenční (RFA) analyzátory obvykle umožňují v základním provedení stanovit koncentrace následujících chemických prvků: Al, Ag, As, Au, Ba, Bi, Ca, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Hf, Hg, In, K, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Rb, Re, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ta, Ti, Tl, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr.

Princip stanovení chemických prvků metodou RFA (obr. 2) je založen na působení rentgenového záření o vlnové délce 10 nm (a menší) na chemické prvky v povrchové vrstvě zkoumaného předmětu. Dopadající rentgenové záření vybudí elektrony z vnitřních elektronových hladin do vyšších orbitalů. Uvolněné místo je zaplněno některým z elektronů z vyšších energetických hladin. Přejít elektronu z vyšší na nižší energetickou hladinu je doprovázen emisí fluorescenčního záření. Vznikne tak rtg emisní spektrum, které odpovídá přítomným prvkům. V měřicím přístroji je upraveno kolimátorem a analyzujícím krystalem. Detekce se provádí vhodným detektorem, který analyzuje intenzitu fluorescenčního záření. Každý prvek charakterizuje jedinečný soubor emisních čar (K, L, M), které mají definovanou energii a intenzitu. Na základě poloh (energetických hodnot) jednotlivých čar ve vyzářeném spektru je

možné stanovit prvky obsažené ve studovaném vzorku (obr. 1). Analýza intenzit (výšek) jejich čar stanovuje kvantitativní zastoupení.

