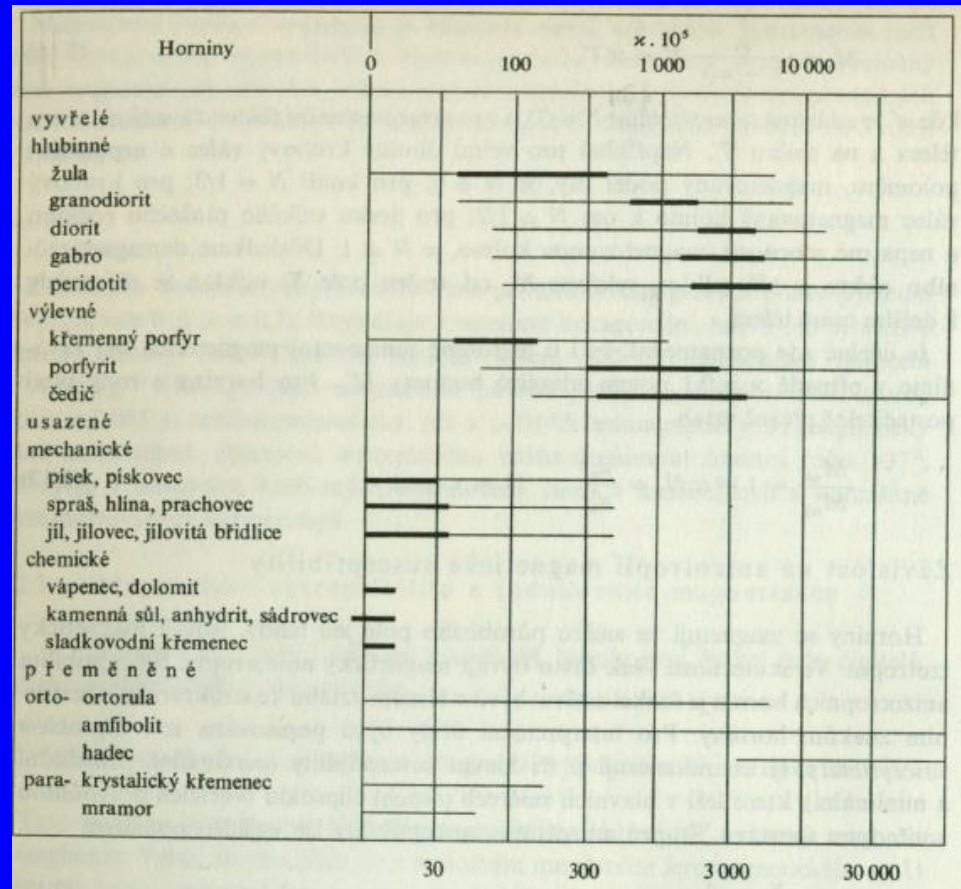


# magnetické vlastnosti minerálů a hornín



# magnetické vlastnosti minerálov a hornín

## obsah prednášky:

- základné veličiny (definície, jednotky, vzťahy)
- magnetická permeabilita, objemová susceptibilita
- magnetické minerály
- susceptibilita hornín
- metódy určovania susceptibility

# základné pojmy

magnetické pole – 2 dôležité vektorové veličiny:

magnetická intenzita  $\mathbf{H}$ , [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

magnetická indukcia  $\mathbf{B}$ , [ $\text{T}$ ]

medzi nimi platí dôležitý vzťah:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

kde  $\mu$  – magnetická permeabilita, ktorá udáva mieru magnetizácie látky v dôsledku pôsobenia magn. poľa, jednotka [ $\text{H}\cdot\text{m}^{-1} = \text{N}\cdot\text{A}^{-2}$ ]

používame aj tzv. relatívnu magnetickú permeabilitu (bezrozmerné číslo):

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \Rightarrow \mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

$\mu_0$  – permeabilita vákua ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ )

# základné pojmy

magnetické pole – 2 dôležité vektorové veličiny:

magnetická intenzita  $H$ , [ $A \cdot m^{-1}$ ]

magnetická indukcia  $B$ , [T]

## Alternative names for $B$ and $H$

$B$	
name	used by
magnetic flux density	electrical engineers
<u>magnetic induction</u>	electrical engineers
magnetic field	physicists
$H$	
name	used by
<u>magnetic field intensity</u>	electrical engineers
magnetic field strength	electrical engineers
auxiliary magnetic field	physicists
magnetizing field	physicists

# základné pojmy

magnetické pole – 2 dôležité vektorové veličiny:

magnetická intenzita  $\mathbf{H}$ , magnetická indukcia  $\mathbf{B}$

**staré a nové jednotky:**

Table 1.1: Conversion between SI and cgs units.

