

**Přírodovědecká fakulta Masarykovy university v Brně**

**Ústav geologických věd**



**Anizotropie magnetické susceptibility  
feromagnetických zrn s různou  
geometrií**

Rešerše k diplomové práci

**Kamila Jurníčková**

Školitel: Mgr. Jan Černý, Ph.D.

Vedoucí: doc. RNDr. Rostislav Melichar, Dr.

Brno 2018

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ANIZOTROPIE MAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY</b> .....	<b>3</b>
2.1	KVANTITATIVNÍ PARAMETRY ELIPSOIDU ANIZOTROPIE .....	5
<b>3</b>	<b>MAGNETISMUS</b> .....	<b>6</b>
3.1	DIAMAGNETICKÉ LÁTKY .....	7
3.2	PARAMAGNETICKÉ LÁTKY .....	7
3.3	FEROMAGNETICKÉ, ANTIFEROMAGNETICKÉ, FERRIMAGNETICKÉ LÁTKY .....	8
3.3.1	<i>Feromagnetismus</i> .....	9
3.3.2	<i>Antiferomagnetismus</i> .....	9
3.3.3	<i>Ferrimagnetismus</i> .....	10
3.3.4	<i>Magnetické domény</i> .....	11
<b>4</b>	<b>MAGNETICKÉ VLASTNOSTI HORNIN A MINERÁLŮ</b> .....	<b>11</b>
4.1	MAGNETIT .....	13
4.2	HEMATIT .....	15
4.3	GOETHIT .....	16
<b>5</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>17</b>

# 1 Úvod

První zmínky o magnetické anizotropii byly objeveny v paleomagnetickém výzkumu (Ising, 1942). Výzkum zjistil, že magnetická anisotropie, která byla měřena ve vápencích, byla vyšší při měření na ploše vrstevnatosti a naopak nižší při měření kolmo na ni. Magnetická anisotropie zapříčinila odklonění směru remanentní magnetizace, což by mohlo zkreslit výsledky výzkumu (Fuller, 1963). Studium různých hornin ukázalo, že používané horniny při paleomagnetismu mají pouze nízkou magnetickou anizotropii bez významnějších odklonů vektorů remanentní magnetizace. Anizotropie magnetické susceptibility je jev vyvolaný hlavně odlišnou obtížností zmagnetování magnetických minerálů v různých směrech (Sedláčková, 2013).

## 2 Anizotropie magnetické susceptibility

AMS neboli anizotropie magnetické susceptibility je petrofyzikální metodou zabývající se představou o vnitřní stavbě hornin, jedná se tedy o závislost magnetizace na měřeném směru. Zejména v rámci strukturní geologie se za poslední desítky let metoda AMS značně rozšířila včetně možností jejího využití.

Může být používána jak při geologickém mapování, tak i k určení směru proudění lávy, dále i k vymezení smykové zóny.

Je to anizotropní fyzikální vlastnost;

$$\mathbf{M} = \mathbf{K} * \mathbf{H},$$

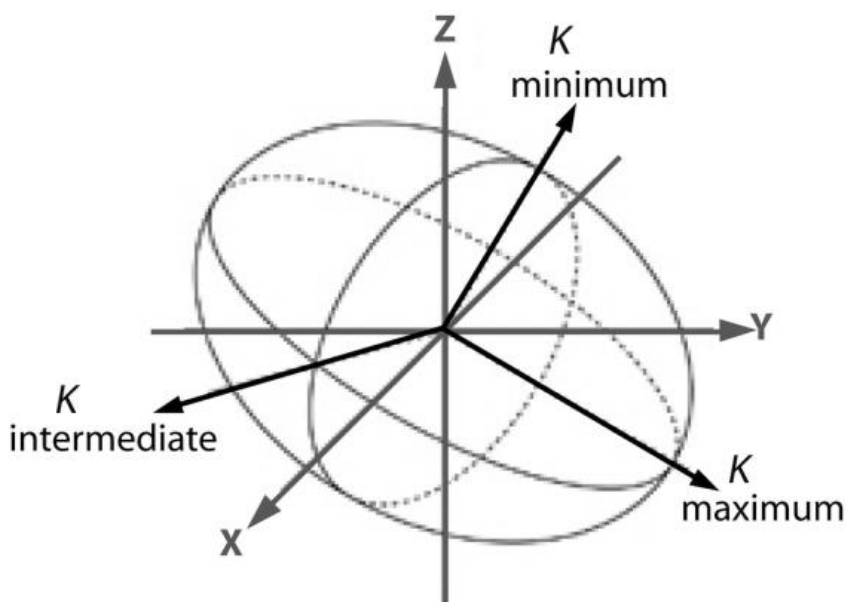
kde magnetická susceptibilita  $K$ , která představuje poměr mezi indukovanou magnetizací  $M$  a aplikovaným magnetickým polem  $H$  vzorku hornin, závisí na směru měření.

$K$  je matematicky vyjádřen tenzorem druhého řádu a geometricky je reprezentován triaxiálním elipsoidem (Obr. 1).

