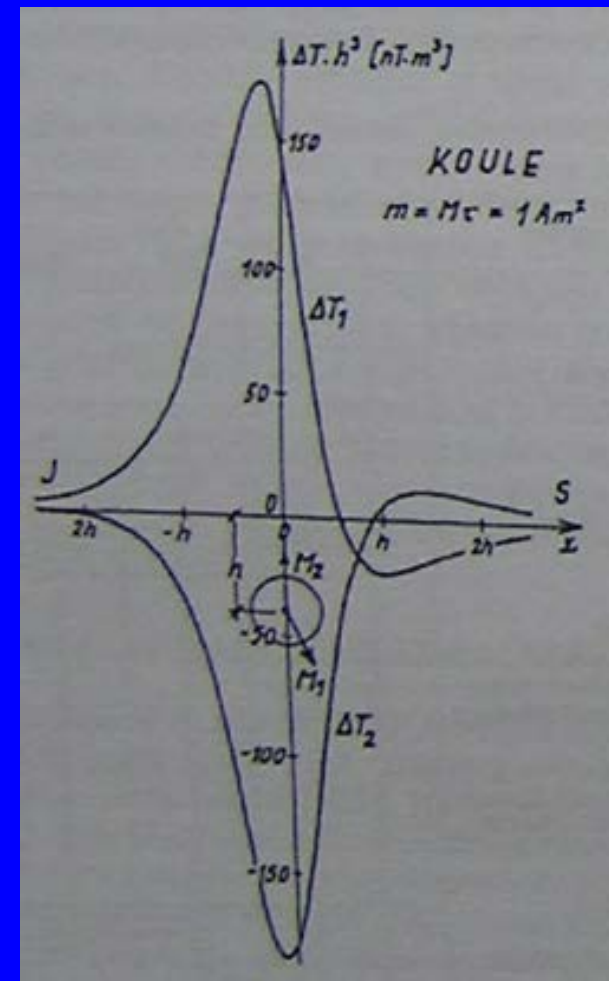


Petrofyzika: magnetické vlastnosti hornín

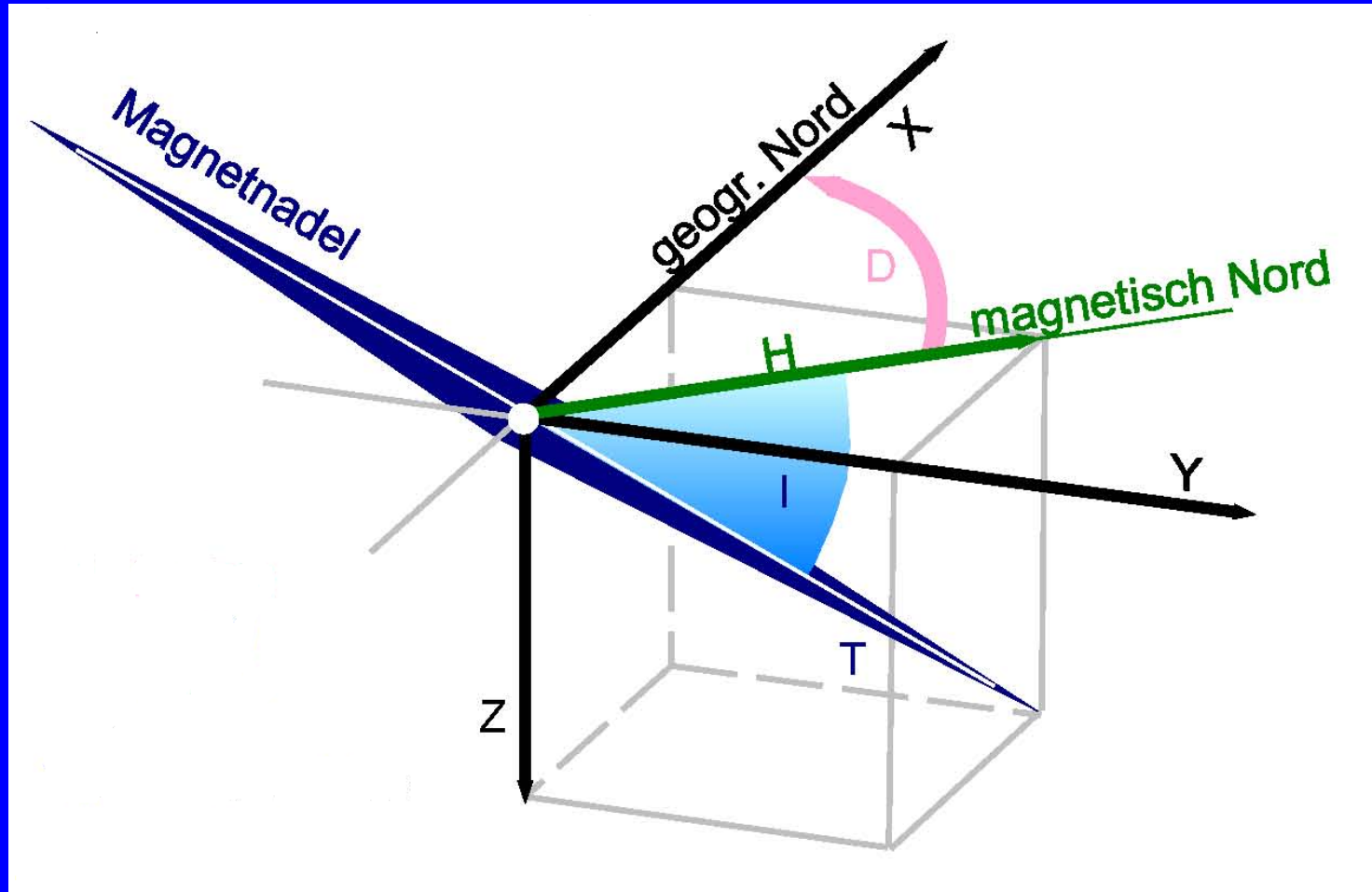
motivácia: prečo hovoríme o magnetických vlastnostiach hornín?

- tvar magnetických anomálií je daný výslednou magnetizáciou horninovej štruktúry a táto je ovplyvňovaná:
 - a) indukovanou zložkou (susceptibilita) a
 - b) remanentnou zložkou („zapamätanou“ magnetizáciou)



Petrofyzika: magnetické vlastnosti hornín

motivácia: prečo hovoríme o magnetických vlastnostiach hornín?



Petrofyzika: magnetické vlastnosti hornín

obsah prednášky:

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

základné pojmy

magnetické pole – 2 dôležité vektorové veličiny:

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

magnetická indukcia $\mathbf{B}$, [T]

medzi nimi platí dôležitý vzťah:

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

kde μ – 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):

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

μ_0 – permeabilita vákua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$)

základné pojmy

magnetické pole – 2 dôležité vektorové veličiny:

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