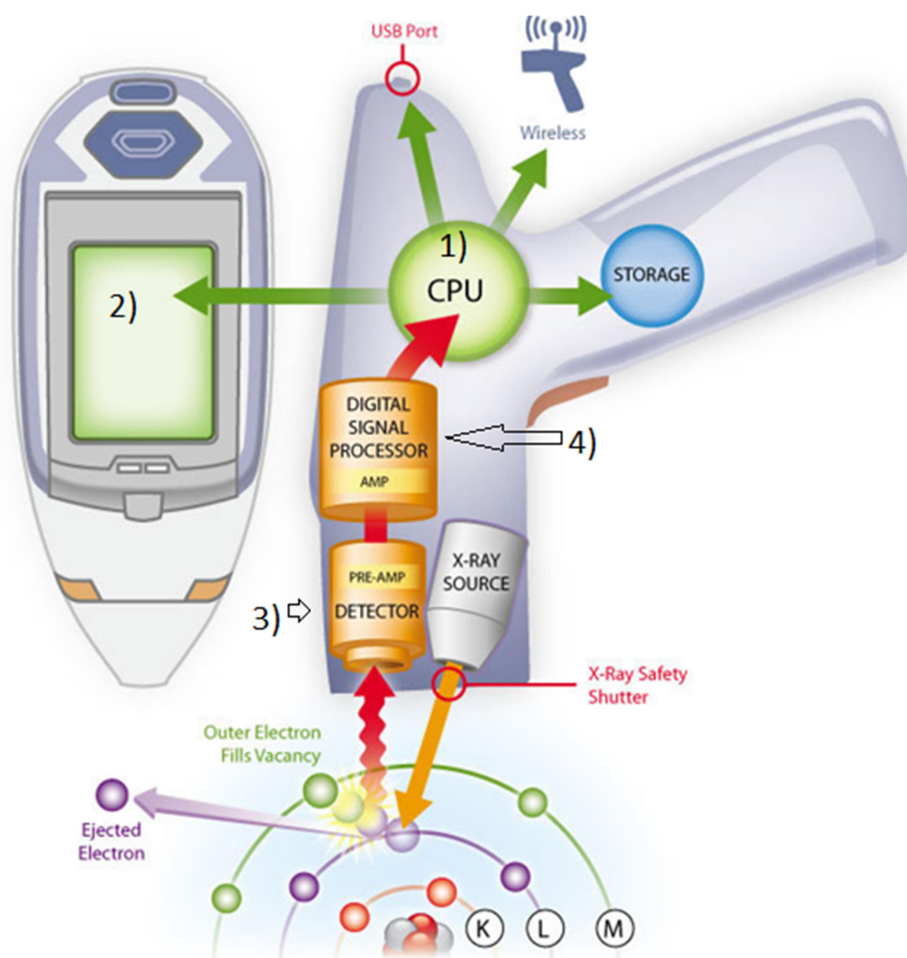


Obr. 1 Závislost u dané (x) a naměřené (y) koncentrace hořčíku, Mg (Geršl, Mareček, Krčálová, 2017, <http://docplayer.cz/69182448-Milan-gersl-jan-marecek-eva-krcalova.html>).

Z emisního rentgenového spektra lze analyzovat prvky, které jsou ve vzorku přítomny, a to podle detekovaných vlnových délek (resp. energií) fluorescenčního záření. Citlivost metody umožňuje stanovení většiny prvků s přesností v  $\text{mg.kg}^{-1}$  (ppm). Pro stanovení množství jednotlivých prvků je použita intenzita jejich charakteristických spektrálních linií (Fišera et. al, 2003). Záznam výsledků zobrazuje měřený prvek, vypočtenou koncentraci a chybu měření vyjádřenou jako statistická odchylka 1 sigma,

$$\sigma = \sqrt{D(X)}$$

kde  $D(X)$  označuje rozptyl náhodné veličiny  $X$ .



Obr. 2 Přenosný rentgen – fluorescenční spektrometr (Geršl, Mareček, Krčálová, 2017, <http://docplayer.cz/69182448-Milan-gerisl-jan-marecek-eva-krcalova.html>)

*Legenda - obr. 2*

Hlavní komponenty:

- 1) zdroj RTG záření – rentgenová lampa
- 2) displej
- 3) detektor
- 4) mikroprocesor s energiovým analyzátoem

Spektrometr pro rentgenovou fluorescenční analýzu se principem uspořádání svých základních částí shoduje s jinými spektrometry. Budící rentgenové záření ze zdroje dopadá na vzorek. Rentgenové záření emitované vzorkem se rozkládá podle energií analyzátozem, rozložené monochromatické záření dopadá na detektor, jehož signál se registruje.

### **3. Obory využití**

Využití rentgenové fluorescenční spektrometrie je velmi široké. Zasahuje do všech oblastí průmyslu i výzkumu. Tato metoda je schopna identifikovat prvky v rozsahu Al-U na vzduchu a při použití vakua je možno identifikovat až Be.

Podle Geršla a Knésla (2009) se například terénní RFA stává výborným pomocníkem, umožňujícím rychlou orientaci při terénních pracích, obzvláště při environmentálním posouzení kontaminace půd, řečištních sedimentů i vegetace. Při geologicko-průzkumných pracích může tento přístroj ušetřit náklady na laboratorní práce, kdy je možno zadávat jen zajímavé vzorky s koncentracemi studovaných prvků nad předem stanovenou mez na laboratorní vyhodnocení.

Kromě tradičních oborů jako je geologie či medicína se dnes rentgen-fluorescenční spektrometrie stále více uplatňuje také v životním prostředí, kde slouží k měření a analýze polutantů ze vzduchu či kovů ve vzorcích vody (Geršl a Knésl, 2009).

Stále populárnější se tato metoda stává také v archeologii, kde se využívá ke zjišťování složení skla, porcelánu či keramiky. Reakcí na nové objevy bylo založení nových laboratoří, specializujících se na zkoumání uměleckých předmětů. Druhý velký rozvoj souvisí s využíváním optických metod a metod založených na vlastnostech atomového jádra a ionizujícího záření v posledních desetiletích. Velký podíl na tom měla rychle se rozvíjející elektronika, bez níž by k takovému rozvoji určitě nedošlo. Ze všech analytických metod, založených na vlastnostech atomového jádra a ionizujícího záření, se při studiu nálezů uplatnila právě RFA. Zařadila se tak mezi analytické metody, které napomohly vzniku u nás nového vědního oboru Archeometrie (Trojek, 2005).