Tři hlavní směry susceptibility:

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| 1) Maximální hodnoty MS | $K_1 = K_{MAX}$ (magnetická lineace)         |
| 2) Střední hodnoty MS   | $K_2 = K_{INT}$                              |
| 3) Minimální hodnoty MS | $K_3 = K_{MIN}$ (normála magnetické foliace) |

Všechny tyto směry jsou na sebe kolmé a jejich promítnutím do azimutální projekce získáme magnetickou stavbu (Tarling & Hrouda, 1993).



Obrázek 1: Elipsoid susceptibility. Maximální, střední a minimální hodnotě hlavních os. Orientace os v prostoru je definována v kartézských souřadnicích X, Y, Z (Tarling & Hrouda, 1993).

Za jednu z největších výhod metody magnetické susceptibility je velice rychle probíhající proces samotného měření. Například při měření na kapametri (modely MFK2 a KLY5). Kapametry umožňují měření teplotních změn magnetické susceptibility v rozmezí od tekutého dusíku až do 700 ° C (AGICO).

Může být aplikována systematicky na celých výchozech, vrtných jádrech nebo geologických jednotkách (Chadima, 2003).

Délka měření jednoho vzorku zabere pár minut, což zvyšuje efektivnost práce při zpracování velkého množství vzorků, které lze následně zpracovat a vizualizovat pomocí softwaru AGICO Safyr (polohové, frekvenční údaje) nebo softwaru Cureval (teplotní závislost). To může posloužit dále pro řešení regionálně-geologických problémů.

## 2.1 Kvantitativní parametry elipsoidu anizotropie

Anizotropie magnetické susceptibility je vlastností tenzoru magnetické susceptibility pokud  $K_1$  není rovno  $K_3$ .

$$K_1 \geq K_2 \geq K_3$$

**Parametr tvaru T** (Jelínek, 1981)

$$T = (2n_2 - n_1 - n_3) / (n_1 - n_3)$$

$$\text{kde } n_1 = \ln K_1, n_2 = \ln K_2, n_3 = \ln K_3$$

- Tvarový parametr, jehož hodnoty se pohybují v rozmezí od -1 až do 1. Kladná čísla indikují oblátní elipsoid a záporné prolátní elipsoid.

**Průměrná magnetická susceptibilita  $K_m$**  (Nagata, 1961)

$$K_{\text{mean}} = (K_1 + K_2 + K_3) / 3$$

- Je to aritmetický průměr hlavních os

**Stupeň anizotropie P** (Nagata, 1961)

$$P = K_1 / K_3$$

- Pro izotropní materiál  $P=1$  a pro anizotropní je  $P$  větší než 1. Tam, kde se zvyšuje anizotropie, zvyšuje se i hodnota  $P$ .

**Magnetické foliace** (Khan, 1962)

$$F = (K_2 / K_3) / K_{\text{mean}}$$

**Magnetické lineace** (Khan, 1962)

$$L = (K_1 / K_2) / K_{\text{mean}}$$

Pokud magnetizace v hornině není paralelní s magnetickým polem je možné vztah mezi intenzitou slabého pole a magnetizací vyjádřit takto:

$$\text{Tenzor susceptibility:} \quad \mathbf{M}_1 = K_{11}\mathbf{H}_1 + K_{12}\mathbf{H}_2 + K_{13}\mathbf{H}_3$$

$$\mathbf{M}_2 = K_{21}\mathbf{H}_1 + K_{22}\mathbf{H}_2 + K_{23}\mathbf{H}_3$$

$$\mathbf{M}_3 = K_{31}\mathbf{H}_1 + K_{32}\mathbf{H}_2 + K_{33}\mathbf{H}_3$$

Kde  $M_{1,2,3}$  jsou vektory magnetizace

$H_{1,2,3}$  jsou vektory intenzity magnetického pole

$k_{ij}, k_{ji}$  jsou komponenty tenzoru symetrické susceptibility (Hrouda, 1982).

### 3 Magnetismus

Je to přirozená vlastnost všech látek, ne vždycky se však dají využít.

Magnetické vlastnosti látek a samotný magnetismus vznikají z pohybu elektricky nabitých částic, v jejichž okolí vzniká magnetické pole. Jsou spojeny se spinovým momentem elektronů a orbitálním pohybem elektronů po dráze kolem jádra atomu a působením magnetického pole, které ovlivňuje magnetický moment elektronů. Protony se také pohybují po dráze, ale je jich tam podstatně méně. Tento pohyb však vyvolává dráhový magnetický moment protonu, který je menší. Magnetický moment atomu je daný vektorovým součtem magnetických momentů všech elektronů a protonů (Drápala, 2016). Z tohoto momentu dále určíme magnetické vlastnosti a chování dané látky.

#### Dělení dle magnetického chování (Obr. 7):

1) Diamagnetické -  $-1 < \chi_m < 0$

2) Paramagnetické -  $0 < \chi_m \ll 1$

3) Ferromagnetické - hodnoty velmi vysokého řádu, měnící se v závislosti na teplotě a intenzitě působícího pole (Tarling & Hrouda, 1993).

### 3.1 Diamagnetické látky

Magnetická susceptibilita v diamagnetických látkách je poměrně malá, ale je přítomna u všech materiálů. Pro diamagnetické látky je charakteristické to, že jsou vypuzovány z nehomogenního magnetického pole, např. blízko konců solenoidu nebo tyčových magnetů (Hofman a Urbanová, 2005).

