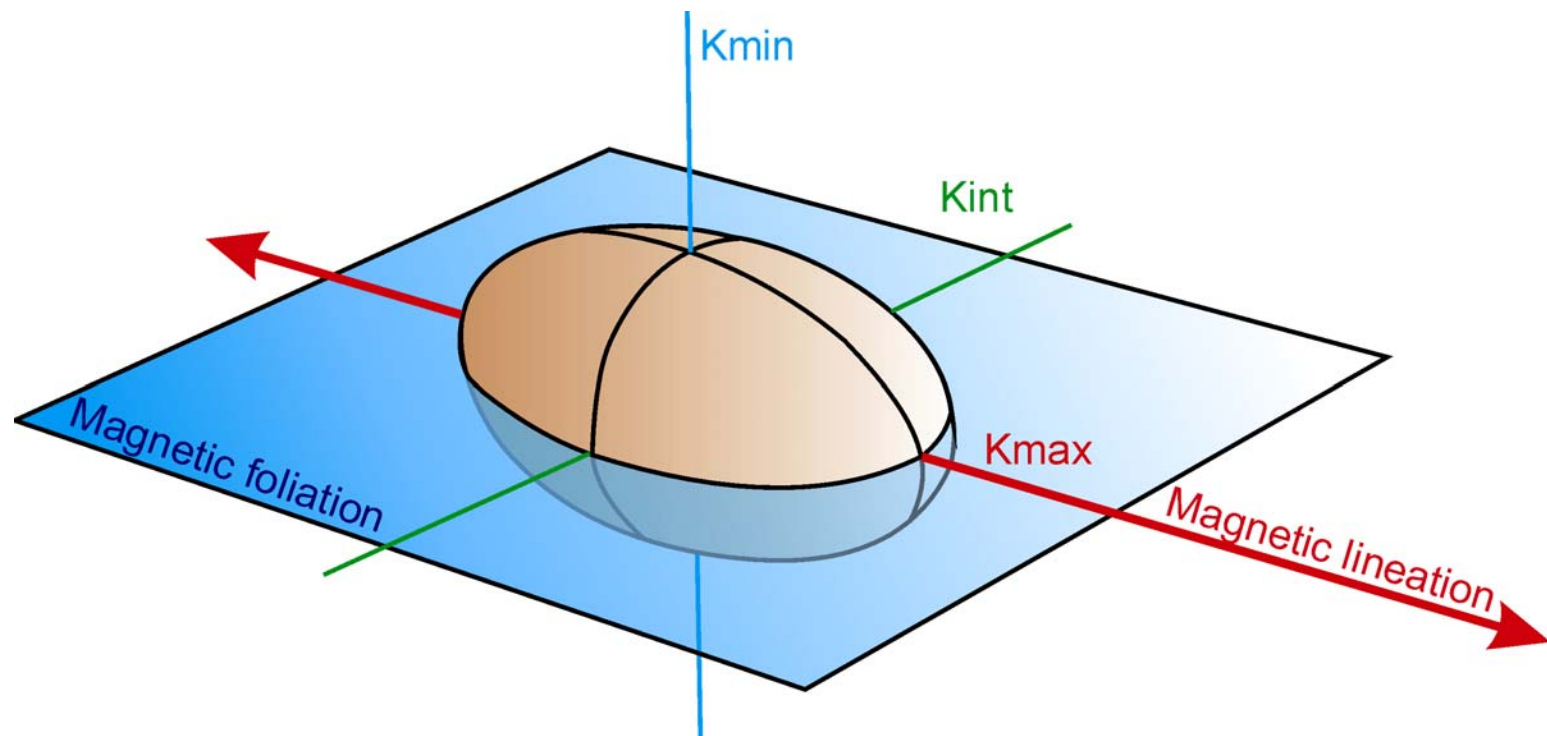


Magnetická anizotropie hornin

(stručný přehled a využití v geologii)



Osnova

1. Základní principy magnetismu a magnetická susceptibilita
2. Anizotropie magnetické susceptibility
3. Anizotropie minerálů
4. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin
5. Magnetická stavba sedimentárních hornin
6. Magnetická stavba vyvřelých hornin
7. Magnetická stavba metamorfitů
8. Odběr vzorků, měření a zpracování dat
9. Separace paramagnetické a feromagnetické anizotropie
10. Vztah mezi magnetickou anizotropií a deformací

➤ Literatura

- Tarling, D.H. & Hrouda, F. 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rock*, Chapman & Hall, 217 s.
- Lanza, R. & Meloni, A. 2006. *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologist*. Springer, 278 s. (Kapitola 5)

➤ Kontakt

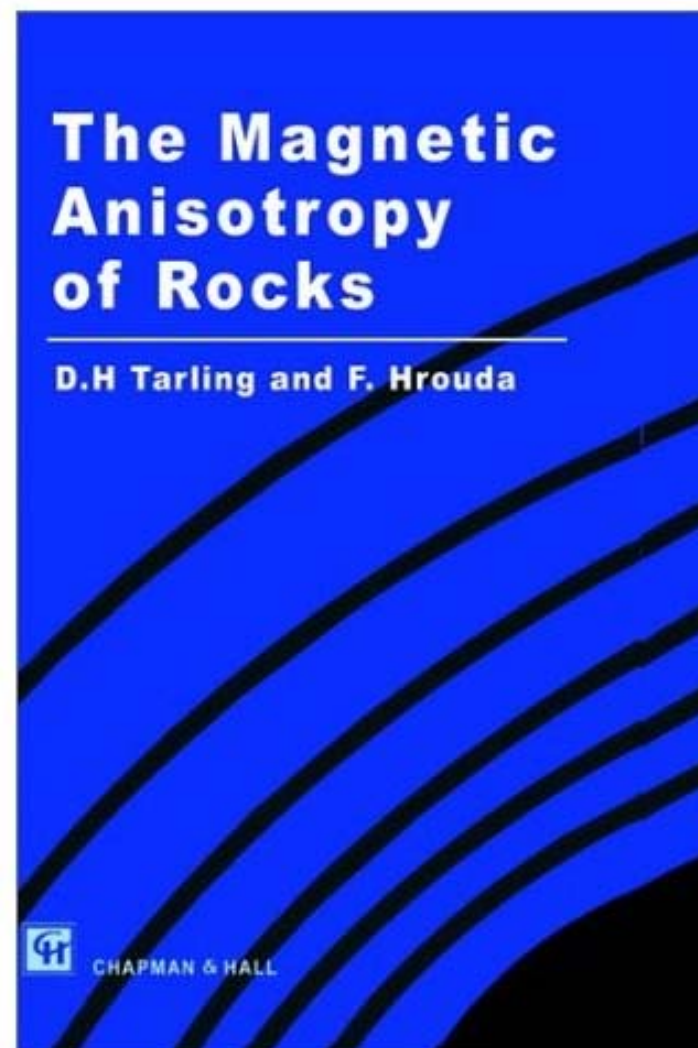
Martin Chadima (chadima@sci.muni.cz)
AGICO, Brno



Advanced Geoscience Instruments Company

➤ Přednášky

<http://www.sci.muni.cz/~chadima/geomagnetismus/>



Definice a využití

Magnetická anizotropie je směrová závislost určité magnetické vlastnosti.

- AMS – anizotropie magnetické susceptibility
- AMR – anizotropie magnetické remanence

Magnetická anizotropie hornin odráží magnetickou anizotropii jednotlivých minerálních zrn a jejich přednostní orientaci. Jestliže známe magnetickou anizotropii jednotlivých minerálních zrn, pak z celkové anizotropie horniny můžeme určit jejich přednostní uspořádání.

Studium vnitřní stavby hornin (Petrofabric)

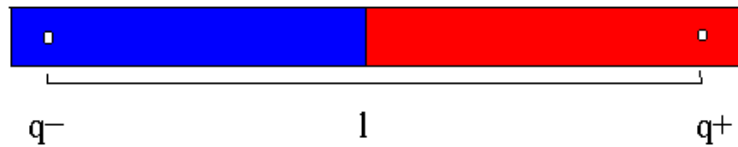
- Optické metody: Fjodorovův (univerzální) stolek
- Rentgenová texturní goniometrie
- Neutronová goniometrie
- Difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD)

Definice a využití

- V porovnání s ostatními metodami přednostní analýzy je magnetická anizotropie rychlá, levná, má velkou rozlišovací schopnost, může být aplikována systematicky na celých výchozech, vrtných jádrech nebo geologických jednotkách
- Využití ve strukturní geologii a tektonice, vulkanologii, sedimentologii

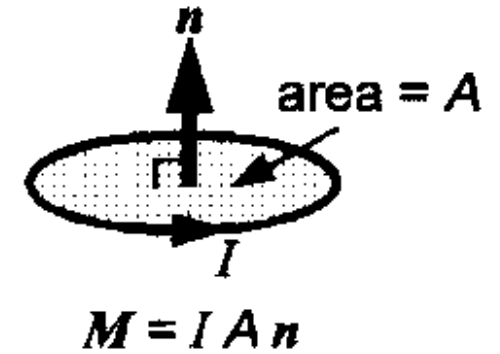
1. Základní principy magnetismu a magnetická susceptibilita