V neposlední řadě se metoda hojně využívá v průmyslu, např. papírenství nebo metalurgii pro kontrolu kvality (Jenkins, 1999). V biologii mohou některé těžké kovy v organickém materiálu (např. mechy a lišejníky) sloužit jako bioindikátory. Mnoho takových prvků je možné analyzovat díky rentgen-fluorescenční analýze, aniž by bylo nutné použít chemickou separaci.

Metoda se také používá v materiálové vědě k analýze slitin a technických materiálů. V analýze polutantů se pak často využívá metody rentgenové fluorescence ke kvantitativní analýze různých prvků přítomných ve vzorcích aerosolů (Verma, 2007). Vzorek je ozařován rentgenovým zářením s dostatečnou energií, čímž dojde k excitaci atomů ve vzorku a vyzáření charakteristického sekundárního rentgenového záření (Christian et al., 2014).

### **3.1. Půda a její hlavní složky**

Většina kovů a polokovů se vyskytuje v půdách, kde jejich množství a forma výskytu odráží geochemické složení geologického podloží nebo kontaminaci analyzovaného materiálu.

Zvětráváním se označuje proces, při kterém dochází k působení chemických, fyzikálních, či biologických sil na obnažené horniny. Zvětrávání může v průběhu milionů let vést k rozpadu hornin a následné erozi vedoucí k celkovému přetvoření vzhledu krajiny. Rychlost zvětrávání závisí na složení horniny, na klimatických podmínkách, nadmořské výšce, reliéfu krajiny a vegetačním pokryvu. Zvětrávání můžeme rozdělit podle převládajícího typu působící síly. Rozlišujeme fyzikální, chemické a biologické zvětrávání. Zvětrávání fyzikální je proces, při kterém dochází k mechanickému rozpadu hornin za působení fyzikálních činitelů bez změny vlastního chemického složení. Při chemickém zvětrávání dochází k přeměně primárních minerálů na minerály sekundární. Zvětrávání biologické je způsobeno činností živých organismů, převážně mikroorganismů a lišejníků.

## **Složení půdy**

Půda reprezentuje akumulaci sypkého materiálu vzniklého na zemském povrchu zvětráváním hornin a vzniká půdotvorným procesem. Skládá se z plynné, kapalné a pevné fáze. Významnou složkou půdy je živá složka, která má nezastupitelnou roli.

### **Pevná fáze půdy**

Pevná fáze půdy je tvořená organickou a anorganickou složkou. Anorganická složka je zastoupena minerály a horninami nejrozmanitějšího složení a zrnitostní frakce. Minerální podíl představuje u většiny našich půd 95 - 98 % hmotnosti sušiny všech tuhých částic půdy. Podstatně menší část (2 - 5 %) tvoří organický podíl půdy tzv. humus, který je ale klíčový pro výživu rostlin a také zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu.

### **Kapalná fáze půdy**

Kapalnou fází půdy rozumíme půdní vodu, která je klíčová při oběhu biogenních prvků a živin, které jsou nepostradatelné pro existenci edafonu a biomasy. Z hlediska výživy je důležitý nejen transport látek z půdního roztoku do živých buněk kořenového systému rostlin, ale i vertikální transport půdním profilem. Ten je příčinou ztrát živin vymytím do nižších vrstev. Vymývány nejsou pouze živiny dodané hnojivy, ale také živiny půdní zásoby a živiny uvolněné mineralizací půdní organické hmoty i půdotvornými procesy z minerálního matečného substrátu.