Susceptibilita v diamagnetických minerálech se pohybuje kolem  $-1 \times 10^{-5}$  (SI) (Tarling & Hrouda, 1993).

Aby diamagnetická hornina byla opravdu diamagnetická, musí obsahovat méně než 0,0001% feromagnetického a méně než 10% paramagnetického materiálu ve složení horniny (Tarling & Hrouda, 1993). Jako typické představitele diamagnetických minerálů můžeme uvést křemen nebo halit (Obr. 2). Taktéž do této kategorie patří organické materiály, jako je kupříkladu uhlí.

Většina mineralogických změn indikovaných zvýšením teploty jsou pravděpodobně spojeny se zvýšeným stupněm metamorfismu, obzvláště když se přiblíží k facii zelených břidlic s teplotou mezi 250 až 300 ° C. Rovněž migrace horkých a studených fluid může vést ke značným výkyvům s následnými modifikacemi mineralogie. Tyto termochemické účinky jsou nejvíce pozorovatelné v sedimentárních horninách, kde mineralogické změny způsobují zásadní změny.

křemen	$k = -15,4 \times 10^{-6}$
opál	$k = -12,9 \times 10^{-6}$
ortoklas	$k = -13,7 \times 10^{-6}$
halit	$k = -10,3 \times 10^{-6}$
kalcit	$k = -13,1 \times 10^{-6}$
aragonit	$k = -15,0 \times 10^{-6}$

Obrázek 2: Diamagnetické minerály a jejich hodnoty magnetické susceptibility (Chadima, 2010).

### 3.2 Paramagnetické látky

Jsou látky, jejichž atomy mají nenulový moment hybnosti. Paramagnetické látky nemají samy o sobě magnetický moment, ale díky vnějšímu magnetickému poli se jejich magnetismus může mírně zesílit.

Spousta minerálů je paramagnetických (Obr. 3). Zejména neferomagnetické silikáty s obsahem železa jakými jsou například olivíny, pyroxeny, biotit, chlorit a slída. Nenesou však magnetickou remanenci.

Susceptibilita v paramagnetických minerálech se pohybuje kolem  $5 \times 10^{-4}$  (SI) (Tarling & Hrouda, 1993).

Magnetismus je nepřímo úměrný teplotě. To znamená, že když teplota klesá tak se intenzita magnetického pole zvětšuje.

olivín	$k = 124 - 4270 \times 10^{-6}$
dolomit	$k = 11.3 \times 10^{-6}$
pyroxen	$k = 121 - 3700 \times 10^{-6}$
slídy	$k = 36 - 3040 \times 10^{-6}$
amfibot	$k = 750 - 1368 \times 10^{-6}$
granát	$k = 502 - 6780 \times 10^{-6}$

Obrázek 3: Paramagnetické minerály a jejich hodnoty magnetické susceptibility (Chadima, 2010).

### 3.3 Feromagnetické, antiferomagnetické a ferrimagnetické látky

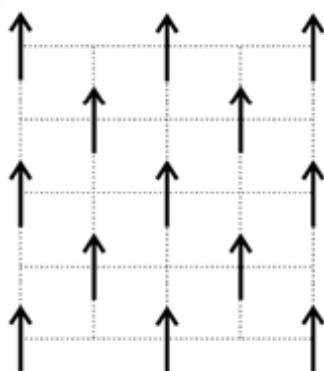
Feromagnetismus je jednou z nejsilnějších forem magnetismu. Tyto látky jsou tvořeny stejnými druhy atomů jako látky paramagnetické, rozdíl je však v jejich uspořádání atomů (iontů) a vzájemném silovém působení. Platí pouze pro látky v pevném skupenství. Jedná se o vlastnost struktury. Po tyto látky existuje tzv. teplota Curie ( $T_C$ ). Když se hodnota teploty překročí, látka ztrácí své vlastnosti a stává se paramagnetickou. Při tzv. Curie teplotě, Pierra Curie (1859-1906), dochází ke změnám v krystalické mřížce a porušení uspořádání atomů. Teplotu Curie je velice složité přesně změřit. Tato teplota se může značně lišit i díky velice malému množství nečistot ve měřeném materiálu. Obtíže při měření zapříčiňuje i permanentní magnetické pole, které při změnám může částečně zmizet.

Teplota Curie je analogií Néelovi teploty ( $T_N$ ). Néelova teplota, Louise Néela (1904–2000), je teplota kde se ferrimagnetické a antiferomagnetické materiály stávají paramagnetickými.



### 3.3.1 Feromagnetismus

Atomy jsou uspořádány paralelně, částečně i v nepřítomnosti vnějšího pole (Obr.4). Díky paralelnímu uspořádání je velký celkový magnetický moment. V okamžiku, kdy se připojí i vnější pole, dojde k souhlasnému přeorientování spinů a zároveň k velkému zesílení pole. Feromagnetické látky se vyznačují značnou permeabilitou a kladnou susceptibilitou. Pokud teplo začne vzrůstat, dochází k poruše uspořádání a z tohoto důvodu začne susceptibilita rychle klesat. Látka zahřátá nad Curieho teplotu se stává paramagnetickou. Při ochlazení pod Curieho teplotu se látka stává opět feromagnetickou (Tarling & Hrouda, 1993).