Magnetický dipól

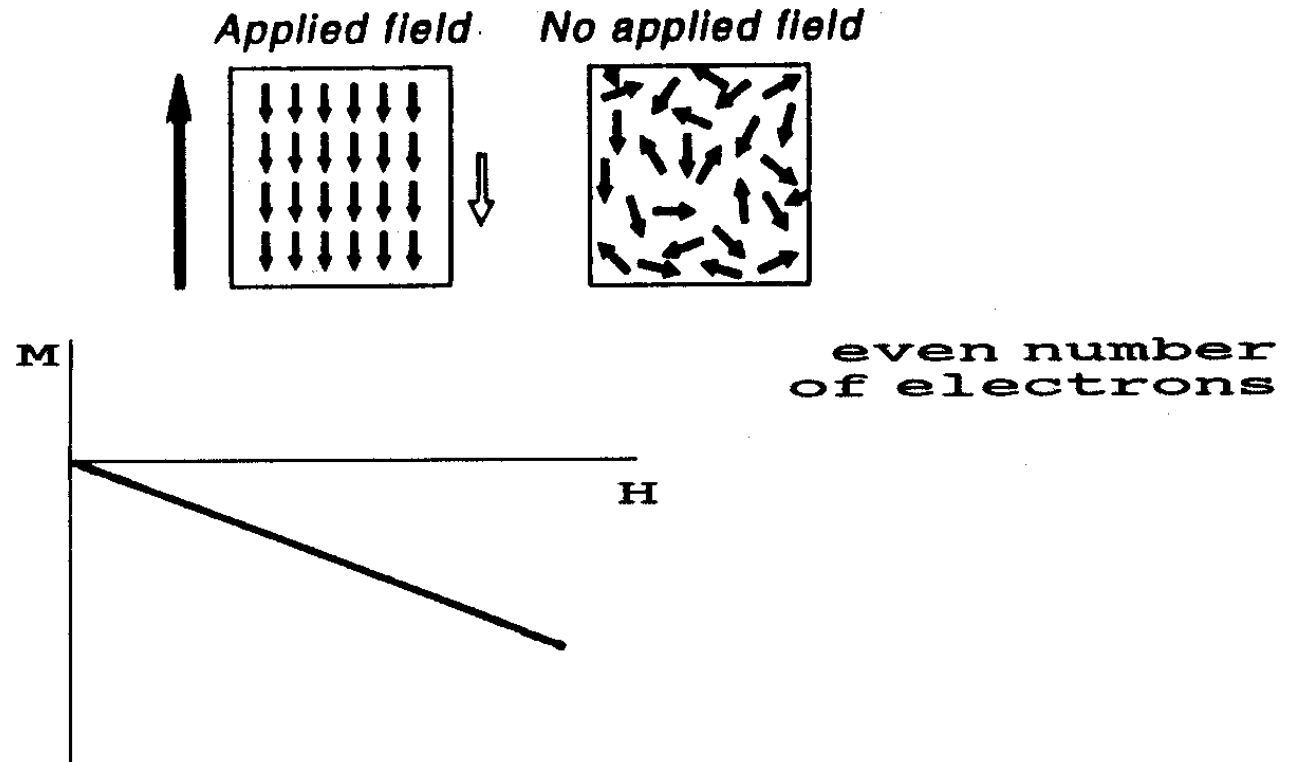


Magnetický moment $\mathbf{m} = q \cdot \mathbf{l}$

q – magnetický náboj
 l - vzdálenost



Diamagnetismus



křemen $k = -15,4 \times 10^{-6}$

opál $k = -12,9 \times 10^{-6}$

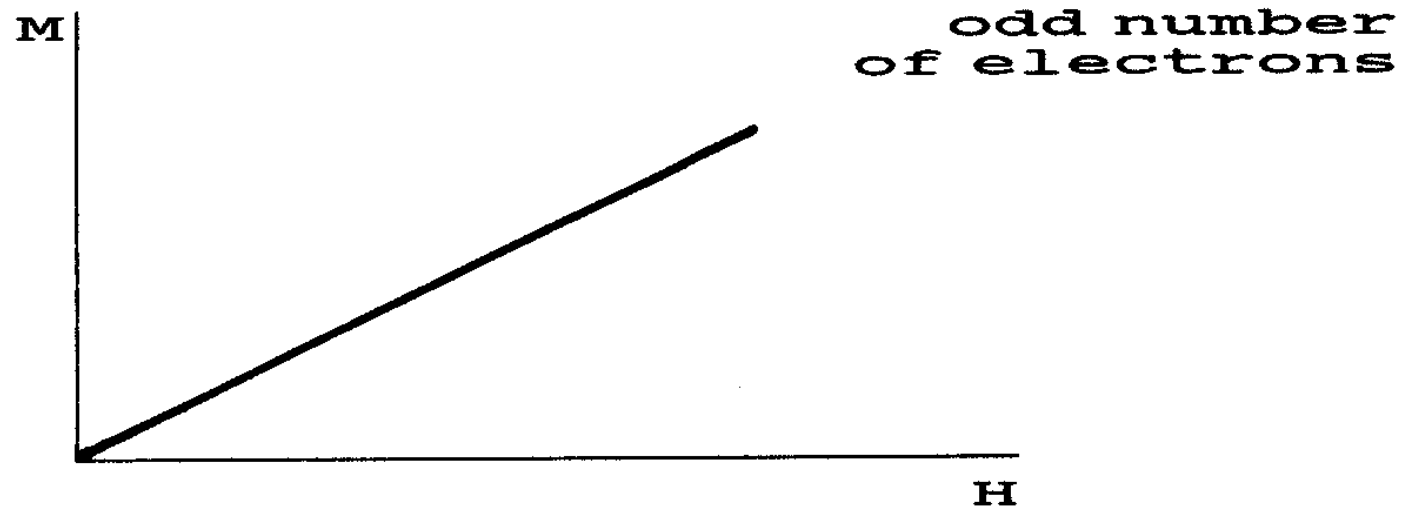
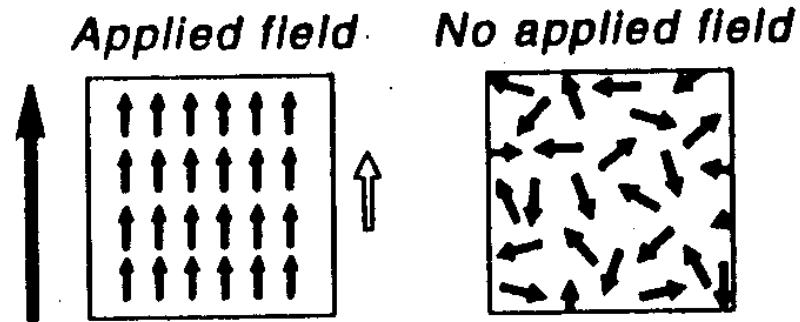
ortoklas $k = -13,7 \times 10^{-6}$

halit $k = -10,3 \times 10^{-6}$

kalcit $k = -13,1 \times 10^{-6}$

aragonit $k = -15,0 \times 10^{-6}$

Paramagnetismus



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 $k = 750 - 1368 \times 10^{-6}$

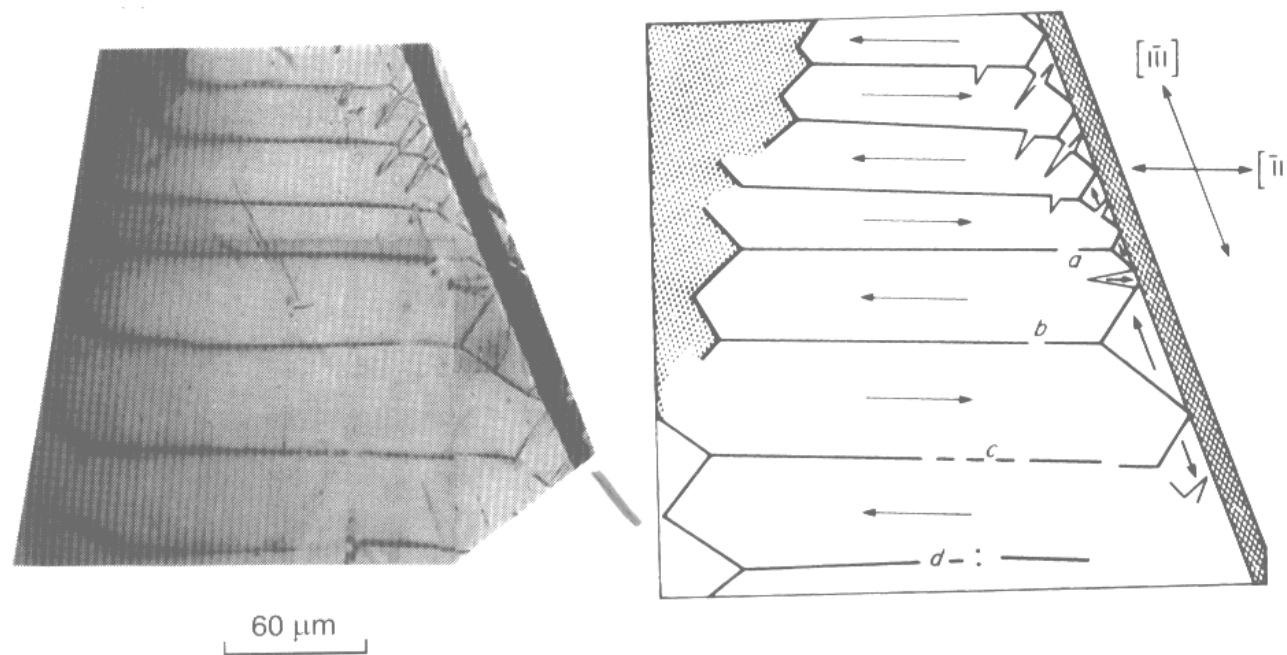
granát $k = 502 - 6780 \times 10^{-6}$

Feromagnetismus

Ferimagnetismus

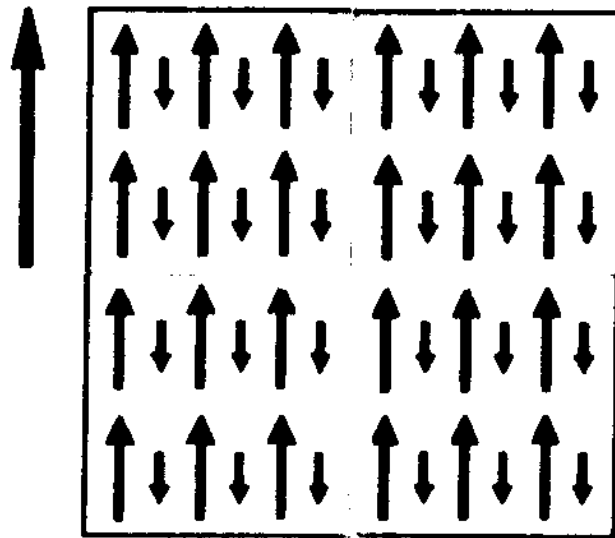
Antiferomagnetismus

Feromagnetismus (s.s.)



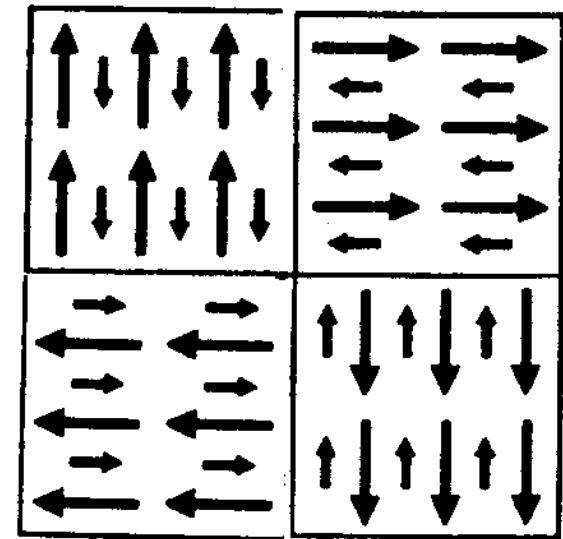
Magnetické domény – regiony se souhlasně uspořádanými magnetickými momenty

Ferimagnetismus



Applied field.