Parameter	SI unit	cgs unit	Conversion
Magnetic moment ( $\mathbf{m}$ )	$\text{Am}^2$	emu	$1 \text{ A m}^2 = 10^3 \text{ emu}$
Magnetization ( $\mathbf{M}$ )	$\text{Am}^{-1}$	$\text{emu cm}^{-3}$	$1 \text{ Am}^{-1} = 10^{-3} \text{ emu cm}^{-3}$
Magnetic Field ( $\mathbf{H}$ )	$\text{Am}^{-1}$	Oersted (oe)	$1 \text{ Am}^{-1} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ oe}$
Magnetic Induction ( $\mathbf{B}$ )	T	Gauss (G)	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
Permeability of free space ( $\mu_0$ )	$\text{Hm}^{-1}$	1	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} = 1$
Susceptibility ( $\chi$ ) total ( $\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{H}}$ )	$\text{m}^3$	$\text{emu oe}^{-1}$	$1 \text{ m}^3 = \frac{10^6}{4\pi} \text{ emu oe}^{-1}$
by volume ( $\frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}}$ )	-	$\text{emu cm}^{-3} \text{ oe}^{-1}$	$1 \text{ S.I.} = \frac{1}{4\pi} \text{ emu cm}^{-3} \text{ oe}^{-1}$
by mass ( $\frac{\mathbf{m}}{m} \cdot \frac{1}{\mathbf{H}}$ )	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	$\text{emu g}^{-1} \text{ oe}^{-1}$	$1 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ emu g}^{-1} \text{ oe}^{-1}$
$1 \text{ H} = \text{kg m}^2 \text{A}^{-2} \text{s}^{-2}$ , $1 \text{ emu} = 1 \text{ G cm}^3$ , $B = \mu_0(H + M)$ , $1 \text{ T} = \text{kg A}^{-1} \text{s}^{-2}$			

# základné pojmy

## Poznámka:

Meraným poľom v aplikovanej geofyzike je magnetická indukcia alebo rozdiel ich hodnôt (napr. atómové magnetometre alebo magnetometre s ferosondou).

Väčšina prístrojov meria veľkosť indukcie, ale existujú aj „vektorové“ magnetometre, ktoré merajú jej jednotlivé zložky.



# magnetické vlastnosti látok – permeabilita

Podľa hodnoty  $\mu_r$  delíme látky na:

**diamagnetické** ( $\mu_r < 1$ ), zoslabujú magn. pole (napr. voda, organické látky, ale aj niektoré kovy: Cu, Ag, Au, Hg, Bi,)

**paramagnetické** ( $\mu_r > 1$ ), zosilňujú magn. pole (napr. Al, Mn, Cr, Pt)

**feromagnetické** ( $\mu_r \gg 1$ ) výrazne zosilňujú magn. pole (kovy: Fe, Ni, Co, Gd, Dy).

Diamagnetické látky sú z magnetického poľa vypudzované, paramagnetické a feromagnetické sú naopak do magnetického poľa vtáhané (pohyb smerom do miesta s najvyššou intenzitou poľa).

Najsilnejšie diamagnetické chovanie vykazujú supravodiče, ktoré môžu do určitej intenzity pôsobiaceho magnetického poľa úplne zabrániť vnikaniu poľa do svojho objemu (až na tenkú povrchovú vrstvu) a tak je v určitej oblasti ich  $\mu_r = 0$ .

# magnetické vlastnosti látok – permeabilita

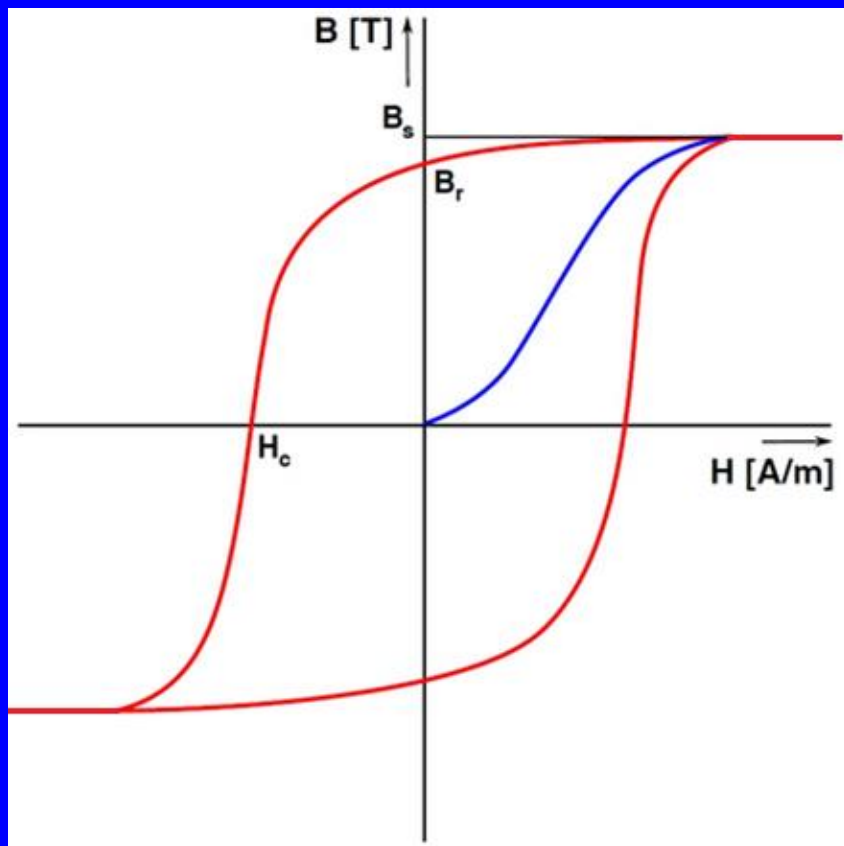
<b>Materiál</b>	$\mu_r$
Permalloy	50 000 - 140 000
Železo	300 - 10 000
Kobalt	80 - 200
Hliník	1,000 023
Kapalný kyslík	1,003 620
Plynný kyslík	1,000 001 86
Platina	1,000 264
Měď	0,999 990
Voda	0,999 991



# magnetické vlastnosti látok – základné pojmy

Paramagnetickým látkam nezostáva po „vypnutí“ vonkajšieho magnetického poľa magnetický moment, v prípade feromagnetických je to rozdielne – zostávajú zmagnetizované.