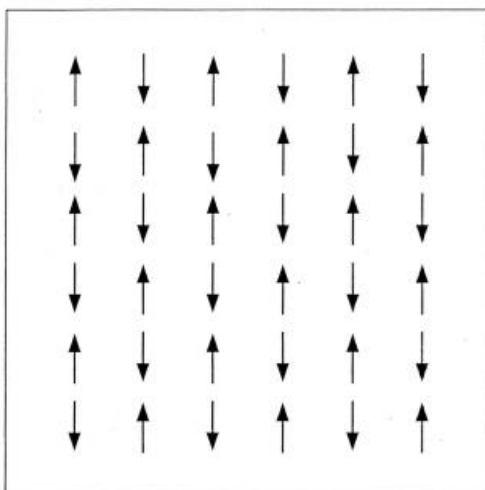


Obrázek 4: Feromagnetické uspořádání (Tuček, 2010).

### 3.3.2 Antiferomagnetismus

Na rozdíl od feromagnetických látek mají spiny nepárových elektronů u antiferomagnetické látky opačně uspořádanou orientaci (Obr. 5). V tomto případě mají tyto látky nulový magnetický moment.

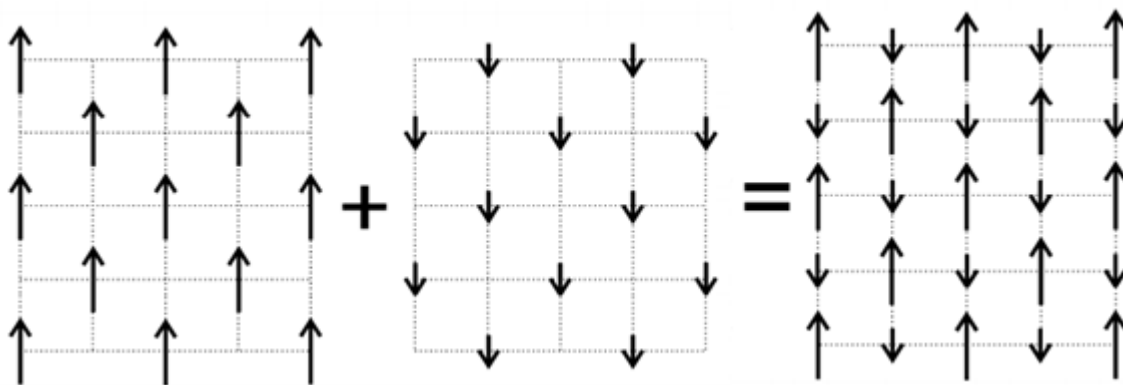
Chování antiferomagnetické látky pod Néelovou teplotou závisí na úhlu mezi směrem magnetizace podmřížky a vnějšího magnetického pole, což je důsledkem silné anisotropie (Tuček, 2010). Látka je antiferomagnetická pod Néelovou teplotou a paramagnetická nad Néelovou teplotou. Mezi antiferomagnetické minerály patří některé formy pyrotinu nebo ilmenit.



Obrázek 5: Antiferomagnetické uspořádání (Tuček, 2010).

### 3.3.3 Ferrimagnetismus

Ferrimagnetické látky se skládají ze dvou antiparalelních strukturálních mřížek, které mají různou intenzitu magnetizace (Obr. 6). Právě díky rozdílnému magnetickému momentu atomů je výsledný moment nenulový. Tyto látky jsou ferrimagnetické při teplotách pod bodem Curieovi teploty. Mezi nejdůležitější minerály patřící do této skupiny je Magnetit.



Obrázek 6: Magnetické mřížky – ferrimagnetické látky – upraveno podle Tučka (2010).

### 3.3.4 Magnetické domény

Ve feromagnetických, antiferomagnetických a ferrimagnetických látkách se tvoří tzv. magnetické domény. Domény jsou skupiny magnetických momentů, které jsou uvnitř domény orientovány ve stejném nebo rozdílném směru, určeném magnetickým polem, a které spolu v doméně kooperují (Herchel et al., 2009). Jako hranici mezi doménami můžeme nalézt také tzv. Blochovu stěnu s charakteristickou energií a šířkou potřebnou k existenci. Při této hranici dochází k rotaci magnetizace. Domény jsou dvojího charakteru více doménové a jedno doménové. U jedno doménového charakteru atomy směřují jedním směrem a právě z toho důvodu vykazují větší magnetický moment než u více doménového charakteru.

Diamagnetismus	Paramagnetismus	Feromagnetismus	Ferimagnetismus	Antiferomagnetismus
P ř e d p o k l a d y:				
atomy s obsazenými dráhami	atomy s neobsazenými dráhami	atomy s neobsazenými dráhami	atomy s neobsazenými (vnitřními) dráhami určité mřížkové struktury	neuzavřené dráhy, velmi malá vzdálenost atomů
M a g n e t i c k ý m o m e n t:				
Bez vnějšího pole není magnetický moment. Kompenzace spinových momentů.	Moment je ↓, existuje bez vnějšího pole. Nepravidelné rozdělení momentových směrů.	Moment ↑, spontánní magnetizace. Weissovy domény, elementární magnety.	Moment existuje v důsledku neúplné kompenzace.	Kompenzace momentů v důsledku antiparalelního postavení.
S m ě r m o m e n t ů:				
P e r m e a b i l i t a ( s u s c e p t i b i l i t a):				
$\mu_r < 1$ ( $\chi < 0$ )	$\mu_r > 1$ ( $\chi > 0$ )	$\mu_r \gg 1$ ( $\chi \gg 0$ )	$\mu_r \gg 1$ ( $\chi \gg 0$ )	$\mu_r \approx 1$
P ř í k l a d y m a t e r i á l ů:				
Cu, Au, Ag	Al, Sn, Pt	Fe, Co, Ni	Ferity	MnO

Podle  $\mu_r$  a  $\chi$  můžeme materiály rozdělit do čtyř skupin.