Ferrimagnetic



No applied field

magnetit

$$k = 3 - 6$$

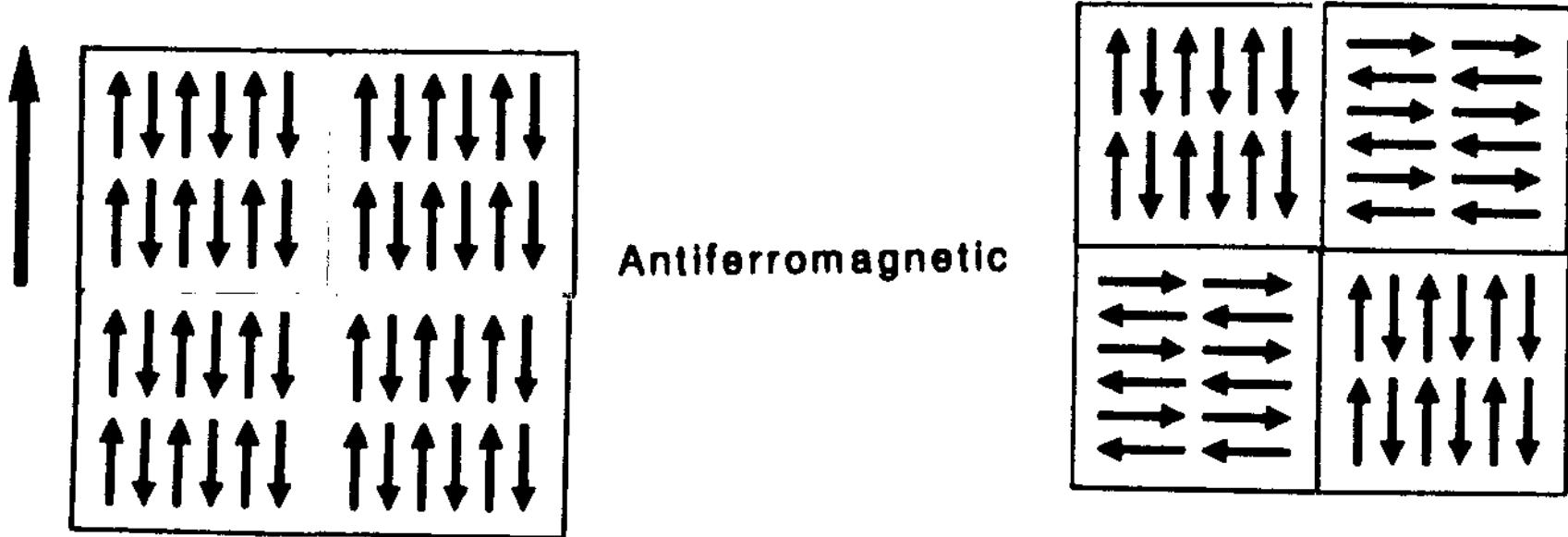
titanomagnetit

$$k = 0,5 - 3,5$$

monoklin. pyrhotin

$$k = 0,2 - 0,7$$

Antiferromagnetismus



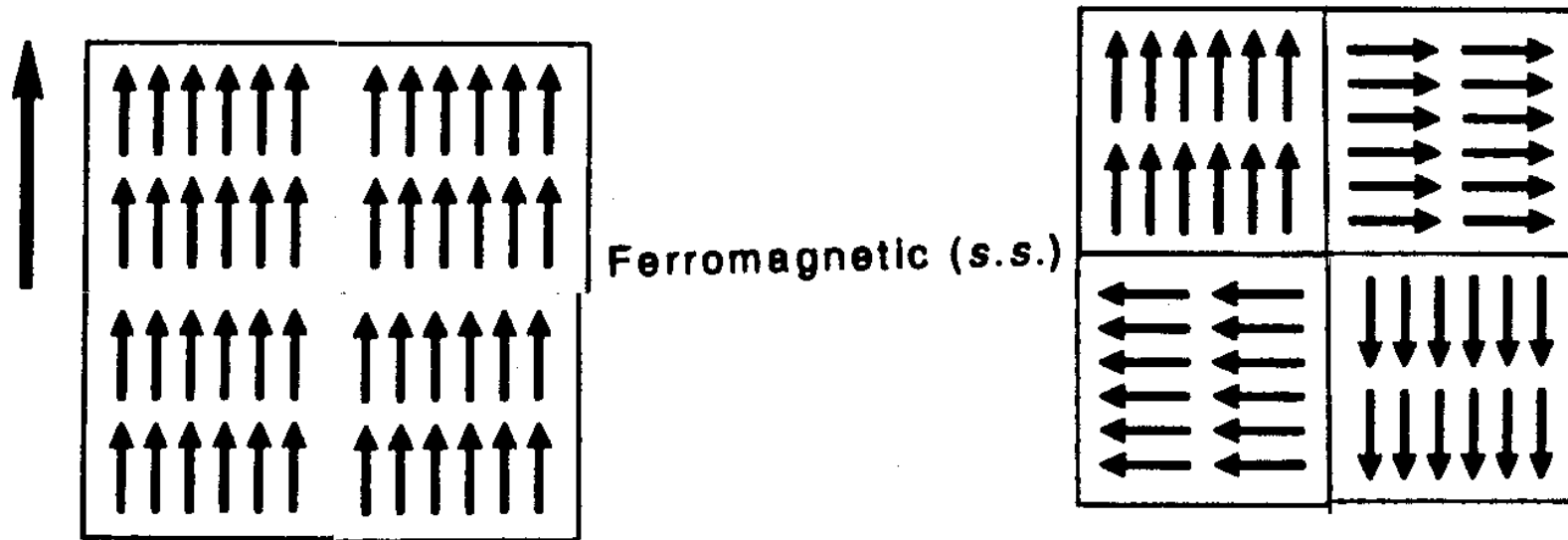
Antiferromagnetic

hematit

hexagonal. pyrhotin

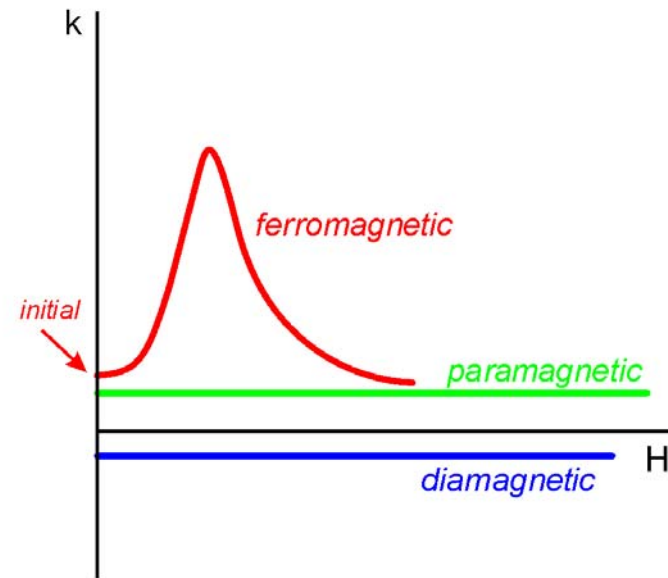
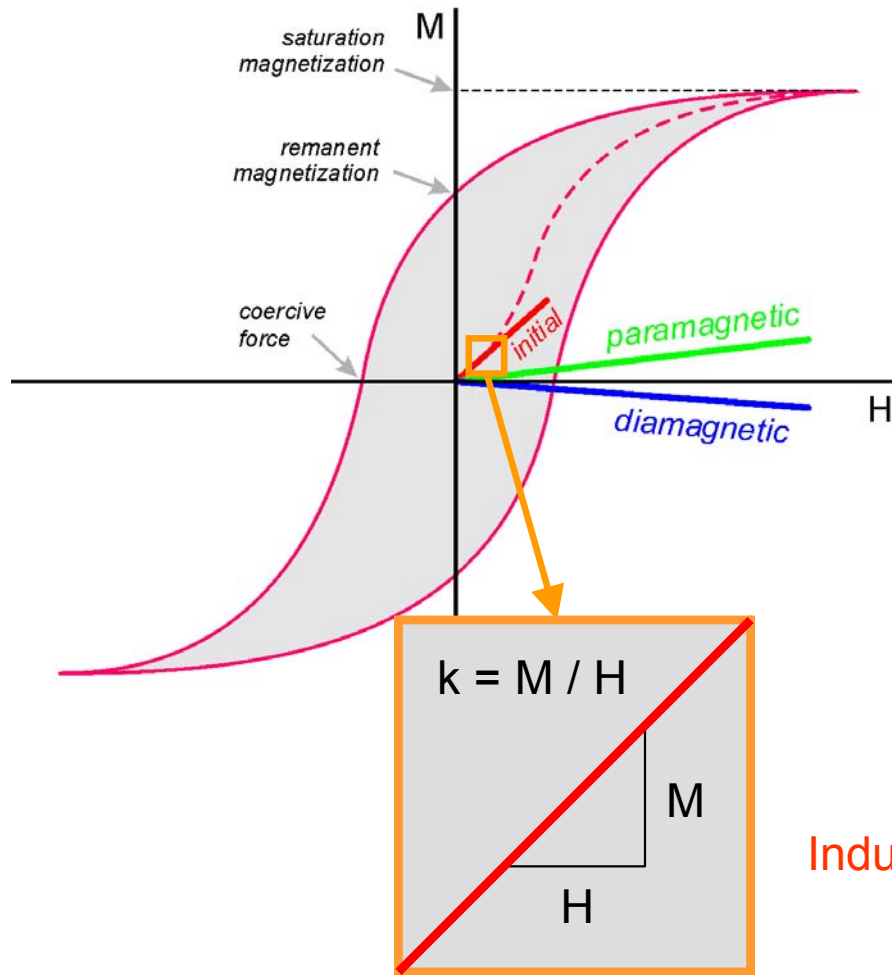
$$k = 0,001 - 0,2$$

Ferromagnetismus (*sensu stricto*)



kovové železo

1. Základní principy magnetismu a magnetická susceptibilita



$$M = M_i + M_r$$

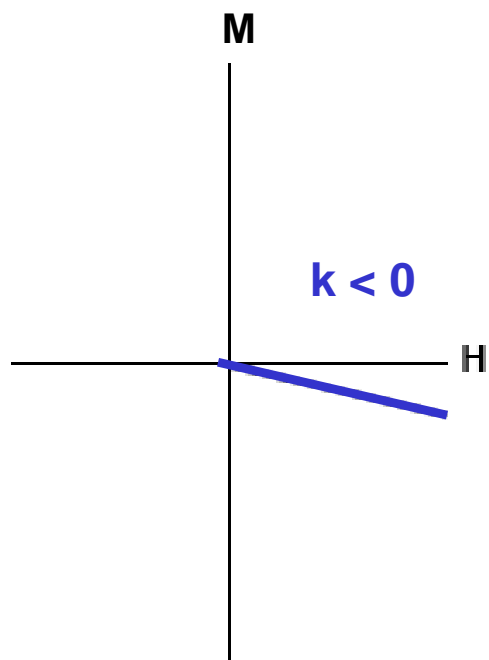
Indukovaná magnetizace Remanentní magnetizace

$$M_i = k \times H$$

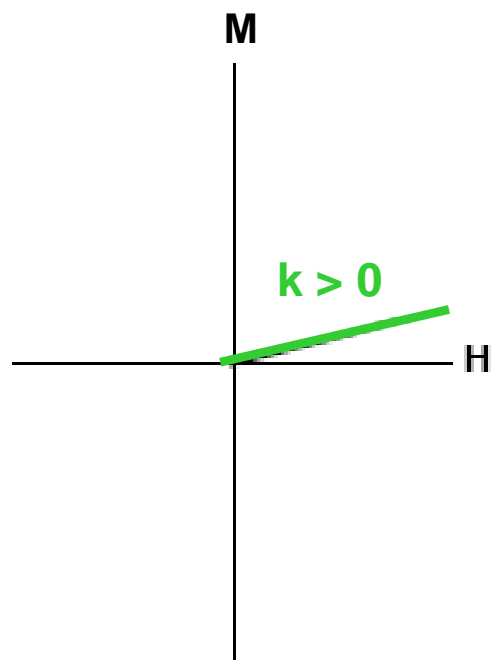
Magnetická susceptibilita

1. Základní principy magnetismu a magnetická susceptibilita

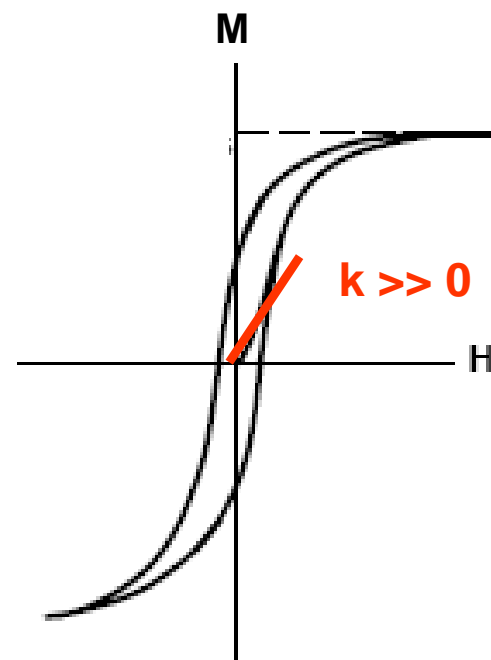
Diamagnetismus



Paramagnetismus



Feromagnetismus



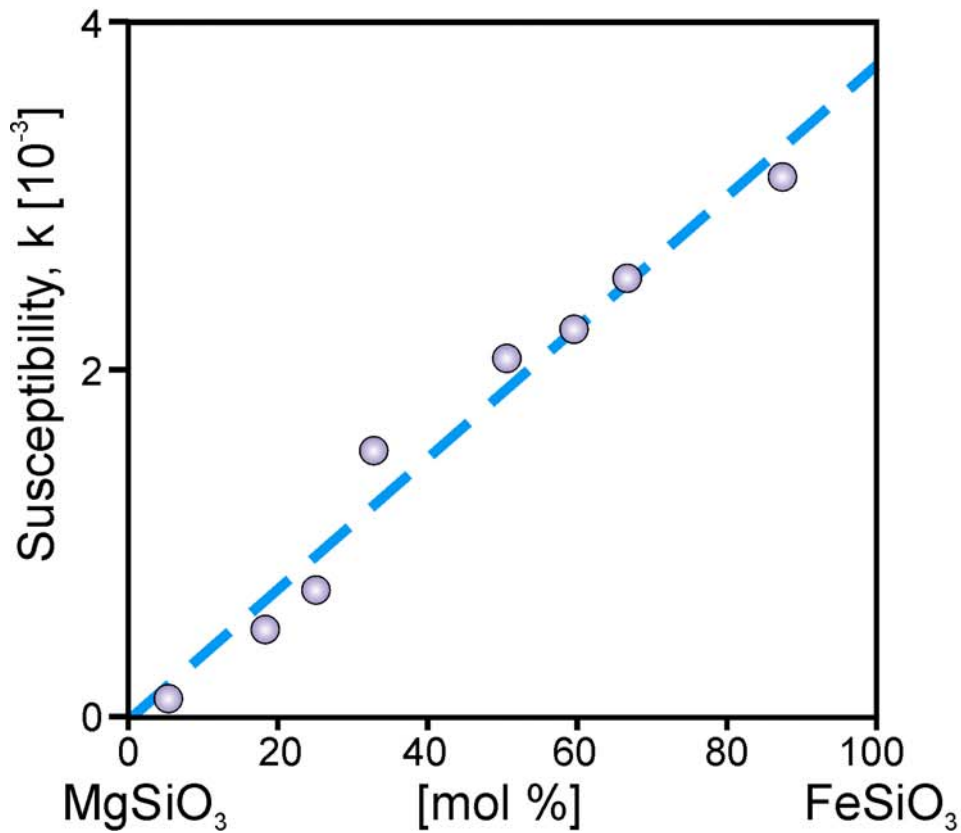
Indukovaná magnetizace působí proti směru vnějšího pole	Indukovaná magnetizace ve směru vnějšího pole	Složitější závislost mezi vnějším polem a indukovanou magnetizací
Magnetická susceptibilita je relativně malá, záporná	Magnetická susceptibilita je relativně malá, kladná	Magnetická susceptibilita je relativně vysoká
Bez vnějšího pole je indukovaná magnetizace rovna nule	Bez vnějšího pole je indukovaná magnetizace rovna nule	Bez vnějšího pole zůstává remanentní (zbytková) magnetizace
<i>křemen</i> <i>kalцит</i>	<i>pyroxeny</i> <i>amfiboly</i> <i>olivín</i> <i>slídy</i>	<i>železo</i> <i>magnetit</i> <i>hematit</i> <i>pyrhotin</i>