### **Plynná fáze půdy**

Plynná fáze půdy - půdní vzduch vyplňuje póry bez vody a oproti atmosférickému vzduchu obsahuje zpravidla více CO<sub>2</sub>, méně O<sub>2</sub> a zvýšené množství vodních par. I když mezi půdou a ovzduším dochází neustále k výměně plynných složek, nedochází k plynulému vyrovnávání rozdílů. Oxid uhličitý v půdním vzduchu dosahuje v průměru 0,3 %. V podmínkách nedostatečné aerace může obsah CO<sub>2</sub> činit 1 - 5 %. Obsah CO<sub>2</sub> se v půdě zvyšuje v důsledku rozkladu organických látek půdními mikroorganismy, dýcháním kořeny rostlin a nedostatečným

provzdušněním. Oxid uhličitý s vodou tvoří kyselinu uhličitou ( $H_2CO_3$ ), která je významným regulátorem reakce půdy (rozmezí pH 5,2 - 6,5) a působí přímo i při výživě rostlin uhlíkem.

## Degradace půd

Degradace půdy je proces, při kterém dochází ke snížení úrodnosti a využitelnosti půdy. Je podmíněna využitím krajiny, způsobem hospodaření a celkovým rázem krajiny. Rozlišujeme degradaci podle faktorů, které ji způsobují a to vodní, větrnou, fyzikální a chemickou. Chemická degradace je spojena s vnášením chemických látek ze zemědělské a průmyslové činnosti do prostředí, případně se změnou pH půdy způsobenou kyselými srážkami. Do půdního prostředí ale mohou některé prvky vstupovat ve významném množství také z primárních zdrojů, jako jsou nerosty a horniny bohaté na některé potenciálně toxické kovy, jako je např. U, Zn, As (Beneš, 1993).

## 3.2. Uhlí

Podle chemického složení a technologických vlastností rozlišujeme následující základní typy uhelné hmoty (tab. 1): rašelina, lignit, hnědé uhlí, černé uhlí, antracit. Detailně tuto problematiku rozebírají např. monografie nebo Taylor (1998).

**Tab. 1** Základní vlastnosti kaustobiolitů uhelné řady (podle Hubáček et al. 1962, ČSN 44 1390).  $C^{daf}$  - obsah uhlíku v hořlavině - i dále (%),  $H^{daf}$  - obsah vodíku (%),  $O^{daf}$  - obsah kyslíku (%),  $N^{daf}$  - obsah dusíku (%),  $V^{daf}$  - obsah prchavé hořlaviny (%),  $W_t^r$  - obsah veškeré vody původního vzorku (%),  $Q_i^r$  - výhřevnost původního vzorku (MJ/kg),  $R_0$  - střední odraznost vitrinitu (%).

	$C^{daf}$	$O^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$V^{daf}$	$W_t^r$	$Q_i^r$	$R_0$
<b>rašelina</b>	50-60	33-40	4,5-6	0,9-3,5	> 60	75-95	< 14,7	< 0,20
<b>lignit</b>	< 65	19-33	< 6	< 1	52-40	> 30	14,7-17,0	> 0,20
<b>hnědé uhlí</b>	65-69	10-19	< 6	< 1	52-40	> 30	17,0-24,4	0,40-0,60
<b>černé uhlí</b>	69-92	10-2	< 5	< 1	40-8	> 5	24,4-32,6	0,60-2,65
<b>antracit</b>	86-98	< 2	< 3	< 1	8-2	> 2	> 32,6	> 2,65

Chemické složení uhlí je velmi proměnlivé a závisí na druhu uhlí. Typické je přibližné složení:

- rašelina -  $C_{50}H_{60}O_{20}$
- hnědé uhlí -  $C_{60}H_{60}O_{12}$
- černé uhlí -  $C_{70}H_{50}O_7$
- antracit -  $C_{78}H_{30}O_{27}$

Kromě uhlíku, kyslíku, vodíku a dusíku obsahují kaustobiolity uhelné řady další prvky, které mohou znehodnocovat surovinu pro další využití.