Tento jav opisuje **magnetická hysterézia** (slučka, krivka):



$B_s$  – stav nasýtenia (max. hodnota  $B$ ),  
 $B_r$  – remanentná magnetizácia,  
 $H_c$  – koercitívna intenzita,

Podľa veľkosti  $H_c$  delíme feromagnetické látky na magneticky **mäkké** (malá  $H_c$ ) a **tvrdé** (veľká  $H_c$ )

# magnetické vlastnosti látok – základné pojmy

Paramagnetickým látkam nezostáva po „vypnutí“ vonkajšieho magnetického poľa magnetický moment, v prípade feromagnetických je rozdielne – zostávajú zmagnetizované.

Tieto dva podstatné príspevky sa prejavujú aj pri magnetizácii hornín – rozpoznávame tzv. **indukovanú** magnetizáciu  $M_i$  ( $M_i = \kappa H$ ) a **remanentnú** magnetizáciu  $M_r$ .

## **Remanentná magnetizácia (NRM):**

- termoremanentná (pri pôsobení vonk. magn. poľa po tom, ako klesne teplota horniny pod Courrierov bod)
- chemická (pri kryštalizácii minerálov z chem. roztokov)
- detritická (pri sedimentácii úlomkov feromagn. hornín)
- viskózna (pri dlhodobom pôsobení poľa, prejavuje sa najmä pri magneticky mäkkých látkach)
- izotermálna (krátkodobé pôsobenie, napr. úder blesku)
- dynamická (pri tektonických procesoch)

# magnetické vlastnosti látok – základné pojmy

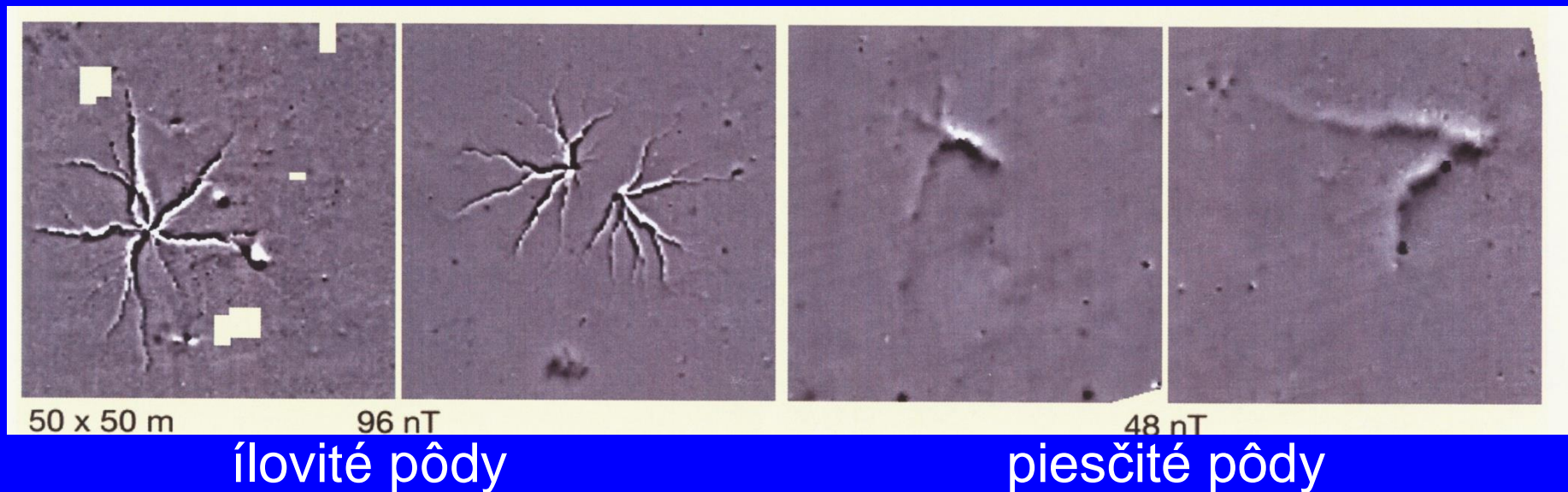
Vektorový súčet  $M_i$  a  $M_r$  tvorí vektor celkovej magnetizácie  $M$ . Dôležitým parametrom je pomer veľkostí  $M_r$  a  $M_i$ , tzv. Königsbergerov koeficient  $Q$ :

$$Q = M_r/M_i$$

(vysoké hodnoty napr. pri efuzívnych horninách - bazaltoch).

---

**zaujímavosť: magnetické anomálie po úderoch bleskom (izotermálna remanentná magnetizácia)**



# magnetické vlastnosti látok – susceptibilita

V magnetometrii sa však používa susceptibilita, pričom platí jednoduchý vzťah:

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

$\kappa$  – susceptibilita, ide o bezrozmerné číslo, používajú sa však tzv. [SI jednotky]; vo vákuu platí  $\kappa = 0$ ,

(je podobná v analógii na hustotu v gravimetrii a vraví, ako silno sa daná látka zmagnetizuje vo vonkajšom magn. poli)

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H = (1 + \kappa) \mu_0 H = \mu_0 H + \mu_0 \kappa H = \mu_0 H + \mu_0 M_i$$

kde  $M_i$  je indukovaná magnetizácia [ $A \cdot m^{-1}$ ]:  $M_i = \kappa H$

# magnetické vlastnosti látok – susceptibilita

V magnetometrii sa však používa susceptibilita, pričom platí jednoduchý vzťah:

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

$\kappa$  – susceptibilita, ide o bezrozmerné číslo, používajú sa však tzv. [SI jednotky]; vo vákuu platí  $\kappa = 0$ ,

(je podobná v analógii na hustotu v gravimetrii a vraví, ako silno sa daná látka zmagnetizuje vo vonkajšom magn. poli)

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H = (1 + \kappa) \mu_0 H = \mu_0 H + \mu_0 \kappa H = \mu_0 H + \mu_0 M_i$$

Tento posledný člen niektorí autori nazývajú ako magnetická polarizácia – s jednotkou magn. indukcie [T].