Magnetické vlastnosti některých vybraných minerálů

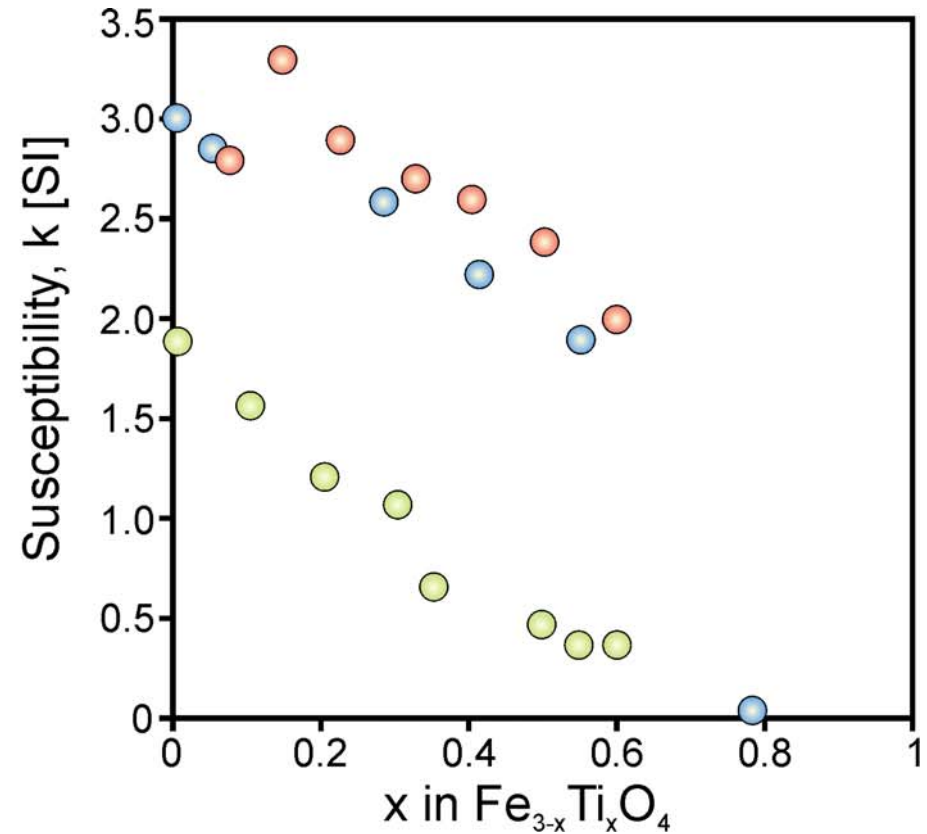
Mineral	Susceptibility [10^{-6}]	Degree of anisotropy	Shape of anisotropy	Anisotropy type
<i>Magnetite</i>	3000000	1.1 to 3.0	Variable	Shape
<i>Hematite</i>	1300 to 7000	>100	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Pyrrhotite</i>		100 to 10000	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Actinolite</i>	490	1.2 to 1.2	-0.40 to 0.40	Magnetocrystalline
<i>Hornblende</i>	746 to 1368	1.665	-0.51	Magnetocrystalline
<i>Glaucophane</i>	787	1.205	0.10	Magnetocrystalline
<i>Chlorite</i>	70 to 1550	1.2 to 1.7	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Biotite</i>	998 to 1290	1.2 to 1.6	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Phlogopite</i>	1178	1.3	0.95	Magnetocrystalline
<i>Muscovite</i>	122 to 165	1.4	0.44	Magnetocrystalline
<i>Quartz</i>	-13.4 to -15.4	1.01	1.00	Magnetocrystalline
<i>Calcite</i>	-13.8	1.11	1.00	Magnetocrystalline
<i>Aragonite</i>	-15.0	1.15	0.80	Magnetocrystalline

1. Základní principy magnetismu a magnetická susceptibilita

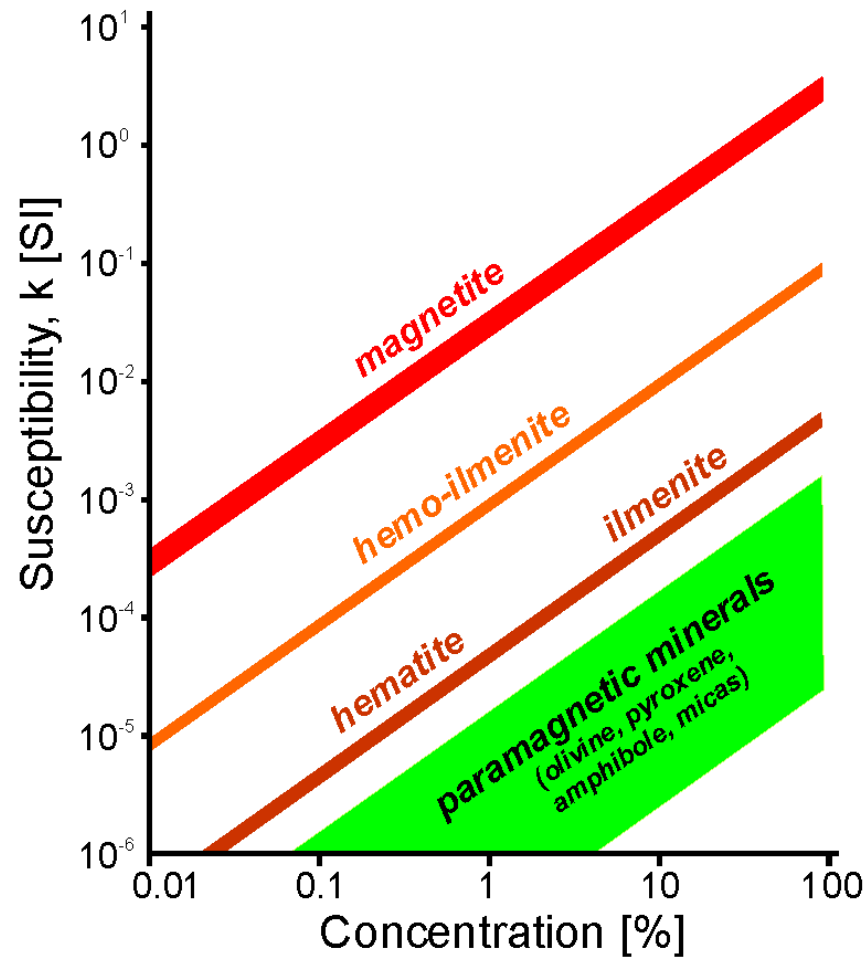
Variace magnetická susceptibilita v závislosti na chemickém složení ortopyroxenu



Variace magnetická susceptibilita v závislosti na chemickém složení titanomagnetitu



Příspěvky minerálů k celkové susceptibilitě horniny



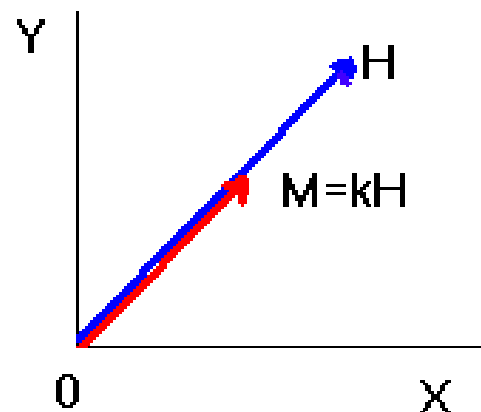
Anizotropie magnetické susceptibility (AMS)

Magnetizace izotropních látek

$$M_1 = k H_1$$

$$M_2 = k H_2$$

$$M_3 = k H_3$$

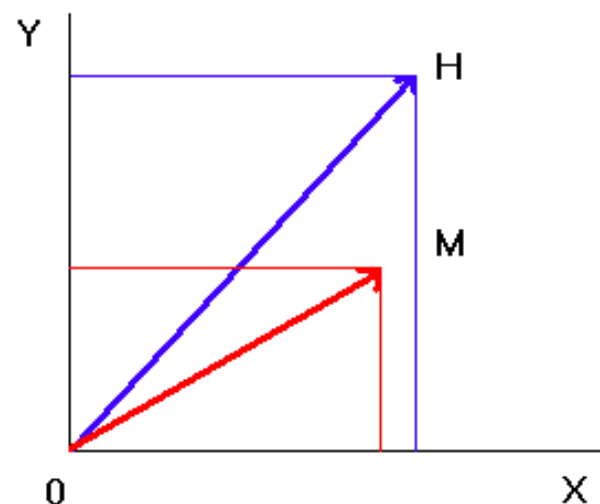


Magnetizace anizotropních, lineárně magnetických látek

$$M_1 = k_{11} H_1 + k_{12} H_2 + k_{13} H_3$$

$$M_2 = k_{21} H_1 + k_{22} H_2 + k_{23} H_3$$

$$M_3 = k_{31} H_1 + k_{32} H_2 + k_{33} H_3$$



Maticový zápis

Vektor intenzity pole

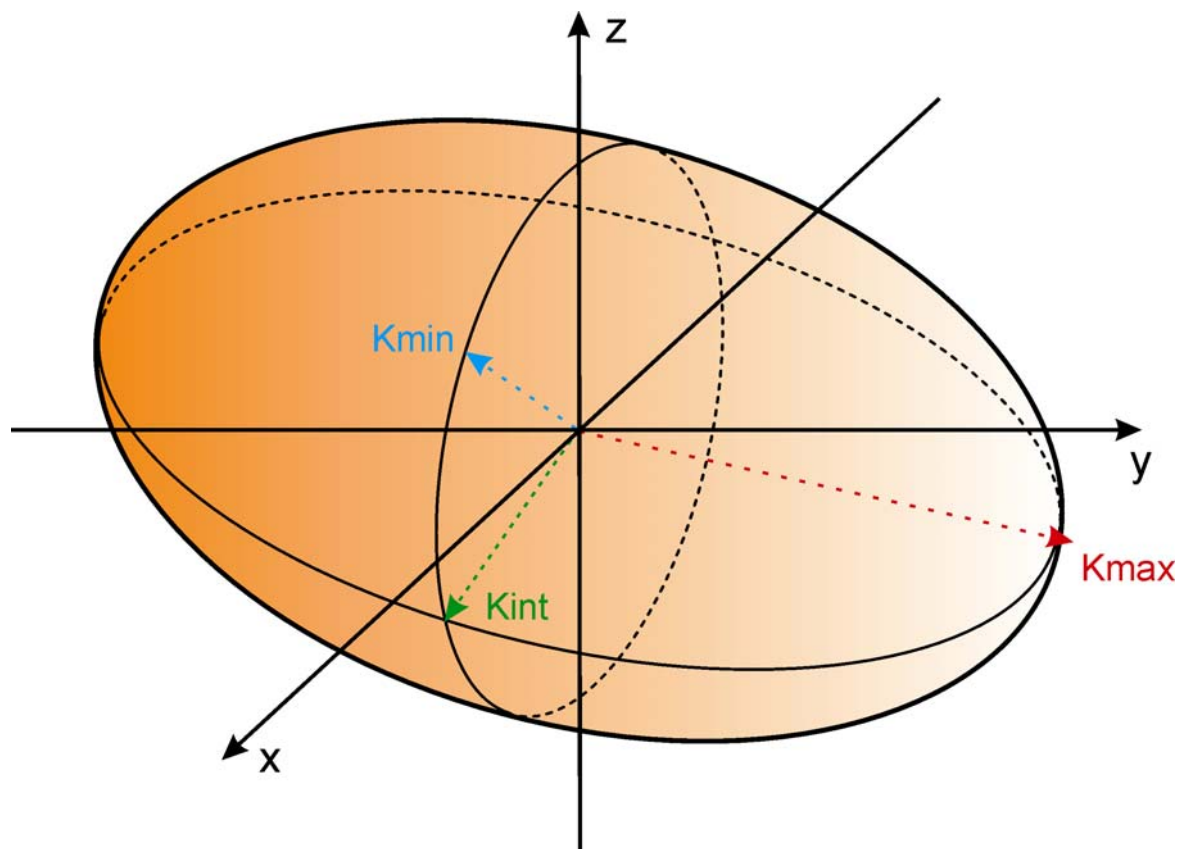
$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{pmatrix}$$