### **Minoritní a stopové prvky v uhlí**

Kromě základních prvků se v uhlí vyskytují i další prvky a minerály. Popel se pak skládá z dominujících prvků (např. křemík (Si), hliník (Al)), prvků minoritních o obsahu 0,1–1 % a stopových prvků v množství menším než 0,1 %. Celá řada prvků se ve většině případů vyskytuje v několika různých formách, přičemž každá forma představuje jiný typ chemické vazby (Bouška, 1981).

Stopovými prvky se označují ty prvky, jež se v zemské kůře vyskytují do 0,1 váhových % a vzácnými stopovými prvky jsou prvky mající velký průmyslový význam. Uhelny popel proto může být využitelný pro získávání některých cenných prvků, pokud je to ekonomicky výhodné. Mezi ekonomicky zajímavé prvky patří například germanium (Ge), lithium (Li), rubidium (Rb), cesium (Cs), beryllium (Be) a bor (B). Výzkum stopových prvků je ale také důležitý z hlediska ochrany životního prostředí, kde i velmi malé koncentrace prvku mohou být toxické. Při velkých objemech spalovaného uhlí mohou tak být nebezpečné pro život (Swaine, 1990; Kessler, et al., 1965).

## Germanium (Ge)

Germanium lze využít při výrobě elektroniky, jako katalyzátor při chemických reakcích a v lékařství. Zdrojem bývá rostlinná hmota, hydrotermální procesy nebo vulkanická činnost (Mastalerz & Drobniak, 2012). Nejběžněji se vyskytuje vázané na organickou hmotu, čehož je důkazem vysoká přítomnost germania v zuhelnatělých dřevěch a v lignitických inkluzích. Germanium se váže na OH skupinu v huminových kyselinách během tvorby rašeliny. Uhlí s vysokým obsahem germania je možno využít pro jeho průmyslovou výrobu. Není zdraví ani životnímu prostředí škodlivý (Swaine, 1990). Uhlí obsahuje průměrně asi 6 ppm germania (Mastalerz & Drobniak, 2012).

## Lithium (Li)

Lithium spadá mezi alkalické kovy a váže se k anorganické hmotě, převážně k jílům, slídám a turmalínům. Není pravděpodobné, že by škodilo životnímu prostředí. Dosud nebyl pozorován negativní účinek lithia na životní prostředí v souvislosti se spalováním uhlí. Uhlí obsahuje 1-80 ppm lithia (Swaine, 1990).

## Rubidium (Rb)

Množství rubidia v uhlí se pohybuje kolem 2–50 ppm. Nachází se v jílech, především v illitu. Dosud nebyla dokázána škodlivost rubidia na životní prostředí (Swaine, 1990).

## Cesium (Cs)

Cesium je součástí skupiny alkalických kovů, která se v uhlích vyskytuje běžně. Jeho výskyt je spojován s anorganickou hmotou, převážně s muskovitem a jílovými minerály. Jeho přítomnost je také známa v rostlinné hmotě. Dosud nebyl potvrzen žádný negativní vliv cesia na biosféru v souvislosti se spalováním uhlí. Cesium se vyskytuje v množství 0,35 ppm (Swaine, 1990).

## Beryllium (Be)

Beryllium je velmi toxické a jeho inhalace ve formě prachu, kouře nebo aerosolů může způsobit zánět průdušek, zápal plic, kožní onemocnění nebo zánět spojivek. Do ovzduší se může dostávat těžbou i spalováním uhlí (Eskenazy, 2006). Beryllium se váže na organické sloučeniny, jíly, křemen nebo tvoří minerál beryl ( $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ). Beryllia v uhlí bývá maximálně 15 ppm (Swaine, 1990). Jeho obsah v některých uhlích roste s hloubkou sloje a zároveň klesá s vyšším obsahem popelu, ale stupeň prouhelnění nemá na jeho obsah vliv (Bouška, 1981).