magnetická indukcia $\mathbf{B}$, [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 **H**, magnetická indukcia **B**

staré a nové jednotky:

Table 1.1: Conversion between SI and cgs units.

Parameter	SI unit	cgs unit	Conversion
Magnetic moment (m)	Am^2	emu	$1 \text{ A m}^2 = 10^3 \text{ emu}$
Magnetization (M)	Am^{-1}	emu cm^{-3}	$1 \text{ Am}^{-1} = 10^{-3} \text{ emu cm}^{-3}$
Magnetic Field (H)	Am^{-1}	Oersted (oe)	$1 \text{ Am}^{-1} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ oe}$
Magnetic Induction (B)	T	Gauss (G)	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
Permeability of free space (μ_0)	Hm^{-1}	1	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} = 1$
Susceptibility (χ) total ($\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{H}}$)	m^3	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 ($\frac{\mathbf{m}}{m} \cdot \frac{1}{\mathbf{H}}$)	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	$\text{emu g}^{-1} \text{ oe}^{-1}$	$1 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ emu g}^{-1} \text{ oe}^{-1}$
$1 \text{ H} = \text{kg m}^2 \text{A}^{-2} \text{s}^{-2}, \quad 1 \text{ emu} = 1 \text{ G cm}^3, \quad B = \mu_o(H + M), \quad 1 \text{ T} = \text{kg A}^{-1} \text{s}^{-2}$			