Vektor magnetizace

Tenzor susceptibility

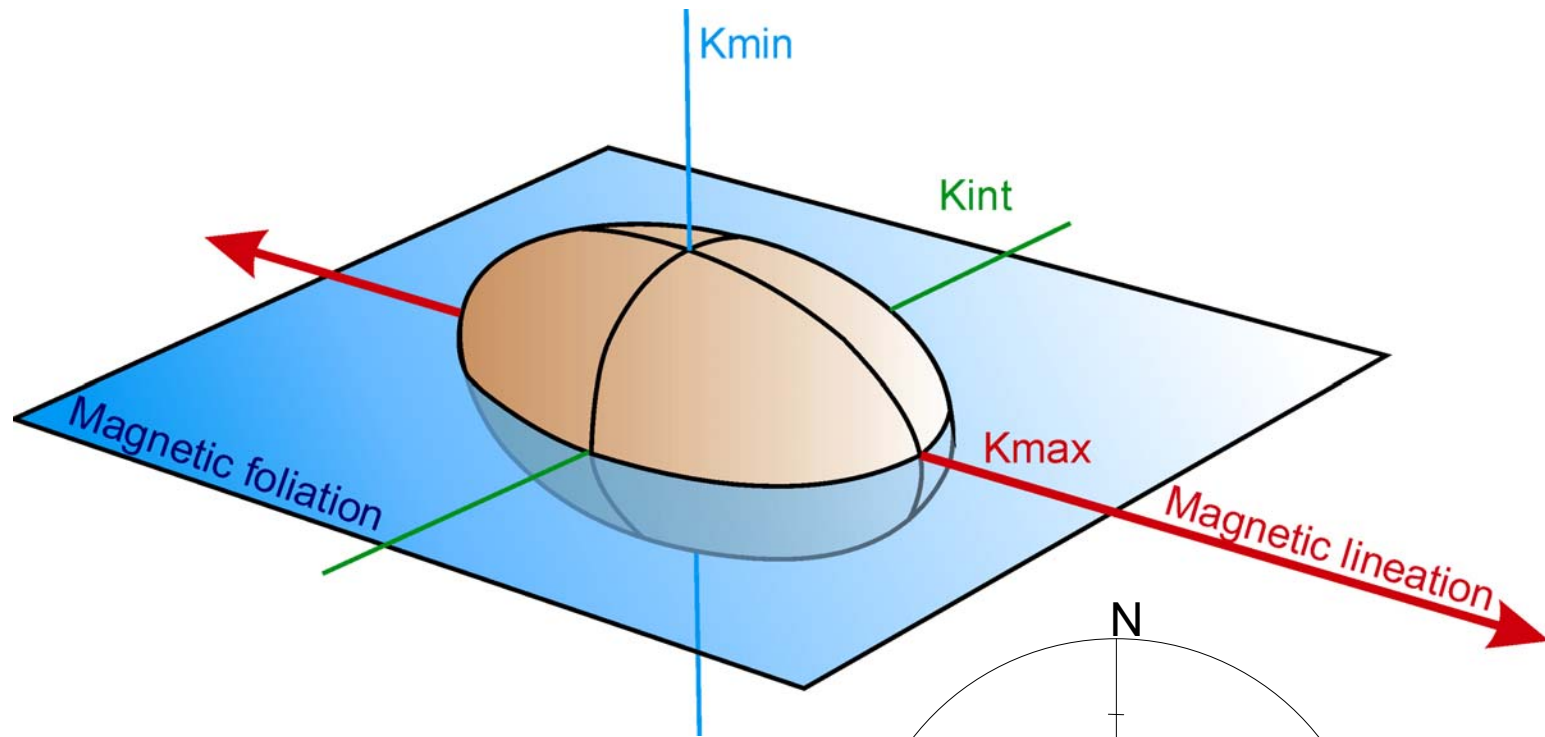
Elipsoid jako geometrická reprezentace tenzoru

$$\begin{array}{l} \left| \begin{array}{l} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{lll} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{array} \right| \end{array}$$



Magnetická stavba

➤ stavba definovaná na základě magnetické anizotropie



$$M_1 = k_{11} H_1$$

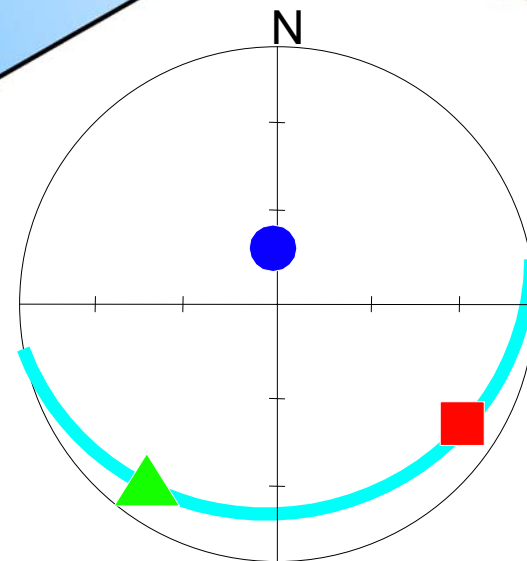
$$M_2 = k_{22} H_2$$

$$M_3 = k_{33} H_3$$

K_{max} ■

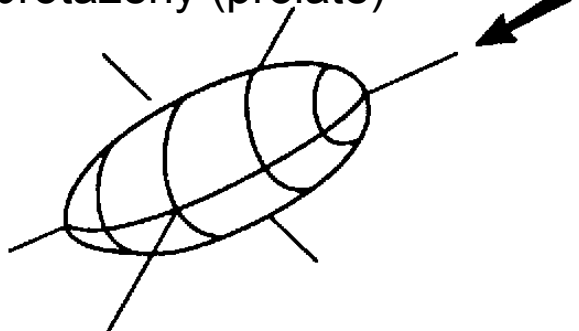
K_{int} ▲

K_{min} ●

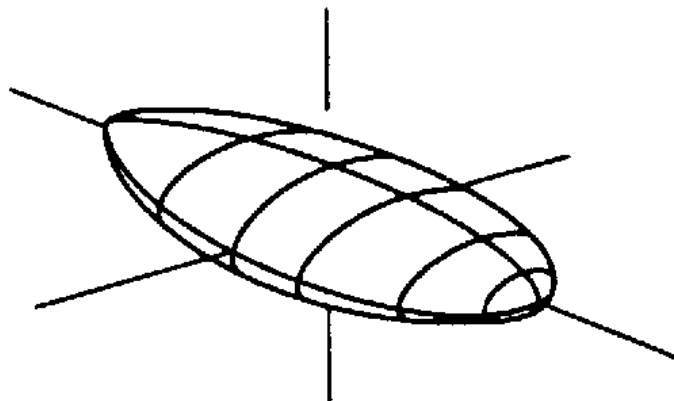


Tvary elipsoidů anizotropie

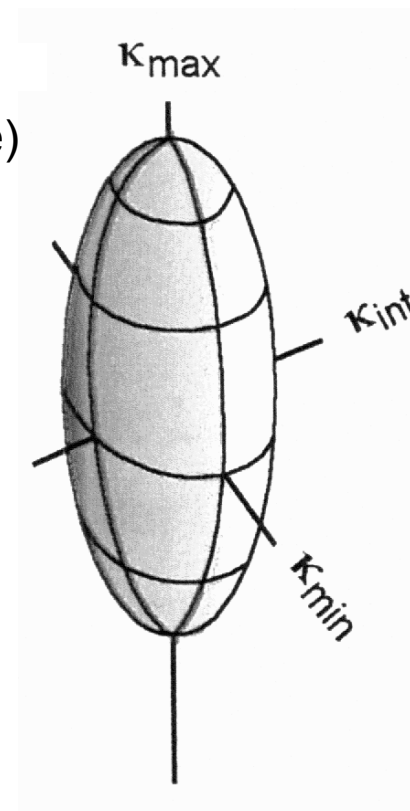
Rotační protažený (prolate)



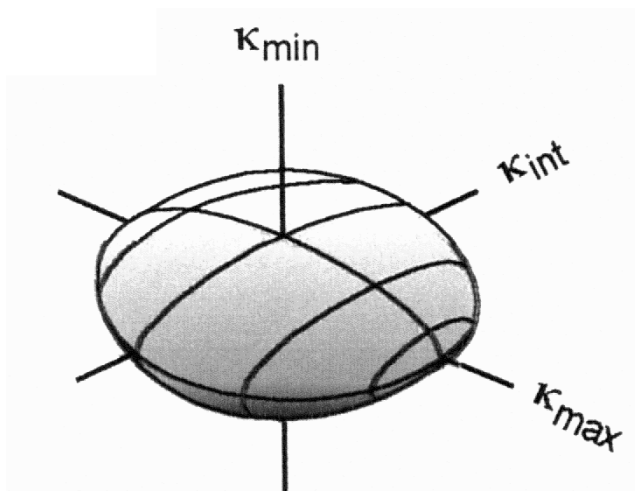
Trojosý protažený (prolate)



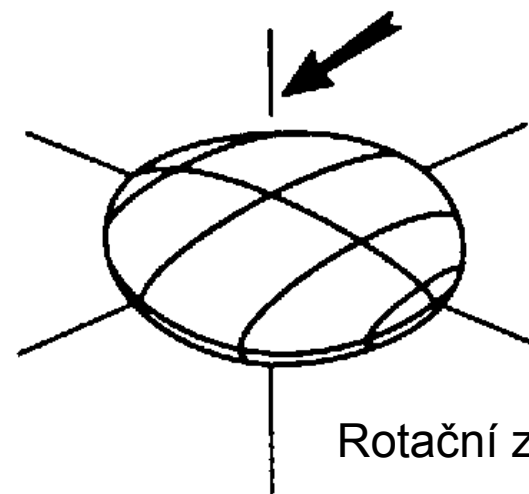
Neutrální



κ_{\min}



Trojosý zploštělý (oblate)



Rotační zploštělý (oblate)