# magnetické vlastnosti látok (minerálov) – susceptibilita

$\kappa < 0$ ,  $\mu_r < 1$  – **diamagnetické látky**,

hodnoty:  $-10^{-6}$  až  $-10^{-5}$  [SI], napr.: kremeň,

vápenec, živce, grafit, sádrovec, halit, galenit

$\kappa > 0$ ,  $\mu_r > 1$  – **paramagnetické látky**,

hodnoty:  $10^{-5}$  až  $10^{-3}$  [SI], napr. pyroxén, olivín,

amfibol, biotit, pyrit, siderit, muskovit, ..

$\kappa \gg 0$ ,  $\mu_r \gg 1$  – **feromagnetické látky s.l.**

hodnoty:  $10^{-2}$  až  $10^{+2}$  [SI], napr. magnetit,

titanomagnetit, ulvöspinel, hematit, ilmenit

feromagnetické látky (s.l.) sa delia na 3 skupiny:

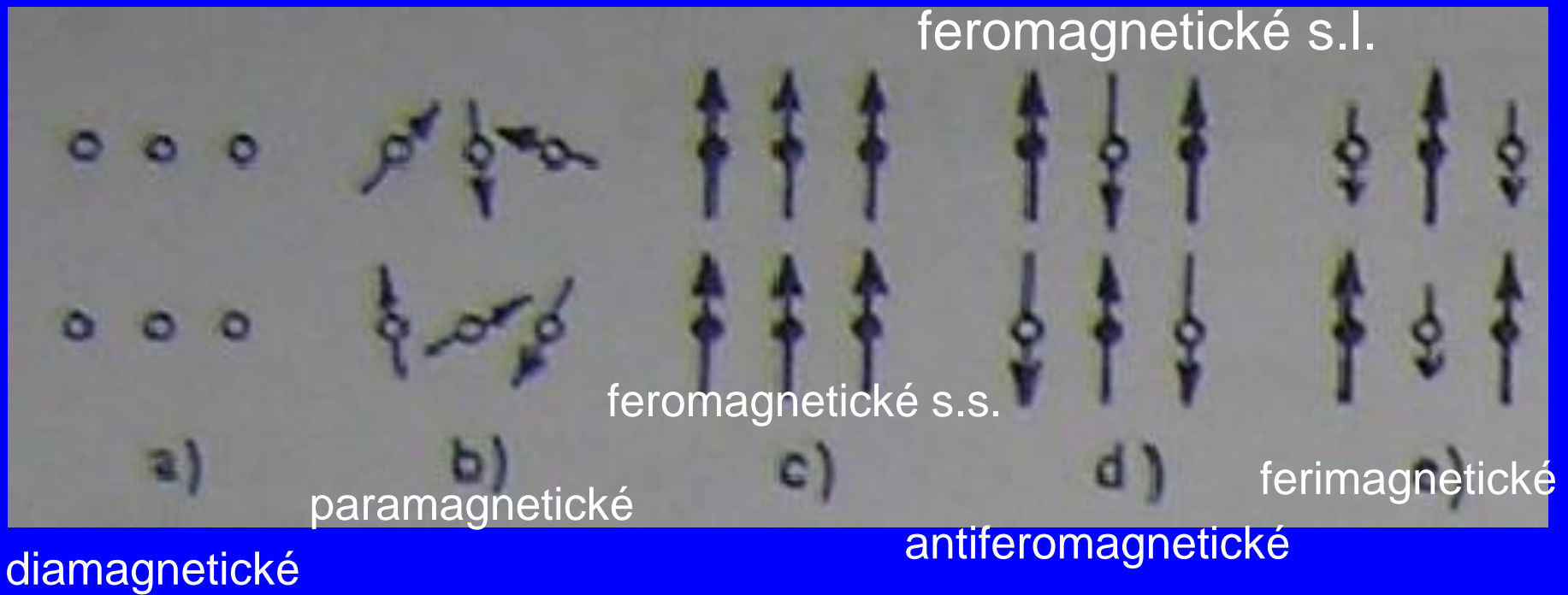
a) feromagnetické látky s.s. (v užšom zmysle)