základné pojmy

Poznámka:

Meraným poľom v apl. geofyzike je magnetická indukcia (napr. atómové magnetometre). Väčšina prístrojov meria jej veľkosť, ale existujú aj „vektorové“ magnetometre, ktoré merajú jej jednotlivé zložky.



magnetické vlastnosti látok – permeabilita

Podľa hodnoty μ_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 (4 kovy: Fe, Ni, Co, Gd).

Diamagnetické látky sú z magnetického poľa vypudzované, paramagnetické a feromagnetické sú naopak do magnetického poľa vťahované (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 $\mu_r = 0$.

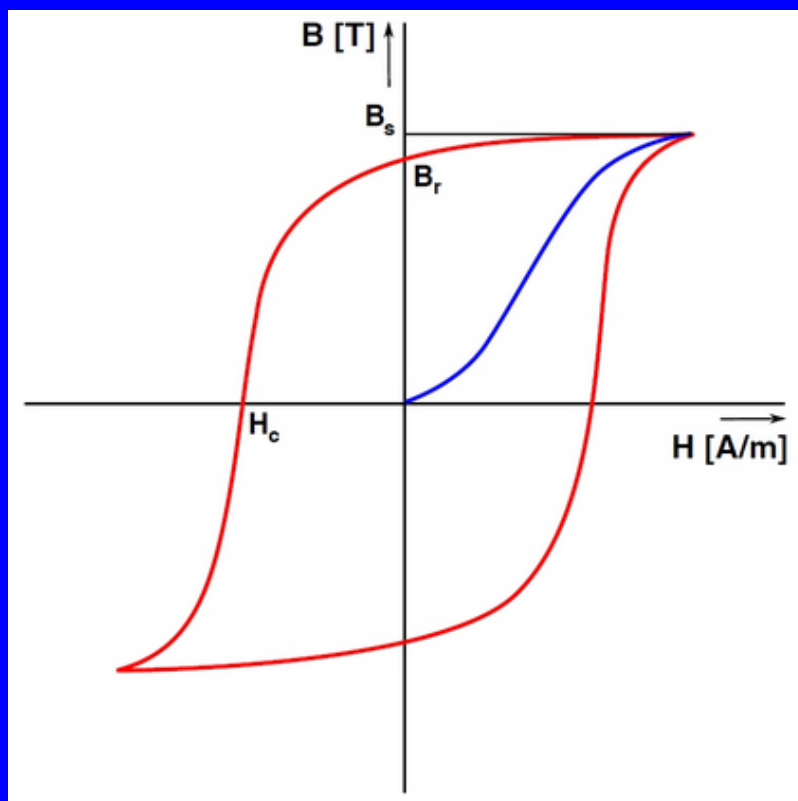
magnetické vlastnosti látok – permeabilita

Materiál	μ_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 – remanetná
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)