Kvantitativní parametry elipsoidu anizotropie

$k_1 \geq k_2 \geq k_3$ ← hlavní susceptibility

$k_m = (k_1 + k_2 + k_3) / 3$ ← střední susceptibilita

$P = k_1 / k_3$ ← stupeň anizotropie

$L = k_1 / k_2$ ← magnetická lineace

$F = k_2 / k_3$ ← magnetická foliace

$T = (2n_2 - n_1 - n_3) / (n_1 - n_3)$ ← tvarový parameter

kde $n_1 = \ln k_1$, $n_2 = \ln k_2$, $n_3 = \ln k_3$

$+1 > T > 0$

planární magnetická stavba

$-1 < T < 0$

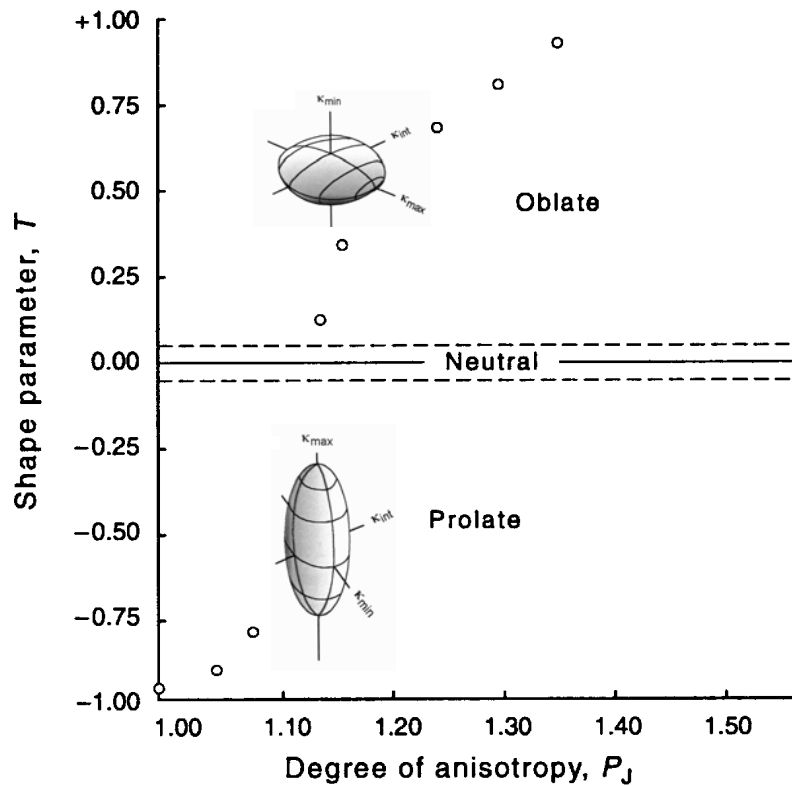
lineární magnetická stavba

$P_j = P^a$ ← korigovaný stupeň anizotropie

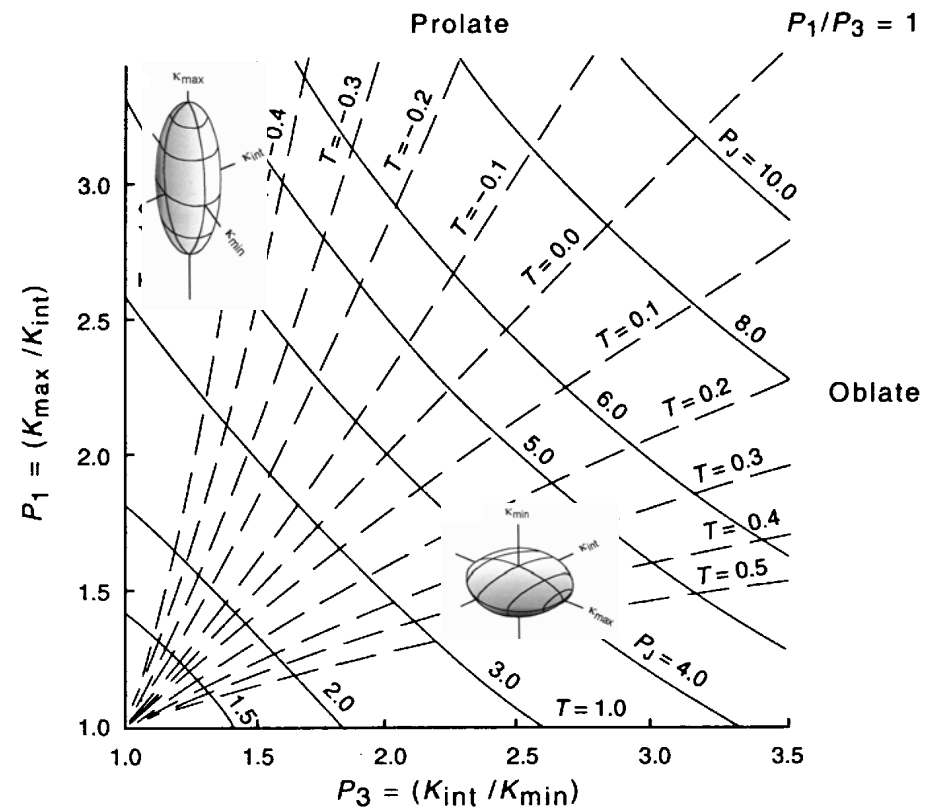
$a = \sqrt{(1 + T^2 / 3)}$

Diagramy tvaru a stupně anizotropie

P-T diagram
(Jelínek plot)

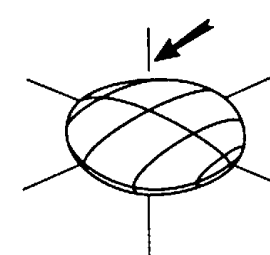
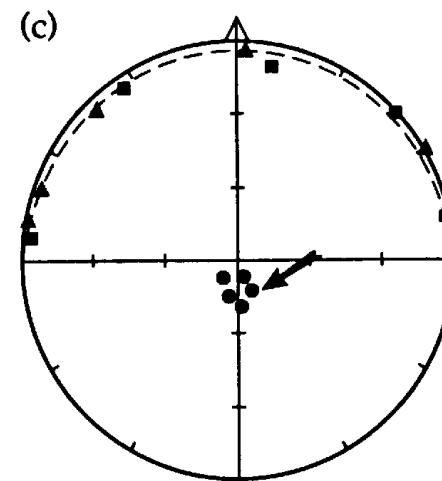
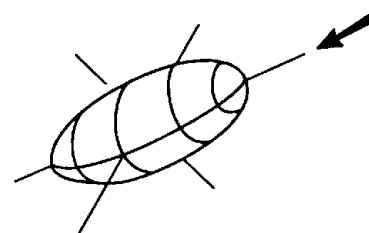
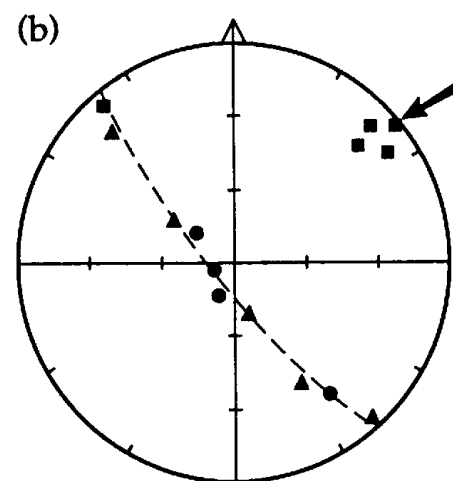
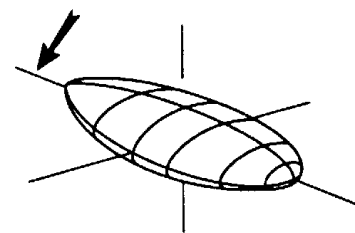
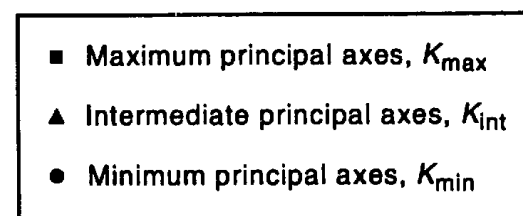
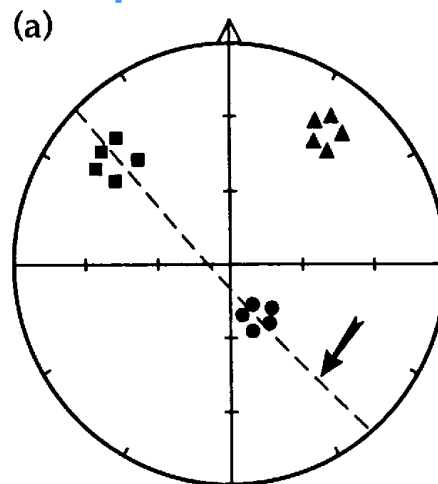
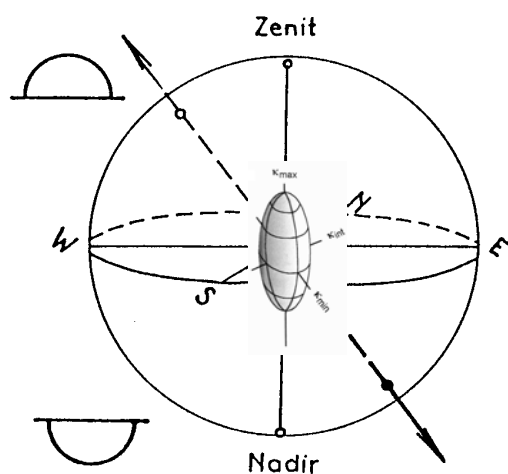


Flinnův diagram

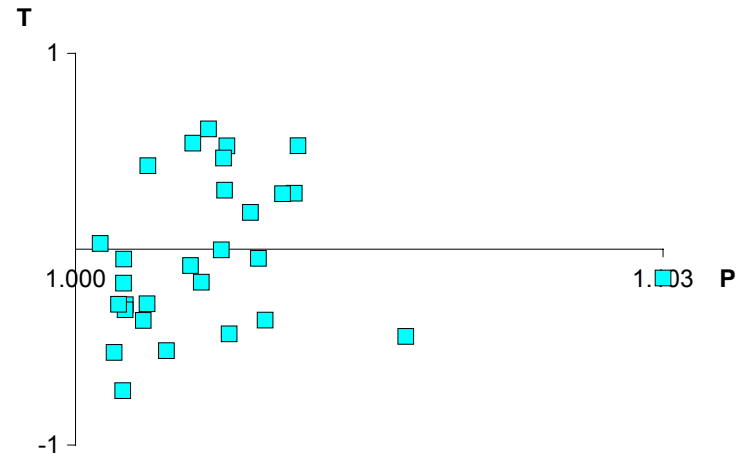
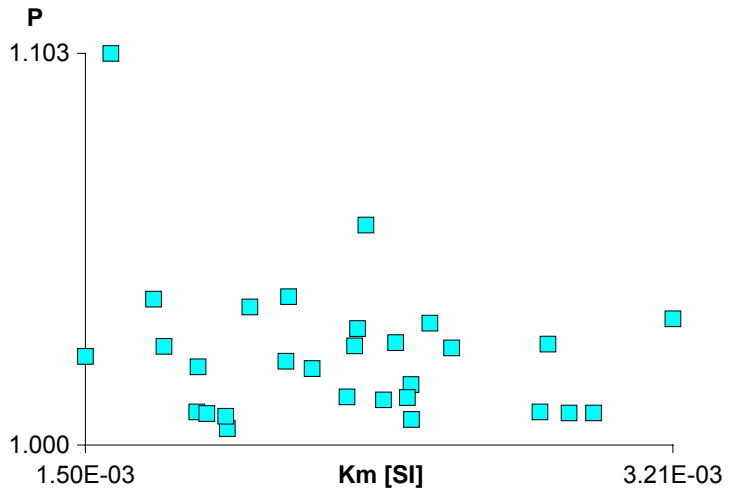
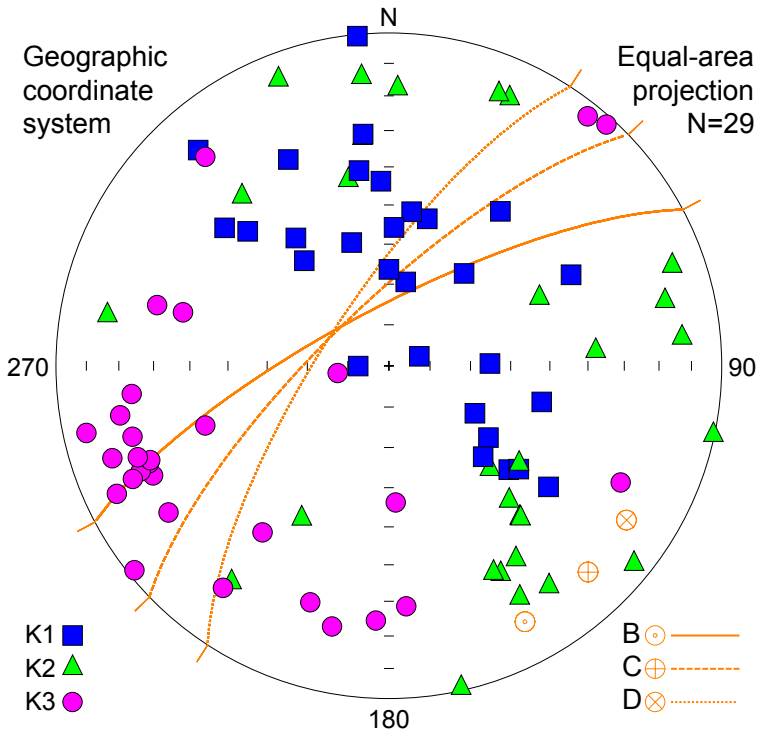


Orientace elipsoidu anizotropie

Lambertova
plochojevná projekce
na spodní polokouli



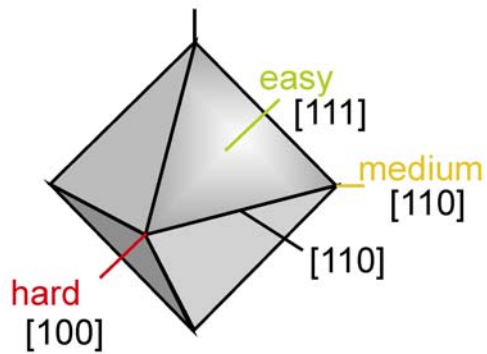
2. Anizotropie magnetické susceptibilitě