1.  $\mu_r < 1$  ;  $\chi < 0$  – diamagnetické materiály
2.  $\mu_r = 1$  ;  $\chi = 0$  – magneticky neutrální materiály
3.  $\mu_r > 1$  ;  $\chi > 0$  – paramagnetické a antiferomagnetické materiály
4.  $\mu_r \gg 1$  ;  $\chi \gg 0$  – feromagnetické a ferimagnetické materiály

Obrázek 7: Zjednodušená tabulka chování látek podle magnetické susceptibility (Drápala, 2016).

## 4 Magnetické vlastnosti hornin a minerálů

Magnetická anizotropie hornin závisí na anizotropii jednotlivých zrn minerálů, z nichž se hornina skládá, a na jejich jednotlivém uspořádání, které přispívá k celkové susceptibilitě.

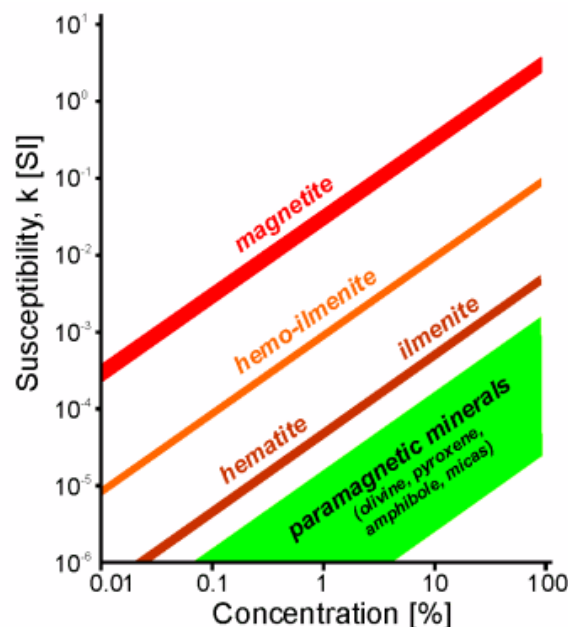
(Tarling & Hrouda, 1993). Důležité jsou i změny indukované teplotou a časem. Zvyšování teploty je většinou neúčinnější, ale změny, ke kterým dochází v důsledku přechodu času, mohou být také velmi významné. Obecně se jedná o sedimenty, které jsou nejvíce citlivé jak na teplotu, tak na průchod časem.

Samotné vzorkování nekonsolidovaných sedimentů může samo změnit svou magnetickou mineralogii, i při velké opatrnosti.

Pokud jsou v hornině obsaženy i feromagnetické minerály ve vyšších než přibližně 0,1% celkové horniny, předpokládá se, že hornina bude ovlivněna těmito minerály a tudíž se magnetické vlastnosti minerálu přenesou i na samotnou horninu. Pokud nejsou přítomny feromagnetické minerály tak paramagnetické minerály (pokud tvoří více než 1% horniny) budou mít tendenci převažovat nad diamagnetickými (Tarling & Hrouda, 1993).

Toto platí pouze za předpokladu, že hornina zůstane pod bodem jejich Curieho teploty. V praxi se vždy předpokládá, že susceptibilita je měřená při pokojové teplotě (20 ° C).

Anizotropie horniny tedy představují shrnutí susceptibility všech druhů minerálů přítomných ve vzorku. Nejběžnějšími feromagnetickými minerály jsou magnetit a hematit (minerály oxidu železa). Mezi další méně významné minerály patří goethit nebo pyrrhotin.