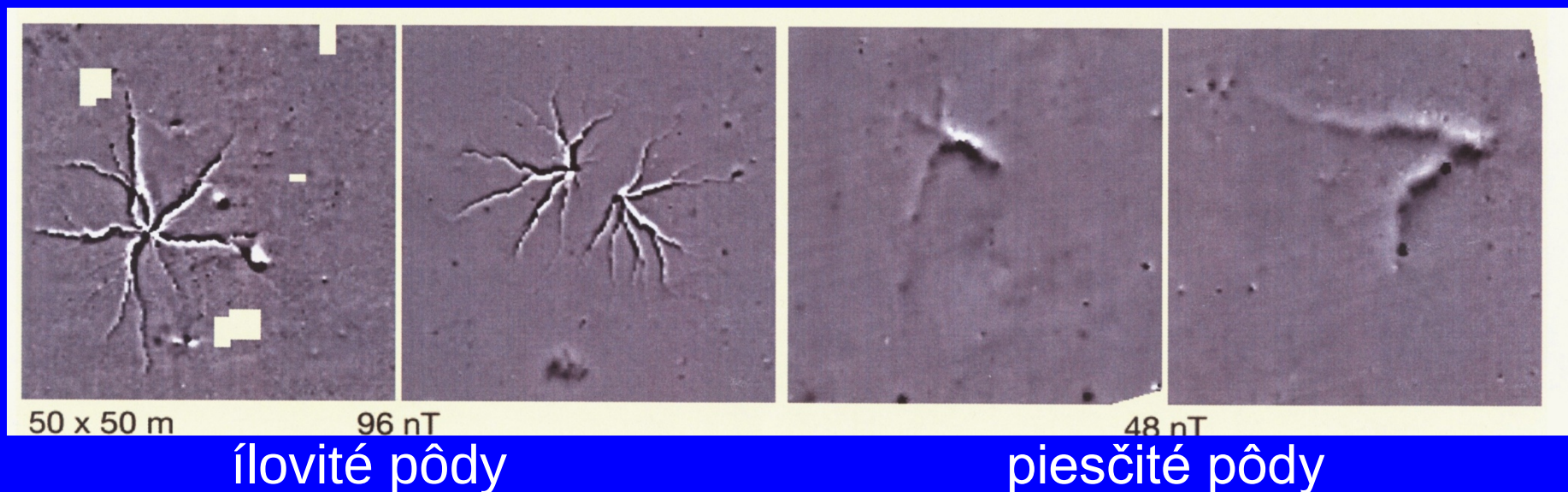
magnetické vlastnosti látok – základné pojmy

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:

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

κ – 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 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:

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

κ – 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 – susceptibilita

$\kappa < 0$, $\mu_r < 1$ – diamagnetické látky (minerály),
hodnoty: -10^{-6} až -10^{-5} [SI], napr.: kremeň,
vápenec, živce, grafit, sádrovec, halit, galenit

$\kappa > 0$, $\mu_r > 1$ – paramagnetické látky (minerály),
hodnoty: 10^{-5} až 10^{-3} [SI], napr. pyroxén, olivín,
amfibol, biotit, pyrit, siderit, muskovit,...