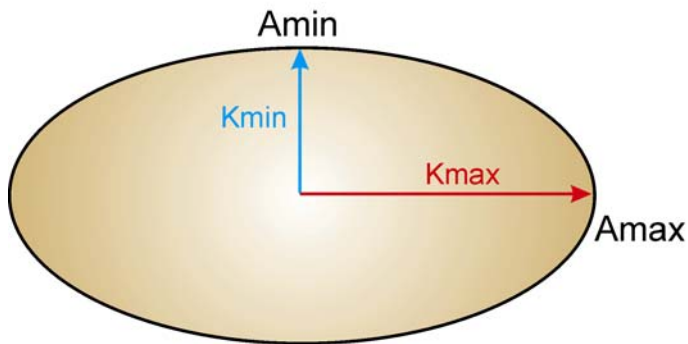
Tvarová anizotropie

Magnetit

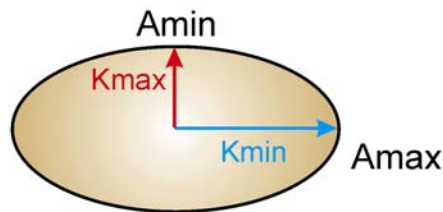
Magnetite crystal



Multi-domain magnetite



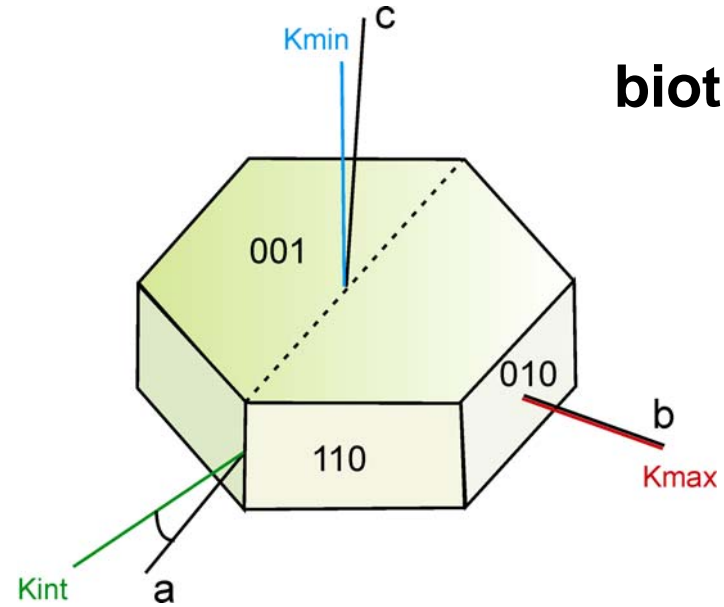
Single-domain magnetite



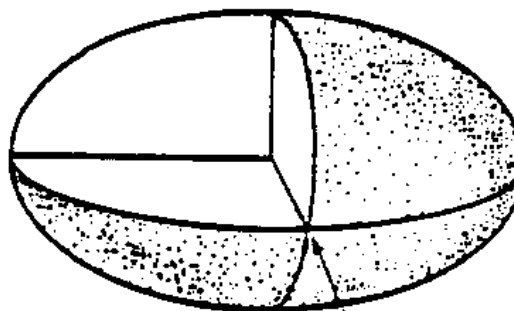
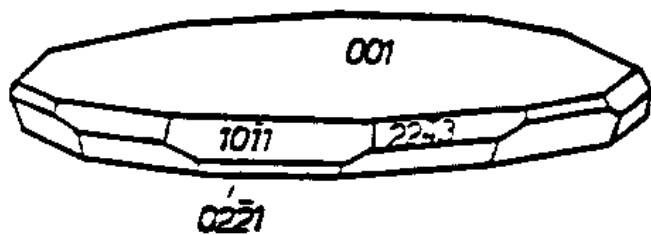
Krystalografická anizotropie

ostatní minerály

biotit

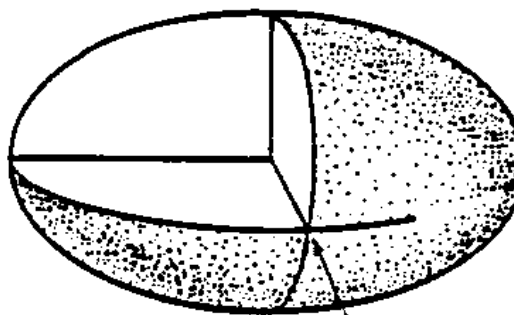
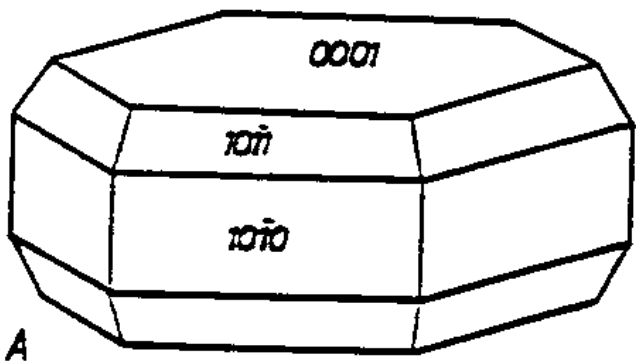


Krystalografická anizotropie



Hematit

$$k_1 = k_2 \gg k_3$$
$$P > 100$$

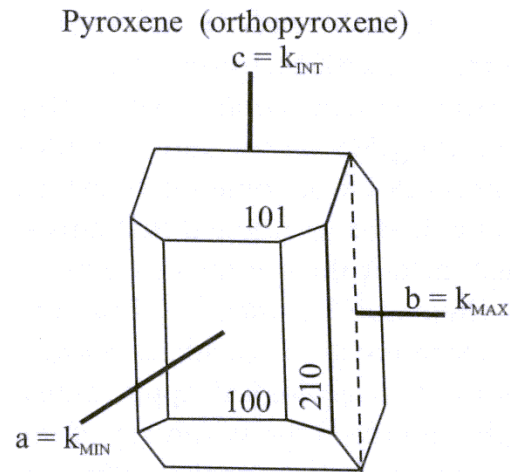


Pyrrhotin

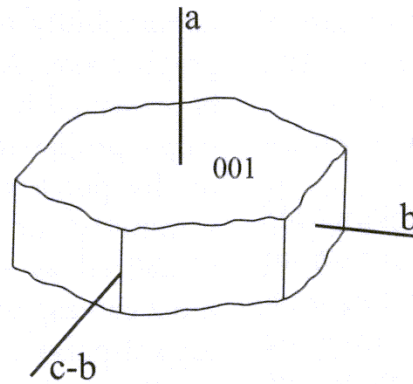
$$k_1 = k_2 \gg k_3$$
$$P > 300$$

Krystalografická anizotropie

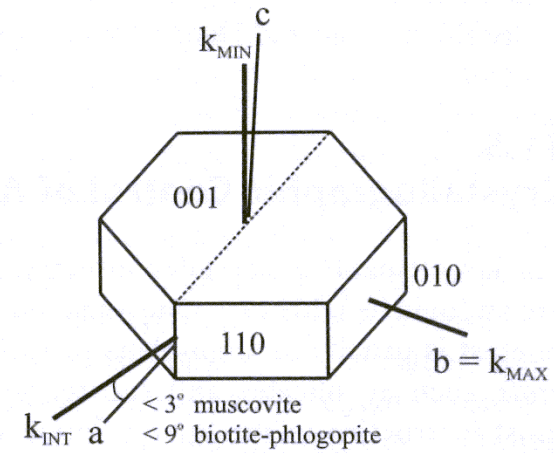
Paramagnetické minerály



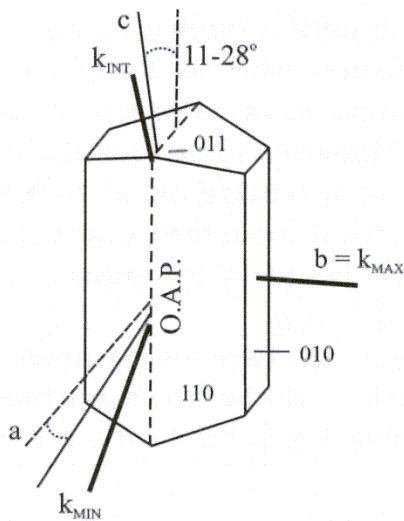
Serpentine (trigonal, monoclinic or orthorhombic)



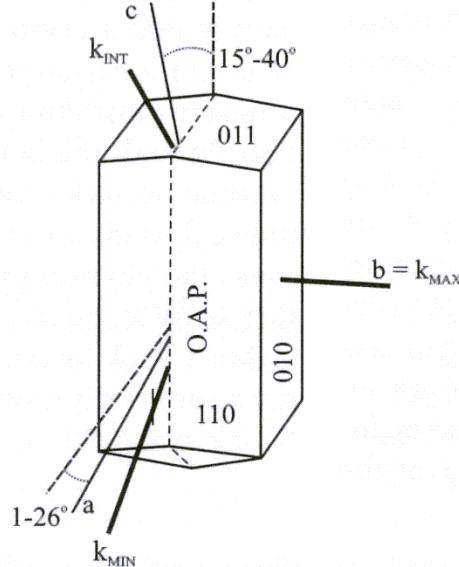
Mica (monoclinic)



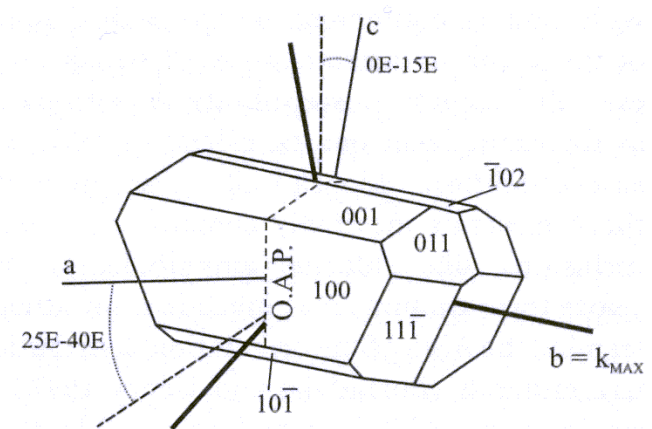
Tremolite (monoclinic)



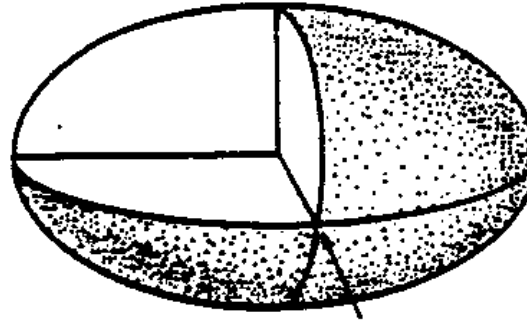
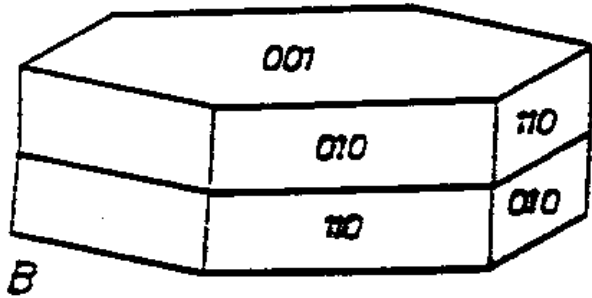
Richterite (monoclinic)



Epidote (monoclinic)

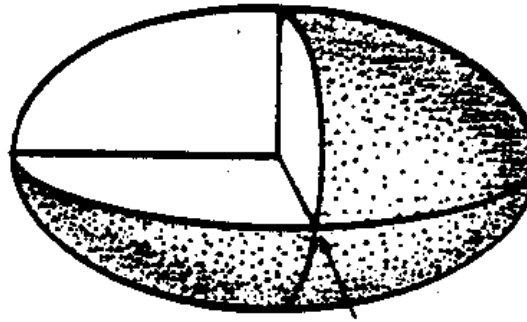
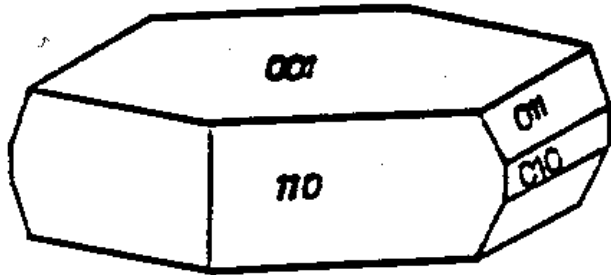