b) antiferomagnetické

c) ferimagnetické

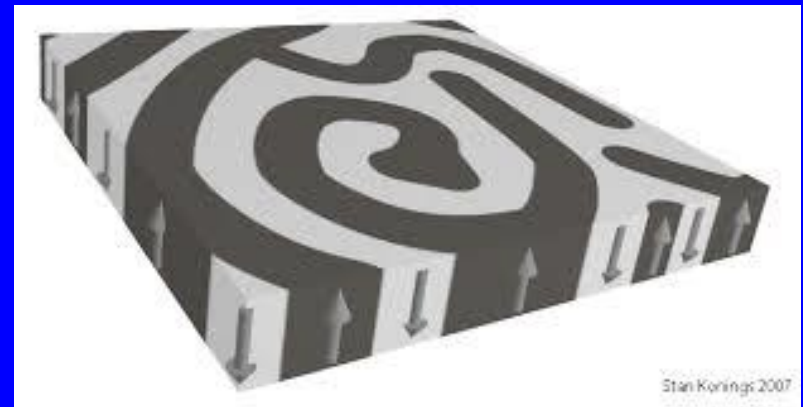
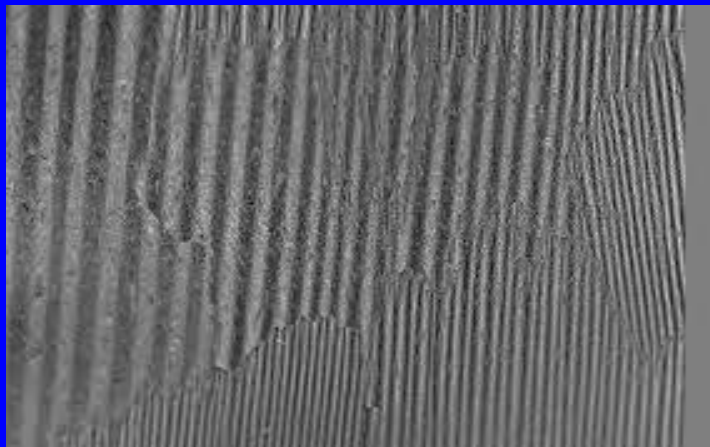
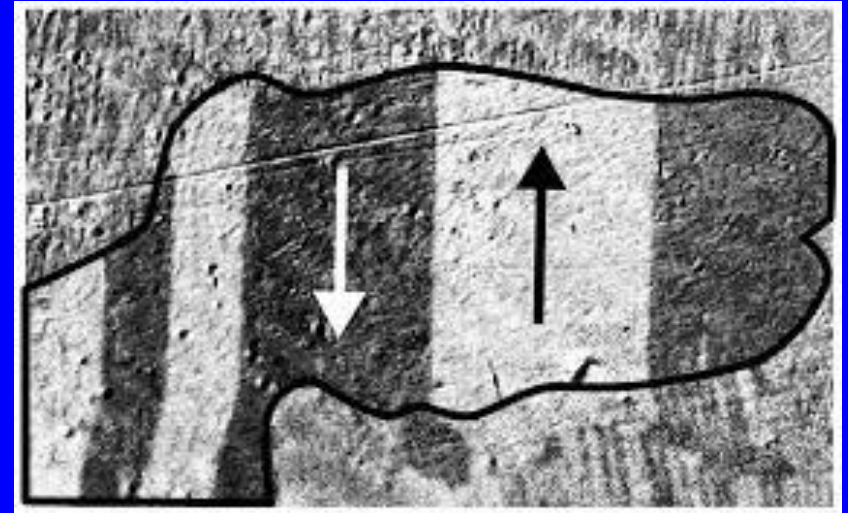
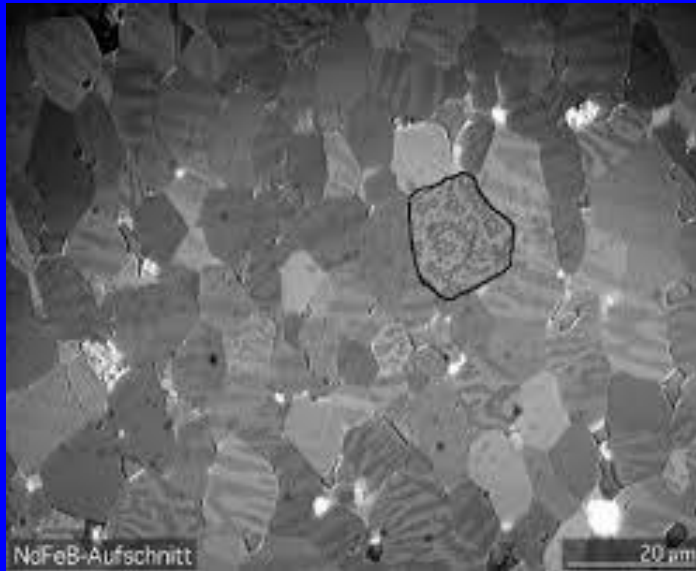
# magnetické vlastnosti látok – susceptibilita

Schéma usporiadania magnetických momentov (tzv. magnetických domén) v štruktúre látky:



# magnetické vlastnosti látok – susceptibilita

Schéma usporiadania magnetických momentov (tzv. magnetických domén) v štruktúre látky:





# magnetické vlastnosti minerálov

Magnetické vlastnosti minerálov sú spojené s obsahom iónov so stálym magnetickým momentom – tzv. magnetofórov (iónov charakterizovaných prítomnosťou niektorých nepárových elektrónov v obale –  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+4}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ).

Pri celkovej magnetizácii hornín sa najviac prejavujú feromagnetické minerály (s.l.), ktoré sú v naprostej väčšine rudnými minerálmi – **oxidy, hydroxidy, sulfidy**. Napriek tomu, že sú často v horninách vedľajšími alebo dokonca akcesorickými zložkami, postačuje to na to, aby sa celá hornina chovala aniferomagneticky.