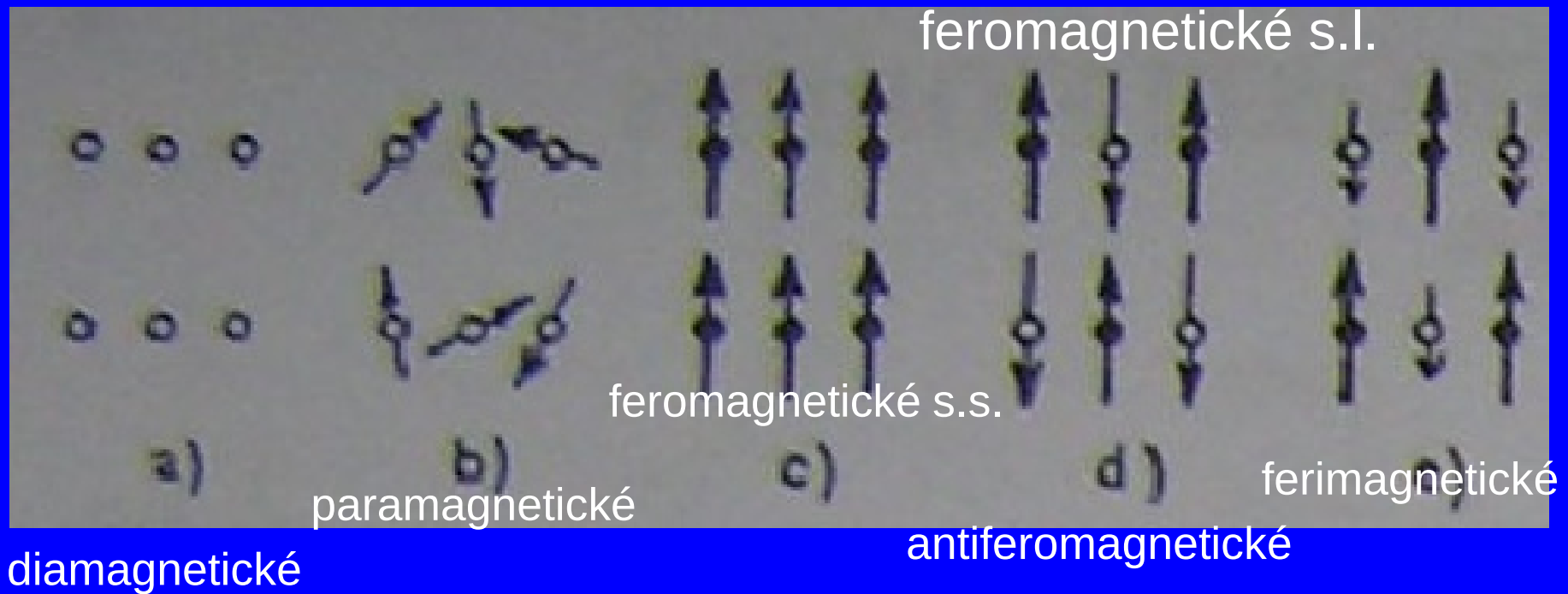
$\kappa \gg 0$, $\mu_r \gg 1$ – feromagnetické látky s.l.
hodnoty: 10^{-2} až 10^{+2} [SI], napr. magnetit,
titanomagnetit, ulvöspinel, hematit, ilmenit

feromagnetické látky 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 minerálov

Magnetické vlastnosti minerálov sú spojené s obsahom iónov so stálym magnetickým momentom – tzv. magnetofórov (iónov charakterizovaných prítomnosťou niektorých nepárových elektrónov v obale – Fe^{+3} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Mn^{+3} , Mn^{+4} , Ni^{+2} , Co^{+2} , 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: FeTiO_3 ,