## Bor (B)

Bor je těkavý prvek, který při spalování uhlí přechází do plynné fáze. Většina plynného boru se poté naváže do strusky a zbytek je zachycen v odsiřovačích (Noda et al., 2013; Kessler, et al., 1965). V uhlí koncentruje z rostlinné hmoty, termálními procesy nebo je přítomen v anorganické složce uhlí, převážně jako borosilikát. Bor je nezbytný pro správný růst rostlin (Bouška, 1981). Průměrné množství boru v uhlí se pohybuje do 2455 ppm, ale ve světě se také vyskytuje uhlí, které obsahuje i jednotky procent obsahu boru (Swaine, 1990).

### 3.3. Pigmenty

Pigmenty lze definovat jako látky dodávající materiálům barvy, které jsou zároveň nerozpustné ve vodě a v pojivech. Používají se pro své vlastnosti také jako protikoroze ochrana, zvýšení tvrdosti materiálů, zvýšení chemické stability nebo zabránění klimatickým vlivům (sochy, omítky, střechy) (Šimůnková, 1993).

Pigmenty jsou posuzovány podle barvy, odstínu a funkce, kterou plní. Z tohoto hlediska se dají rozdělit na:

- základní pigmenty – plnicí funkci krycí, respektive vybarvovací
  1. bílé pigmenty – zejména titanová běloba a zinková běloba;
  2. pestré pigmenty – zahrnují všechny ostatní barevné odstíny.

- organické pigmenty – dříve se používaly přírodní, ale v dnešní průmyslové výrobě se používají prakticky jen barviva syntetická. Organické pigmenty se připravují vysrážením organických barviv na anorganickém substrátu.

- Anorganické pigmenty jsou:

1. přírodní – minerální materiály (grafit, kaolin, hlinka, ...) se připravují mletím, plavením a sušením přírodních materiálů;
2. syntetické – saze, chroman olovnatý, oxidy železa atd. – pro jejich přípravu používáme chemických postupů (srážení z vodných roztoků, tepelný rozklad atd);
3. kovové – hliník, měď a některé slitiny.

Anorganické pigmenty se rozdělují ještě na přírodní a syntetické. Anorganické pigmenty mají dobré krycí vlastnosti a vysokou teplotní stálost, ale v porovnání s organickými pigmenty mají menší barvicí sílu a nemají takovou škálu odstínů. Z těchto důvodů se uplatňuje mnohem více použití organických pigmentů než anorganických. Výjimku tvoří běloby (zejména titanová a zinková), které svými vlastnostmi přesahují běloby organické.

Anorganické pigmenty své uplatnění nachází hlavně při výrobě nátěrových hmot, vybarvování plastů, syntetických vláken a gumy. Uplatňují se také při výrobě papíru, skla, keramiky. V neposlední řadě je nacházíme v barevné vrstvě nástěnných maleb, polychromových plastik, iluminací rukopisů na papíře atd. (Trojan, Kalenda, Šolc, 1999).

## **Bílé pigmenty**

Mezi bílé pigmenty řadíme hlavně běloby, a to titanovou bělobu ( $\text{TiO}_2$ ), zinkovou bělobu ( $\text{ZnO}$ ), olovnatou bělobu [ $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ ] a barytovou bělobu ( $\text{BaSO}_4$ ). Dále do této skupiny patří přírodní křída ( $\text{CaCO}_3$ ), Litopon (směs  $\text{ZnS}$  a  $\text{BaSO}_4$ ), sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), bílé hlinky a hydroxid hlinitý.

Většina bílých pigmentů absorbuje světlo jen velmi málo, protože zrna, která je tvoří, jsou prakticky bezbarvá. Proto o jejich krycí schopnosti rozhoduje kromě síly absorpce i vzdálenost mezi zrny, jejich tvar a strukturní charakter (krystalické částičky mají větší schopnost odrazu

světla než amorfni). Pro docílení maximální kryvosti existuje tzv. optimální velikost zrn. Mletím lze kryvost bílých pigmentů zvyšovat až do dosažení optimální velikosti, kdy by už další mletí mohlo vést ke zmenšení krycí schopnosti. Další důležitou vlastností bílých pigmentů je jejich vyjasňovací schopnost, což je schopnost měnit (zesvětlovat) barevný odstín jinak zbarveného pigmentu (Pichler, 1999).