# magnetické vlastnosti minerálov

**Oxidy** – najvýznamnejšie magnetické minerály

## 1. rad magnetit - ulvöspinel

magnetit:  $\text{Fe}^{+2}\text{Fe}_2^{+3}\text{O}_4$ ,

titanomagnetit  $\text{Fe}^{+2}(\text{Fe}^{+3},\text{Ti})_2\text{O}_4$ ,

ulvöspinel:  $\text{Ti Fe}^{+2}_2\text{O}_4$ ,

(kubická sústava)



## 2. rad hematit - ilmenit

hematit:  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,

ilmenit:  $\text{FeTiO}_3$ ,

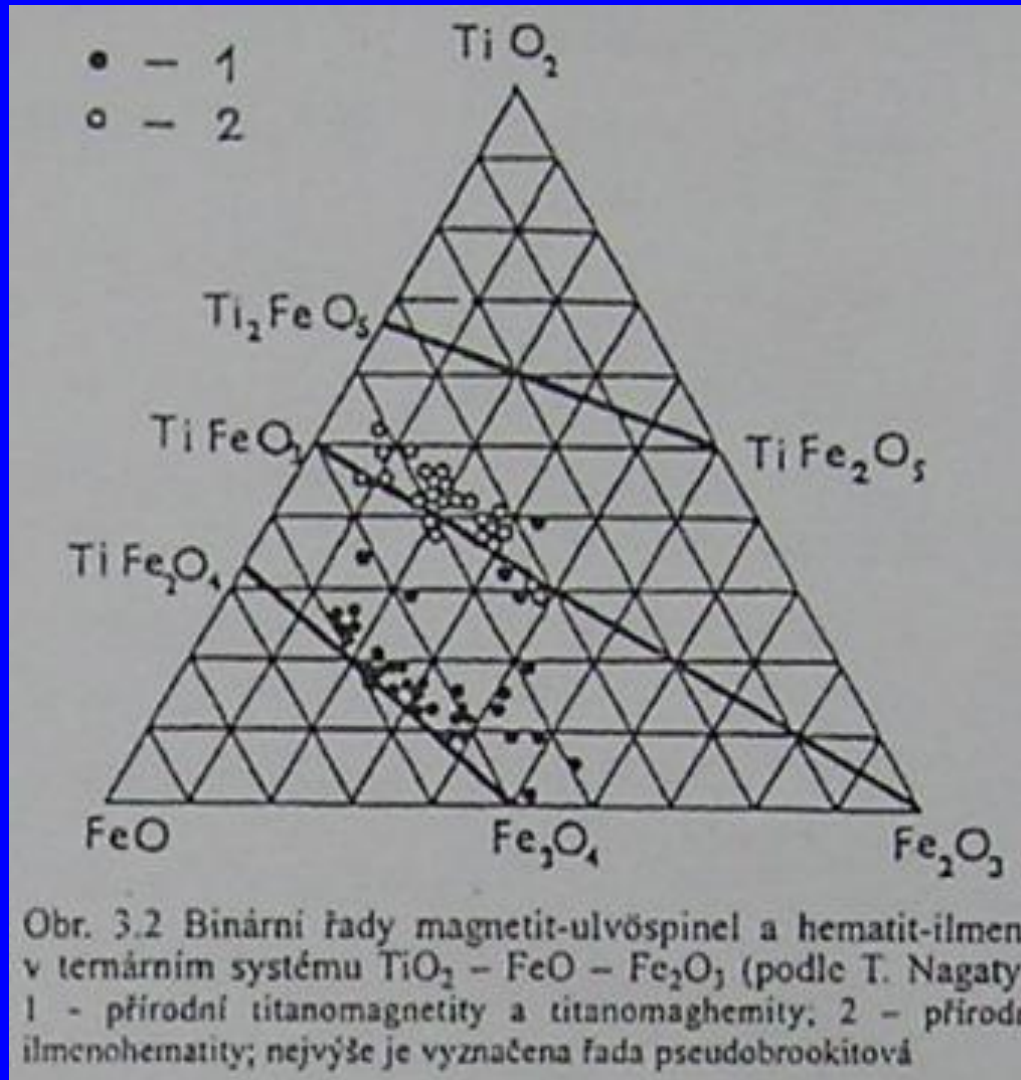
(trigonálna sústava)



Prechodom medzi týmito dvoma radmi je maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), má takú istú štruktúru ako magnetit (vzniká premenou z neho), je však nestabilný a prechádza na hematit.

# magnetické vlastnosti minerálov

**Oxidy** – najvýznamnejšie magnetické minerály



tzv. termální systém (trojuholník) podľa Nagatyho

# magnetické vlastnosti minerálov

**Hydroxidy** – menej významné oproti oxidom  
(hydratáciou strácajú oxidy svoje magnetické vlastnosti)

goethit:  $\alpha$ -FeO.OH (dehydratáciou sa mení na hematit)

lepidokrokit:  $\gamma$ -FeO.OH (dehydratáciou sa mení na maghemit)

limonit: FeO.OH.nH<sub>2</sub>O

(je vlastne zmesou goethitu a lepidokritu)



Pozn.: Hydroxidy hrajú dôležitú úlohu pri zvýšenej magnetizácii humusovej zložky pôd (využívané v archeogeofyzike).

# magnetické vlastnosti minerálov

**Sulfidy** – medzi feromagnetiká (s.l.) patrí iba pyrotín

pyrhotin:  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  ( $0 \leq x \leq 0.2$ )

jeho magnetické vlastnosti závisia silne zastúpenia Fe v jeho chemickom zložení (hodnoty x vo vzorci):

pre  $x < 0.085$  je antiferomagnetický

pre  $x > 0.085$  je ferimagnetický.



# magnetická susceptibilita minerálov a hornín

Samotné hodnoty objemovej magnetickej susceptibility dosahujú pre tieto typy magnetických minerálov (a hornín z nich zložených) veľmi veľké rozpätia -

- od 0.001 po 20 [SI jednotiek].