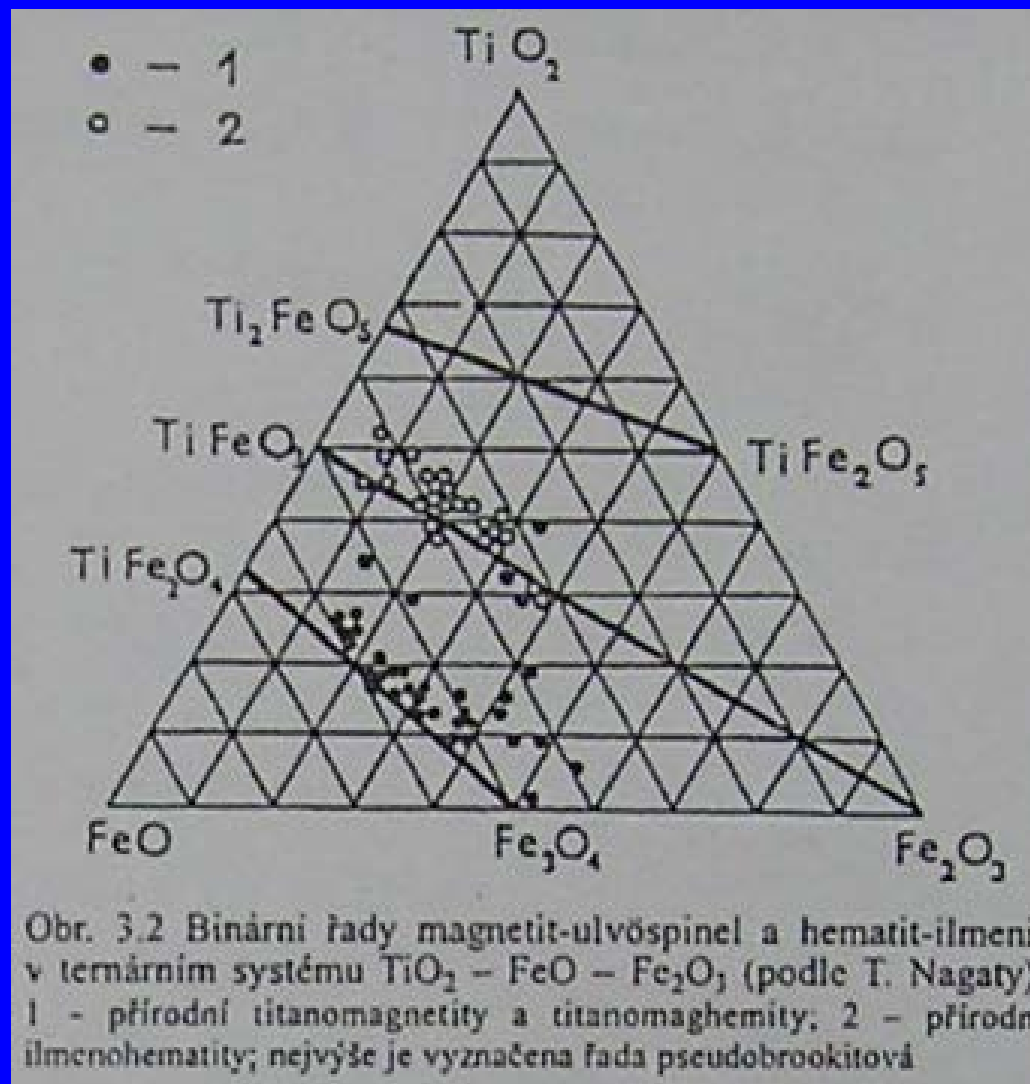
(trigonálna sústava)



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 minerálů

Oxidy – nejvýznamnější magnetické minerály



tzv. termální systém (trojuholník) podľa Nagatyho

magnetické vlastnosti minerálov

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

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

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

limonit: $\text{FeO.OH.nH}_2\text{O}$

(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: Fe_{1-x}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.