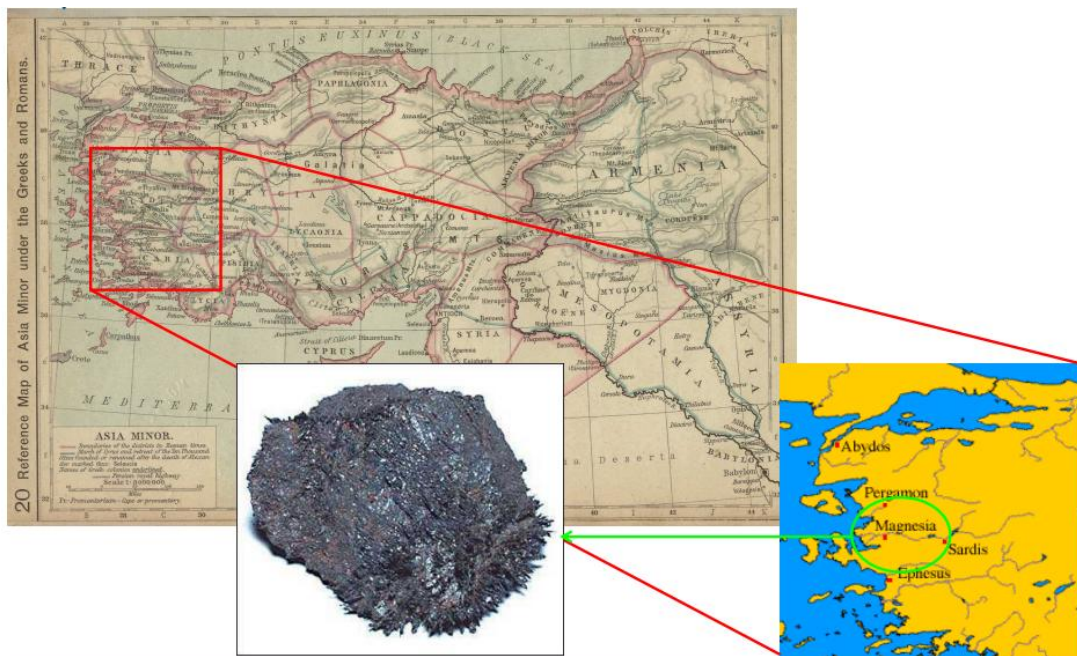
Obrázek 8: Příklady vlivu některých feromagnetických a paramagnetických minerálů na magnetickou susceptibilitu hornin (Chadima, 2010; Tarling & Hrouda 2009 ;Hrouda & Kahan, 1991).

## 4.1 Magnetit

Objev minerálu magnetovec (magnetit) a jeho neobyčejného chování byl (patrně nezávisle na sobě) učiněn nejméně ve dvou starověkých kulturách – v Řecku a v Číně (Krupička, 2007). Starší pojmenování magnetovec se od roku 1845 zaměnil na odborný název magnetit (Obr. 9).

Krystaly magnetitu jsou převážně šedočerné až černé barvy s kovovým leskem, které bývají občas deformovány. Tvrdost tohoto minerálu se pohybuje mezi 5,5-6,5 na Mohsově stupnici tvrdosti s hustotou 5,17. Je neštěpný. Má nerovný lom a černý vryp. Magnetit patří do kubické soustavy (Zámarský et al., 2008). Krystaly z této soustavy mají největší souměrnost, jsou to převážně dokonale omezené oktaedry, ale může se také vyskytovat jako dodekaedr. Oktaedr je tvořený osmi rovnostrannými trojúhelníky a dvojčatí podle plochy (111). Nejčastěji vytváří zrnité celistvé agregáty či vtroušená zrna.

Magnetit spadá do čtvrté třídy oxidů a hydroxidů. Oxidy jsou sloučeniny kyslíku s jedním nebo více kovovými nebo nekovovými kationty. Vazby ve strukturách mají výrazně iontovou povahu (Chvátal, 2005).



Obrázek 9: Magnetit 3. Stol. Před n.l., Tuček (2010)

Krystaly magnetitu jsou převážně šedočerné až černé barvy s kovovým leskem, které bývají občas deformovány. Tvrdost tohoto minerálu se pohybuje mezi 5,5-6,5 na Mohsově

stupnici tvrdosti s hustotou 5,17. Je neštěpný. Má nerovný lom a černý vryp. Magnetit patří do kubické soustavy (Zámarský et al., 2008). Krystaly z této soustavy mají největší souměrnost, jsou to převážně dokonale omezené oktaedry, ale může se také vyskytovat jako dodekaedr. Oktaedr je tvořený osmi rovnostrannými trojúhelníky a dvojčatí podle plochy (111). Nejčastěji vytváří zrnité celistvé agregáty či vtroušená zrna.

Magnetit spadá do čtvrté třídy oxidů a hydroxidů. Oxidy jsou sloučeniny kyslíku s jedním nebo více kovovými nebo nekovovými kationty. Vazby ve strukturách mají výrazně iontovou povahu (Chváta, 2005).

Spadá do řady spinelidů společně s dalšími asi 19 minerály, jako jsou například spinel a chromit.

Je běžným minerálem vyskytujícím se v bazických i kyselých magmatických nebo metamorfovaných horninách jako jsou například gabra, bazalty nebo syenitové porfyry apod. Díky gravitaci může dojít ke vzniku velkých ložisek magnetitu, zejména v bazických horninách.

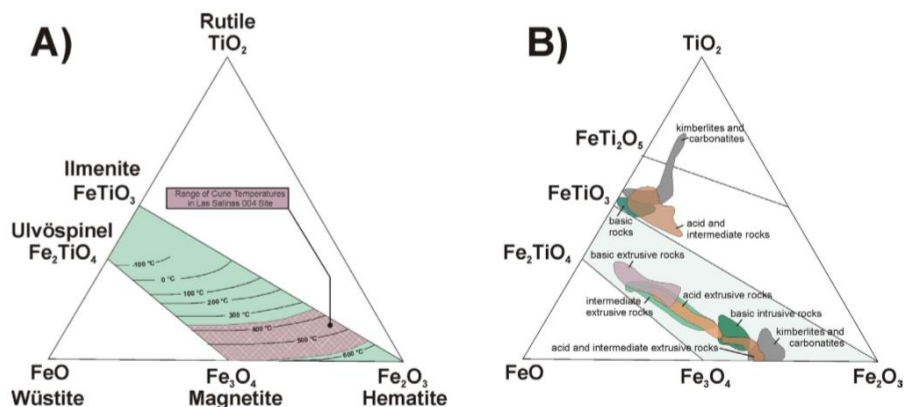
Je významným ukazatelem ve studiu vzniku hornin. Přeměňuje se v hematit, goethit, nebo lepidokrokrit. Spolu s hematitem ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) je magnetit nejdůležitější ruda železa.