Uvádzajú sa buď ako desatinné čísla (s prvým platným číslom alebo vynásobené s  $10^{-5}$  alebo  $10^{-6}$ , pričom sa zaokrúhľujú na stovky alebo tisíce.

vybrané príklady:

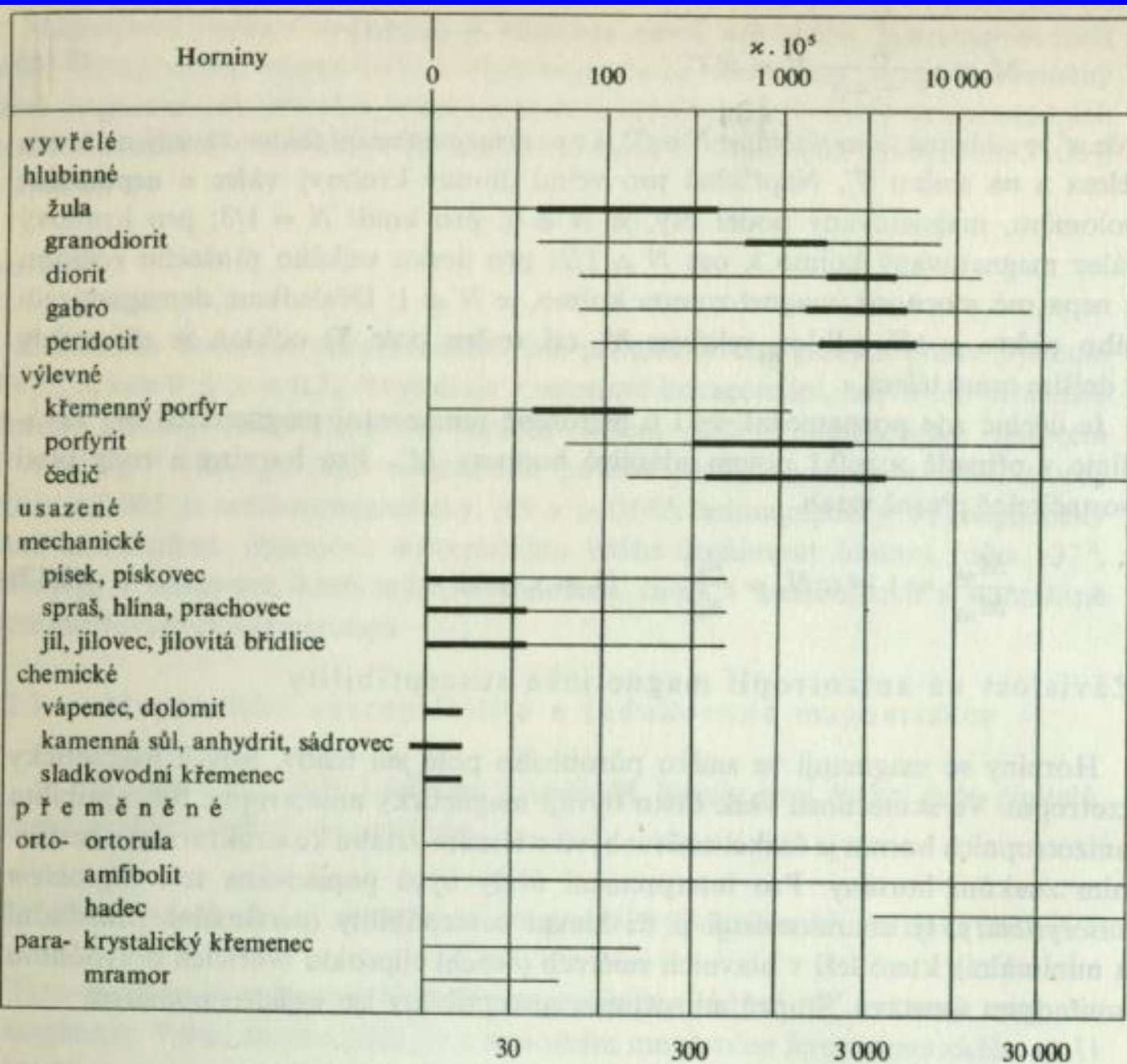
granodiorit:  $0.01 \text{ [SI]} = 1000 \cdot 10^{-5} \text{ [SI]} = 10000 \cdot 10^{-6} \text{ [SI]}$

andezit:  $0.02 \text{ [SI]} = 2000 \cdot 10^{-5} \text{ [SI]} = 20000 \cdot 10^{-6} \text{ [SI]}$

magnetit:  $0.1 \text{ [SI]} = 10000 \cdot 10^{-5} \text{ [SI]} = 100000 \cdot 10^{-6} \text{ [SI]}$

tvrdá oceľ:  $10 \text{ [SI]}$

# magnetická susceptibilita hornín



V hlavnej  
miere závisí  
od  
koncentrácie  
magnetických  
minerálov,  
najmä oxidov

najvyššie  
hodnoty:  
magmatické,  
najnižšie:  
sedimentárne

# príklady magnetickej susceptability minerálov a hornín

*Table 3.1 Magnetic susceptibilities of common rocks and ores*

<i>Common rocks</i>	
Slate	0–0.002
Dolerite	0.01–0.15
Greenstone	0.0005–0.001
Basalt	0.001–0.1
Granulite	0.0001–0.05
Rhyolite	0.00025–0.01
Salt	0.0–0.001
Gabbro	0.001–0.1
Limestone	0.00001–0.0001
<i>Ores</i>	
Hematite	0.001–0.0001
Magnetite	0.1–20.0
Chromite	0.0075–1.5
Pyrrhotite	0.001–1.0
Pyrite	0.0001–0.005

Tabuľka z učebnice:  
Milsom J.: Field geophysics,  
Wiley, 2003

Pozn.: občas sa vyskytujú extrémne a protichodné hodnoty – napr. silne magnetické žuly (u nás tzv. rochovský granit) alebo nemagnetické gabrá...