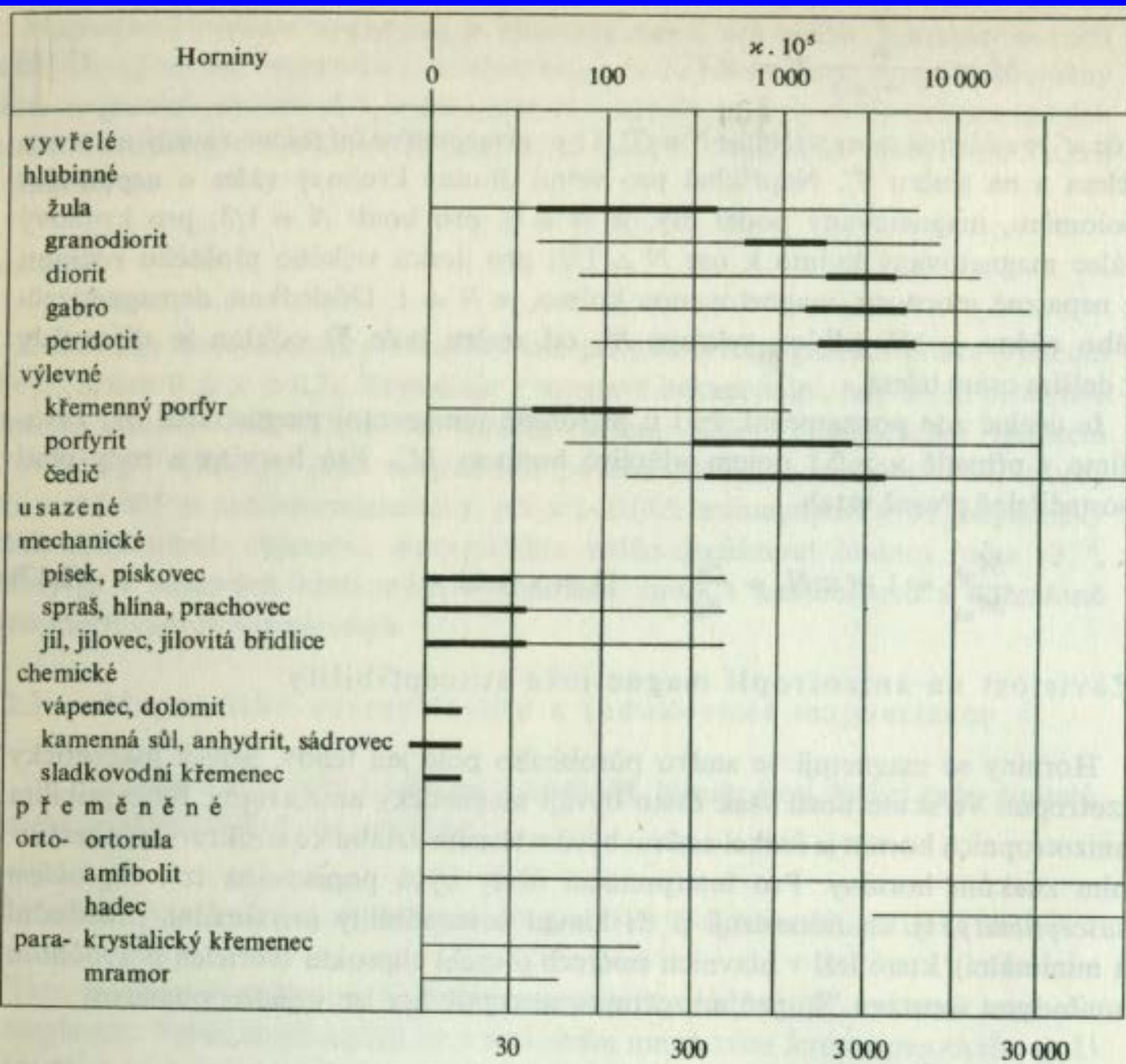


magnetické vlastnosti minerálov

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].

magnetická susceptibilita hornín



V hlavnej
miere závisí
od
koncentrácie
magnetických
minerálov,
najmä oxidov

najvyššie
hodnoty:
magmatické,
najnižšie:
sedimentárne

príklady magnetickej susceptibility minerálov a hornín

Table 3.1 Magnetic susceptibilities of common rocks and ores

Common rocks

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

Ores

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

skúsme si uvedomiť, pri
ktorých horninách sa
môže prejavíť
demagnetizačný efekt

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 κ' 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 (κ_1 , κ_2 , κ_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**:

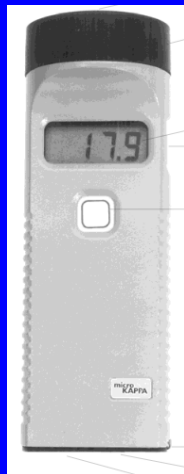
$$L = \kappa_1 / \kappa_2.$$

zisťovanie 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).



získovanie magnetickej susceptability

Prístroje na meranie susceptability – kapametre.

Zmena toku indukcie cievky $\Delta\Phi$ je úmerná zdanlivej susceptibilitě κ' :

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

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

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 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.



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)