Využívá se například k výrobě harddisků, jako přírodní pigmenty černé barvy,

V České Republice se nejčastěji vyskytuje ve skarnech v Krušných horách, Českomoravské vrchovině (Županovice, Věchov, Budeč), Malešov u Kutné hory a také v Sobotíně u Šumperka.

Magnetity ve skarnu jsou většinou doprovázené stopovými prvky Ga, Cr, Ti a občas i B. Historicky atraktivní místo je také národní hora Říp, která je tvořena z 12% z magnetitu (Matyášek, 2007).

Pokud teplota jeho vzniku přesahuje  $600^\circ\text{C}$ , může obsahovat větší množství titanu, ale i manganu nebo chrom (Obr. 10). Teploty mezi  $575$  a  $585^\circ\text{C}$  odpovídají Curieho bodu magnetitu, avšak nižší teplota Curie může odpovídat různým minerálům s různým obsahem titanu, jako titanomagnetitu, titanomaghemitu nebo titanohematitu (Černý, 2016).



Obrázek 10: Ternární systém  $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$  podle Nagaty (1961). A) Změna teploty Curie ( $T_c$ ) v titanomagnetitové a titanohematitové sérii podle Carmichael (1982), převzato Černý (2016); B). Složení titanomagnetitu a titanohematitu v několika typech hornin (Piper, 1987, Cornell a Schwertmann, 2003), převzato Černý (2016).

## 4.2 Hematit

Minerál hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) patří do skupiny oxidů stejně jako magnetit. Oproti magnetitu má nižší přirozenou magnetizaci, avšak jeho magnetizace je stabilnější. Vlastnosti hematitu ovlivňuje jeho geneze, velikost i tvar částic. (Tarling & Hrouda, 1993). Od magnetitu lze spolehlivě odlišit díky vyšší Curieho teplotě, které je u hematitu  $675^\circ\text{C}$ , zatímco u magnetitu  $578^\circ\text{C}$  (Dunlop, Özdemir in Kubeš 2017; Lowrie in Kubeš 2017).

Hematit má několik druhů zbarvení od červené, červenohnědé, rezavé až po černou. Je to neštěpný minerál, ale je dělitelný podle báze nebo ploch klence. Jeho tvrdost se pohybuje mezi 6-6.5 stupně tvrdosti a hustotou 5,26. Mívá zpravidla příměsi Ti, Mn a často obsahuje inkluze  $\text{SiO}_2$ . Nad  $950^\circ\text{C}$  je neomezeně mísitelný s ilmenitem. Krystaly Hematitu jsou rozdělovány do 3 skupin. První typ se nazývá elbský, kde převládá tvar dipyramidy s romboedrem. Druhý alpský typ vzniká za nižších teplotních podmínek. Přebírají zde bazální plochy s klencem a dipyramidou.

Třetí altenberský typ se skládá z pozitivního a negativního klence což ve výsledku vypadá jako zdeformovaná krychle. Agregáty jsou často oolitické, zrnité, lebníkovité nebo šupinkaté.

Je to jeden z nejvýznamnějších minerálů pro průmyslové užití. Je hojně zastoupen v magmatických, sedimentárních i metamorfovaných horninách. Je součástí sedimentárních tzv. páskovaných železných rud vzniklých v archaiku a prekambriu (Losos & Vávra, 2013).

V České Republice se vyskytuje v oblasti u Příbrami, Mníšku pod Brdy nebo například Jáchymov v hydrotermálních žilách s uranitem (Matyášek, 2007).

### **4.3 Goethit**

$\text{Fe}_3\text{O(OH)}$  jeden z nejhojnějších sekundárních minerálů patřící mezi hydroxidy. Je černohnědé barvy, vzácně žlutohnědý. Lesk polokovový, ale také polomatný. Tvoří celistvé až jemnozrné agregáty. Obsahuje značné množství vody. Goethit bývá častou složkou Ilmenitu (Matyášek, 2007).

Běžný v oxidačních zónách ložisek. Jeho kumulace vznikají díky erozi a chemickému zvětrávání v tropických oblastech z minerálů jak jsou magnetit a pyrit. Spolu s dalšími minerály vytváří limonit (Losos & Vávra, 2013). Jeho magnetické vlastnosti jsou silně ovlivněny genezí a charakterem mřížky. Během zvyšování teploty dochází k dehydrataci a přeměně na hematit respektive na magnetit při 380°C (Tarling & Hrouda, 1993). V České Republice se vyskytuje v okolí Vrančic, Příbrami a Cetyně.



## 5 Použitá literatura

Agico.com (2018): Kappametr MKF1-FA. — On- line: agico.com.