# magnetická susceptibilita hornín

V menšej miere závisí susceptibilita od tvaru geologického telesa (pre hodnoty  $\kappa > 0.1$  [SI units]) – vo vnútri telesa totiž vzniká indukované pole, ktoré je nasmerované proti indukujúcemu poľu H:

$$M_i = \kappa H - \kappa N M_i,$$

kde N je tzv. **demagnetizačný faktor** ( $N \in \langle 0, 1 \rangle$ ), pre jednoduché telesá ho vieme analyticky vyjadriť (napr.: guľa: 1/3, valec: 1/2).

Jednoduchou aritmetickou úpravou tohto vzťahu získame dôležitý vzťah pre  $M_i$ :

$$M_i = \frac{\kappa}{1 + \kappa N} H = \kappa' H$$

kde  $\kappa'$  je tzv. zdanlivá susceptibilita.

# magnetická susceptibilita hornín

V menšej miere závisí susceptibilita niekedy od smeru, v ktorom je určovaná – tzv. **anizotropia** magnetickej susceptibility.

Matematicky sa anizotropia vyjadruje tenzorom anizotropie, ale lepšie predstaviteľný je tzv. **elipsoid susceptibility**, ktorý je daný 3 zložkami: maximálnou, strednou a minimálnou ( $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ ).

Dôležitý je tiež pomer maximálnej a minimálnej susceptibility, tzv. **stupeň magn. anizotropie**:

$$P = \kappa_1 / \kappa_3.$$

Ďalej tzv. **magnetická foliácia**:

$$F = \kappa_2 / \kappa_3,$$

a tzv. **magnetická lineácia**:

$$L = \kappa_1 / \kappa_2.$$

# zist'ovanie magnetickej susceptibility

**Nepriamo** (interpretácia magnetometrických meraní)  
alebo **priamo** – pomocou prístrojov na priame meranie  
susceptibility:

- terénne (kapametre),
- laboratórne (striedavý mostík).

Oba tieto prístupy sú založené na zmene toku  
indukcie v cievke (tzv. indukčné metódy).



# zist'ovanie magnetickej susceptibility

Prístroje na meranie susceptibility – striedavý mostík. Vo svojej konštrukcii obsahuje v elektrickom obvode 2 cievky – do jednej sa vkladá horninová vzorka, do druhej sa zasúva feritové jadro, tak aby sa vykompenzoval obvod. Doladením celého obvodu pomocou potenciometra je možné odvodiť susceptibilitu vzorky.



# zist'ovanie magnetickej susceptibility

Prístroje na meranie susceptibility – kapametre.

Zmena toku indukcie cievky  $\Delta\Phi$  je úmerná zdanlivej susceptibilite  $\kappa'$ :

$$\Delta\Phi = A \kappa' ,$$

kde  $A$  je konštanta prístroja a určuje sa ciachovaním na etalónoch so známou hodnotou zdanlivej susceptibility.

Pre vzťah medzi zdanlivou a skutočnou susceptibilitou platí:

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \kappa N}$$

kde  $N$  je demagnetizačný faktor (vplyv tvaru telesa).

Ak  $\kappa' < 0.1$  [SI], tak platí:  $\kappa' \cong \kappa$ .

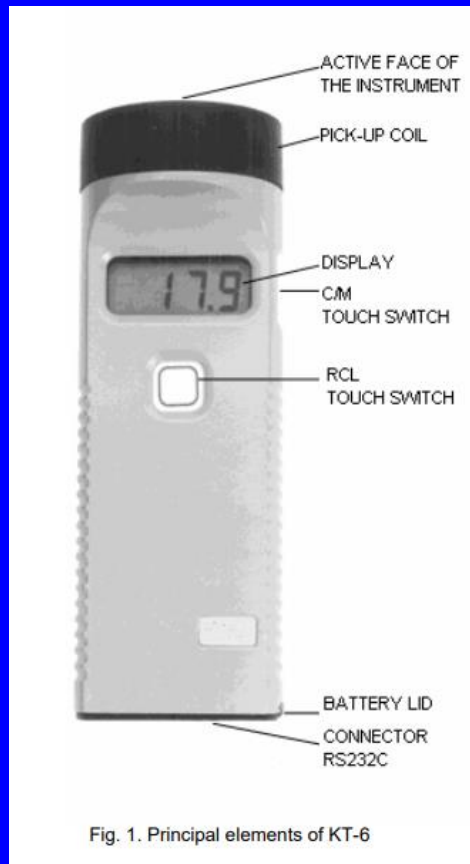
# získovanie magnetickej susceptability

## Prístroje na meranie susceptability – ručné kapametre.

starší typ (Geofyzika Brno)

KT-5, neskôr KT6

(pôvodne – Exploranium)



neskôr (SatisGeo Brno)

KT-7



paralelne k tomu (GF Instruments Brno)

SM 20



zobrazenú hodnotu treba násobiť s  $10^{-3}$

# paleomagnetizmus

Paleomagnetizmus študuje vlastnosti **primárnej zložky remanentnej magnetizácie** (získanej pri vzniku horniny).

Táto dokáže poskytnúť informáciu o smere zemského magnetického poľa pôsobiaceho počas vzniku horniny.

Dôležitá je realizácia meraní na vzorkách (orientovane odobratých) v prostredí „vypnutého“ vonkajšieho magnetického poľa



tzv. Helmholtzova cievka  
(„vypína“ vonkajšie magnetické pole)