### **Pestré pigmenty**

Existuje celá řada pestrých anorganických pigmentů, které můžeme rozdělit do skupin podle zbarvení nebo složení. K nejdůležitějším pestrým pigmentům patří především skupina železitých pigmentů (jejich použití sahá až do pravěku a v dnešní době nachází uplatnění hlavně při výrobě barev, nátěrových hmot a smaltů). Další skupiny představují pigmenty, jejichž základem jsou sloučeniny chromu, olova, kadmia, kobaltu nebo síry. Podle zbarvení je můžeme rozdělit na pigmenty žluté, červené, oranžové, fialové, modré, zelené, černé a hnědé. Od každé skupiny lze vytvořit série odstínů. Černých pigmentů je menší počet, avšak některé z nich (saze) patří objemem své produkce a spotřeby k nejvýznamnějším práškovým materiálům vůbec (Šimůnková, 1993).

## Zdroje:

- BENEŠ, S. (1993): Obsahy a bilance prvků ve sférách životního prostředí. Část 1, Obsahy, akumulace a kritéria hodnocení prvků v zemědělských půdách. Praha: Agrospoj, 1993. 88 s.
- BOUŠKA, V. (1981): Geochemistry of coal. 1. anglické vydání editor Praha: Academia.
- GERŠL, M., KNĚSL, I. (2009): Validace terénního rentgen-fluorescenčního spektrometru pro potřeby analýz půd, říčních sedimentů a suspendované hmoty. Geol. výzk. mor. slez. Brno.
- KESSLER, M. F., VALEŠKA, F. & MALÁN, O. (1965): Význam stopových a minoritních prvků pro korelaci a identifikaci slojí a komplexní využití uhlí: geochemie ostravsko-karvinského revíru. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd.
- MASTALERZ, M. & DROBNIAK, A. (2012): Gallium and germanium in selected Indiana coals. International Journal of Coal Geology, Svazek 94, p. 302–313.
- NODA, N. a další (2013): Volatilization characteristics of boron compounds during coal combustion. Proceedings of the Combustion Institute, 34(2), p. 2831–2838.
- PICHLER, J. (1999): Užitá chemie, Masarykova univerzita v Brně, Brno.
- ROUESSAC, F., ROUESSAC A. (2004): Chemical Analysis: Modern Instrumentation Methods and Techniques. 2. John Wiley & Sons Ltd.
- SLÁNSKÝ, B. (1953): Technika v malířské tvorbě, Státní nakladatelství krásné literatury, Praha, 1953
- SWAINE, D. (1990): Trace elements in coal. 1. vydání editor Boston: Butterworth.
- ŠIMŮNKOVÁ, E. (1993): Pigmenty, barviva a metody jejich identifikace, VŠCHT Praha.
- TAYLOR, G. H., TEICHMÜLLER, M., DAVIS, A., DIESSEL, C. F. K., LITTKE, R., ROBERT, P. (1998): Organic petrology. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- TROJAN, M., KALENDA, P., ŠOLC, Z. (1991): Technologie anorganických pigmentů, VŠCHT, Praha.
- TROJEK, T. (2005): Využití rentgenfluorescenční analýzy při studiu památek. Praha.
- KOPLÍK, J. (2011): Rentgenová fluorescenční spektrometrie. – Dostupné na: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-fluorescencni-spektrometrie>, 21. 12. 2011
- Mendelova Univerzita: Složení půdy. – Dostupné na: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=71346](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=71346).
- Wikipedie (2017): Půda. – Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%AFda>, 4. 10. 2017