Cornell, R.M. and Schwertmann, U. (2003): The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 659.

Černý, J., Ramírez-Herrera, M. T., Bógalo, M. F., Goguitchaichvili, A., Castillo-Aja, R., Morales, J., Sanchez-Cabeza, J. A. & Ruiz-Fernández, A., (2016): Magnetic record of extreme marine inundation events at Las Salinas site, Jalisco, Mexican Pacific coast. — *International Geology Review*, Volume 58, Issue 3, Pages 342–357. doi:10.1080/00206814.2015.1075230

DRÁPALA, J., KURSA, M., (2012): *Elektrotechnické materiály, učební texty* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2570-0. [vid. 2. 4. 2016]. Dostupné: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>

Fuller, M. D., (1963): Magnetic anisotropy and paleomagnetism. *J. Geophys. Res.*, 68, 293-309

Hofmann, J., Urbanová, M., (2005): *Fyzika I. Verze 1.0*. Vysoká škola chemicko-technologická. Praha.

Hrouda, F., (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys* 5, 37–82.

Hrouda, F., Kahan, S., (1991): The magnetic fabric relationship between sedimentary and basement nappes in the High Tatra Mountains, N. Slovakia. *J. Struct. Geol.*, 13, 431-42

Hrouda, F., & Tarling, D. H., (1993): *The magnetic anisotropy of rocks*. — Chapman and Hall, London.

Chadima, M., (2003): *Magnetická anizotropie deformovaných sedimentů*. – MS, rešeršní práce. Přírodovědecká fakulta MU. Brno.

Chadima, M., (2010): *Magnetická anizotropie hornin (stručný přehled a využití v geologii)*: <http://www.sci.muni.cz/~chadima/geomagnetismus/anizotropie1.pdf>. Brno.

Chvátal, M., (2005): *Úvod do systematické mineralogie*. – Silikátový svaz, Praha.

Ising, E.: (1942): On the Magnetic Properties of Varved Clay, *Arkiv Astron. Fysik* 29A (5), 1-37.

Jelínek, V., (1981): Characterization of the magmatic fabric of rocks. — *Tectono physics*, 79, 63-7.

Khan, M. A., (1962): The anisotropy of magnetic susceptibility of some igneous and metamorphic rocks. — *Journal of Geophysical Research*, 67, 2873-85.

Krupička, S., (2007): Magnetismus: historie a současnost. Od magnetitu a kompasu k magnetickému disku a spinovému tranzistoru. Fyzikální ústav AV ČR. [https://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka\\_0207.pdf](https://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf)

Kubeš, M., (2017): Magnetická susceptibilita granitoidních hornin východní části brněnského masivu a její příčiny. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta MU. Brno.

Matyášek J., SUK M., (2007): Přehled minerálů a hornin. Prezentace v oblasti VaV (AV tvorba, WEB aplikace apod.)

Nagata, T., (1961): Rock Magnetism, 2nd edition. – Maruzen. Tokyo.

Piper, J. D. A., (1987): Paleomagnetism and the continental crust, Wiley, New York – Toronto, p. 434

Sedláčková, V., (2013): Srovnávání magmatických staveb granitoidů a jejich křehkého porušení. Rešerše BP. Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta MU. Brno.

Tuček, J., (2010): Úvod do magnetismu, magnetické vlastnosti materiálů a magnetické jevy v nanosvětě. Centrum výzkumu nanomateriálů PřF UP Olomouc.

Vávra V., Losos Z., (2006): Učebnice mineralogie pro bakalářské studium. Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta MU, Brno.

Zámarský, V. et al., (2008): Mineralogie a krystalografie. Vysoká škola báňská, Ostrava.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Elipsoid susceptibility. Maximální, střední a minimální hodnotě hlavních os. Orientace os v prostoru je definována v kartézských souřadnicích (X,Y,Z). (Tarling & Hrouda, 1993).....	4
Obrázek 2: Diamagnetické minerály a jejich hodnoty magnetické susceptibility ( Chadima, 2010).....	7
Obrázek 3: Paramagnetické minerály a jejich hodnoty magnetické susceptibility (Chadima, 2010).....	8
Obrázek 4: Antiferomagnetické uspořádání, (Tuček, 2010) .....	10
Obrázek 5: Magnetické mřížky – ferrimagnetický materiál – upraveno podle Tučka (2010). 10	
Obrázek 6: Přehledná tabulka. Chování látek podle magnetické susceptibility (Drápala, 2016).	
Obrázek 7: příklady vlivu některých feromagnetických a paramagnetických minerálů na magnetickou susceptibilitu hornin. upraveno podle Tarling & Hrouda (1993) .....	12
Obrázek 8: Magnetit 3. Stol. Před n.l. , Tuček (2010) .....	13
Obrázek 9: Ternární systém TiO <sub>2</sub> -FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> podle Nagaty (1961). A) Změna teploty Curie (T <sub>c</sub> ) v titanomagnetitové a titanoemelitové sérii podle Carmichael (1982, převzato Černý 2016); B). Složení titanomagnetitu a titanohemitu v několika typech hnědých hornin ( Piper, 1987, Cornell a Schwertmann, 2003, modifikováno) (Černý J., 2016). .....	15