Krystalografická anizotropie



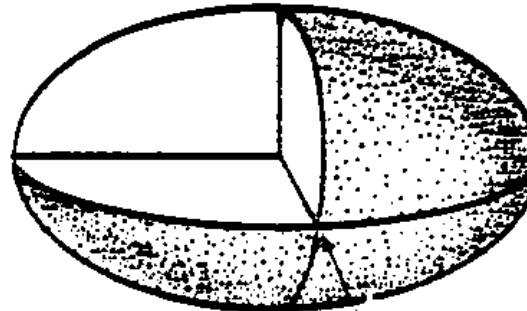
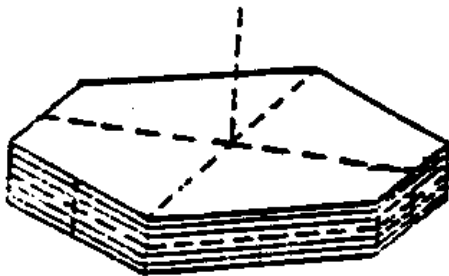
Biotit

$$k_1 = k_2 > k_3$$
$$P = 1.2-1.6$$



Muskovit

$$k_1 = k_2 > k_3$$
$$P = 1.3-1.4$$



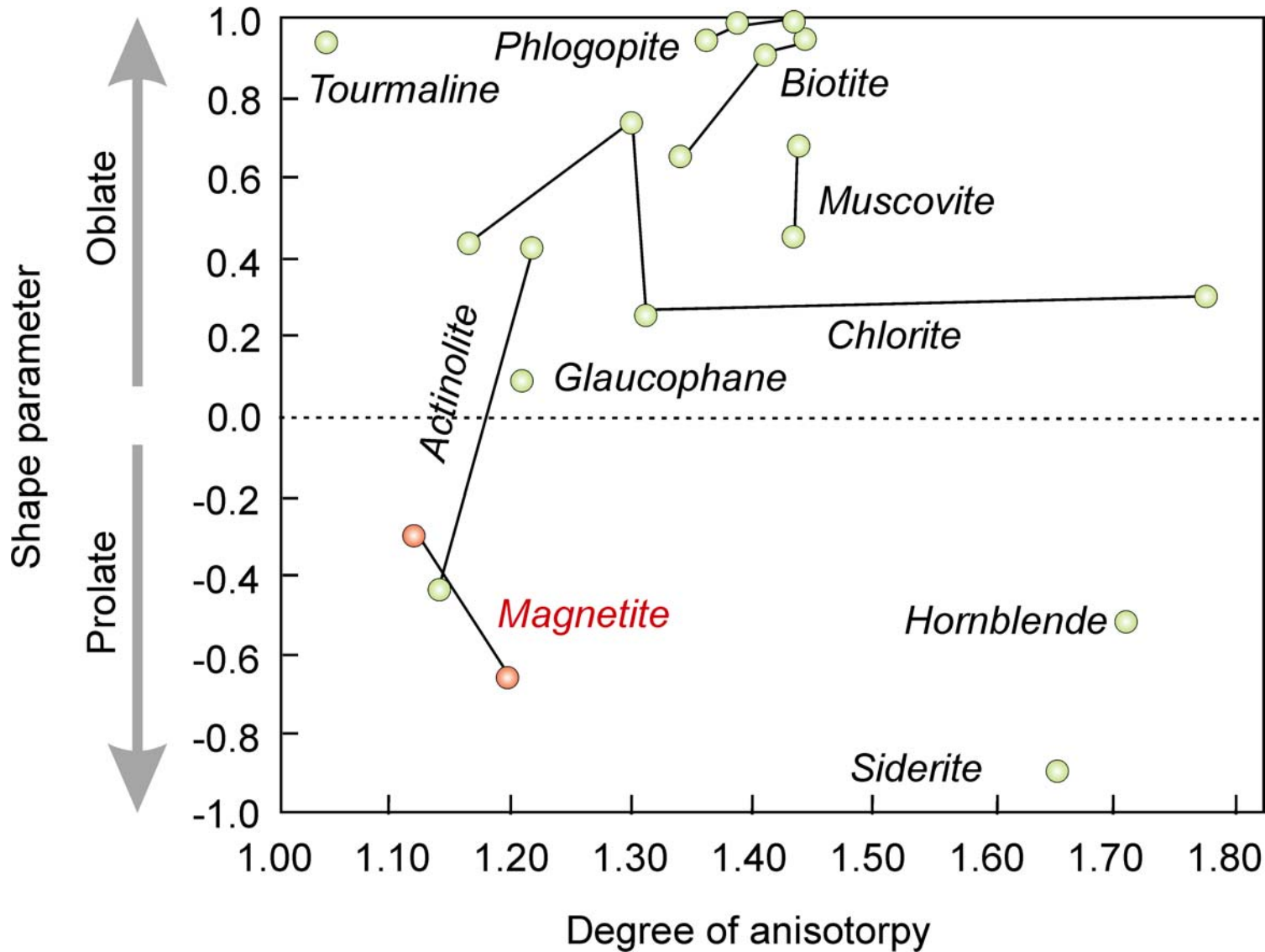
Chlorit

$$k_1 = k_2 > k_3$$
$$P = 1.2-1.8$$

Magnetické vlastnosti některých vybraných minerálů

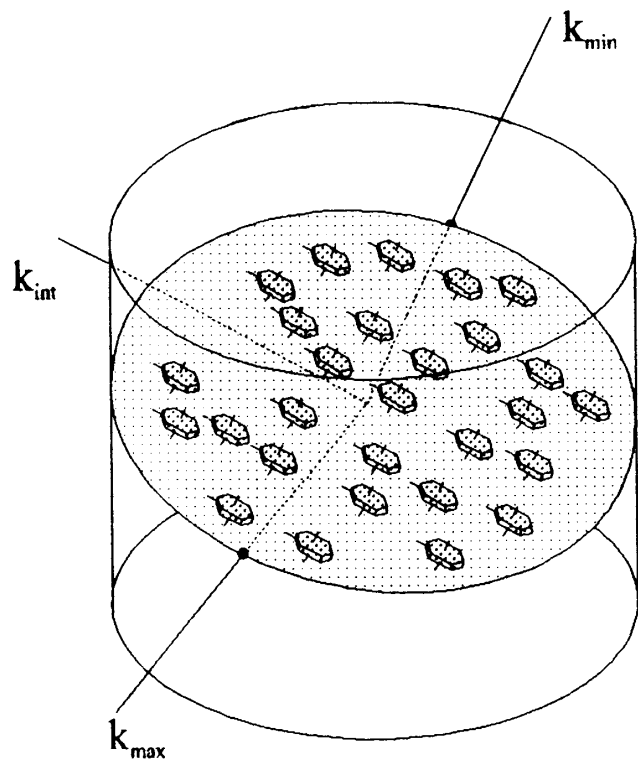
Mineral	Susceptibility [10^{-6}]	Degree of anisotropy	Shape of anisotropy	Anisotropy type
<i>Magnetite</i>	3000000	1.1 to 3.0	Variable	Shape
<i>Hematite</i>	1300 to 7000	>100	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Pyrrhotite</i>		100 to 10000	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Actinolite</i>	490	1.2 to 1.2	-0.40 to 0.40	Magnetocrystalline
<i>Hornblende</i>	746 to 1368	1.665	-0.51	Magnetocrystalline
<i>Glaucophane</i>	787	1.205	0.10	Magnetocrystalline
<i>Chlorite</i>	70 to 1550	1.2 to 1.7	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Biotite</i>	998 to 1290	1.2 to 1.6	~1.00	Magnetocrystalline
<i>Phlogopite</i>	1178	1.3	0.95	Magnetocrystalline
<i>Muscovite</i>	122 to 165	1.4	0.44	Magnetocrystalline
<i>Quartz</i>	-13.4 to -15.4	1.01	1.00	Magnetocrystalline
<i>Calcite</i>	-13.8	1.11	1.00	Magnetocrystalline
<i>Aragonite</i>	-15.0	1.15	0.80	Magnetocrystalline

Stupeň anizotropie a tvar elipsoidu



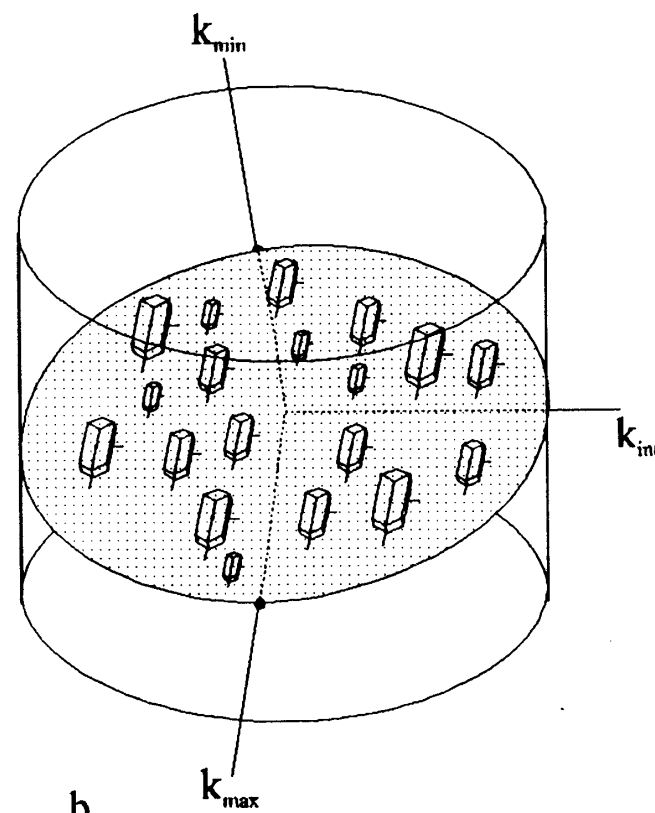
4. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

Přednostní uspořádání magnetických minerálů ve vzorku horniny



a.

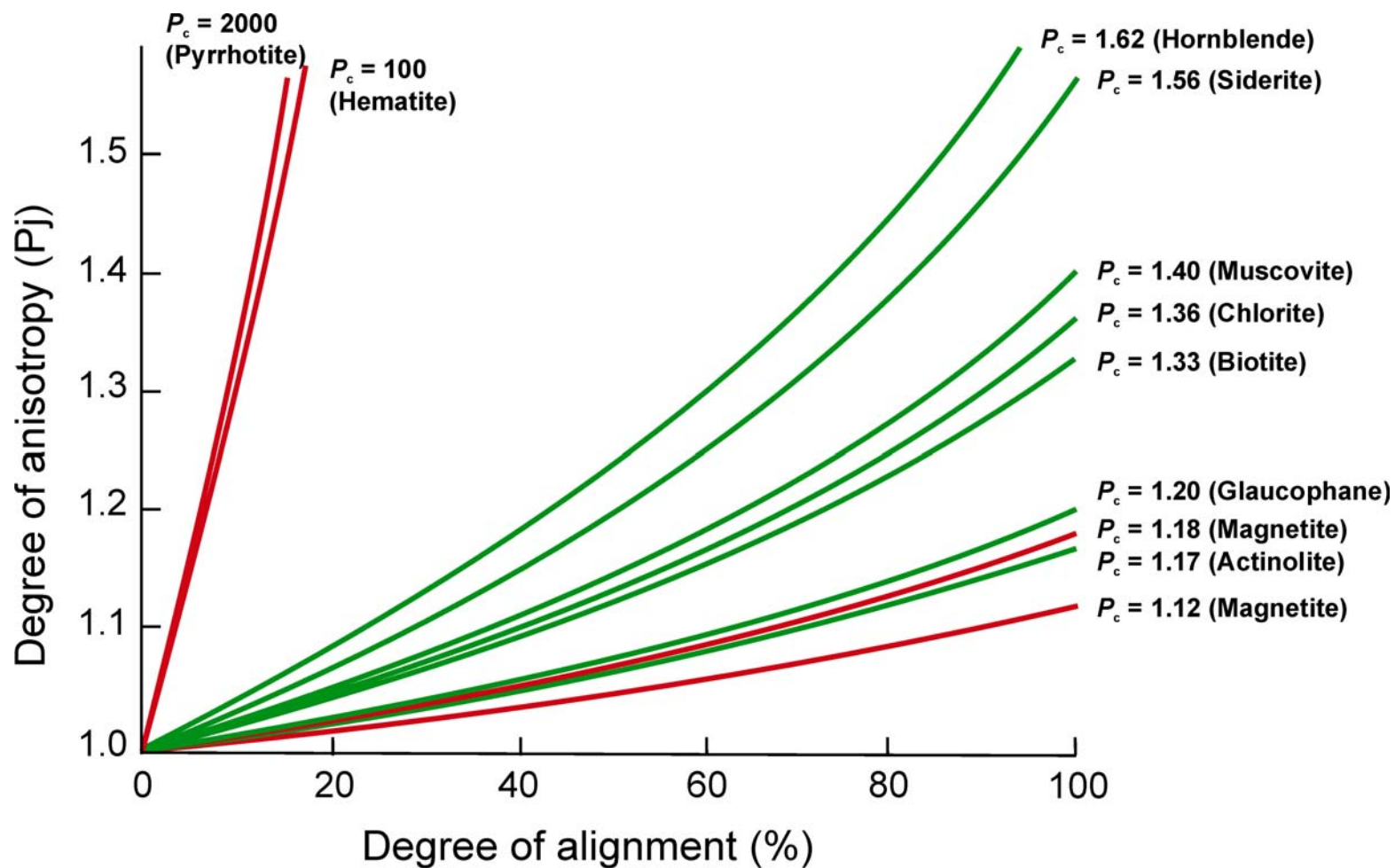
BIOTIT



b.

AMFIBOL

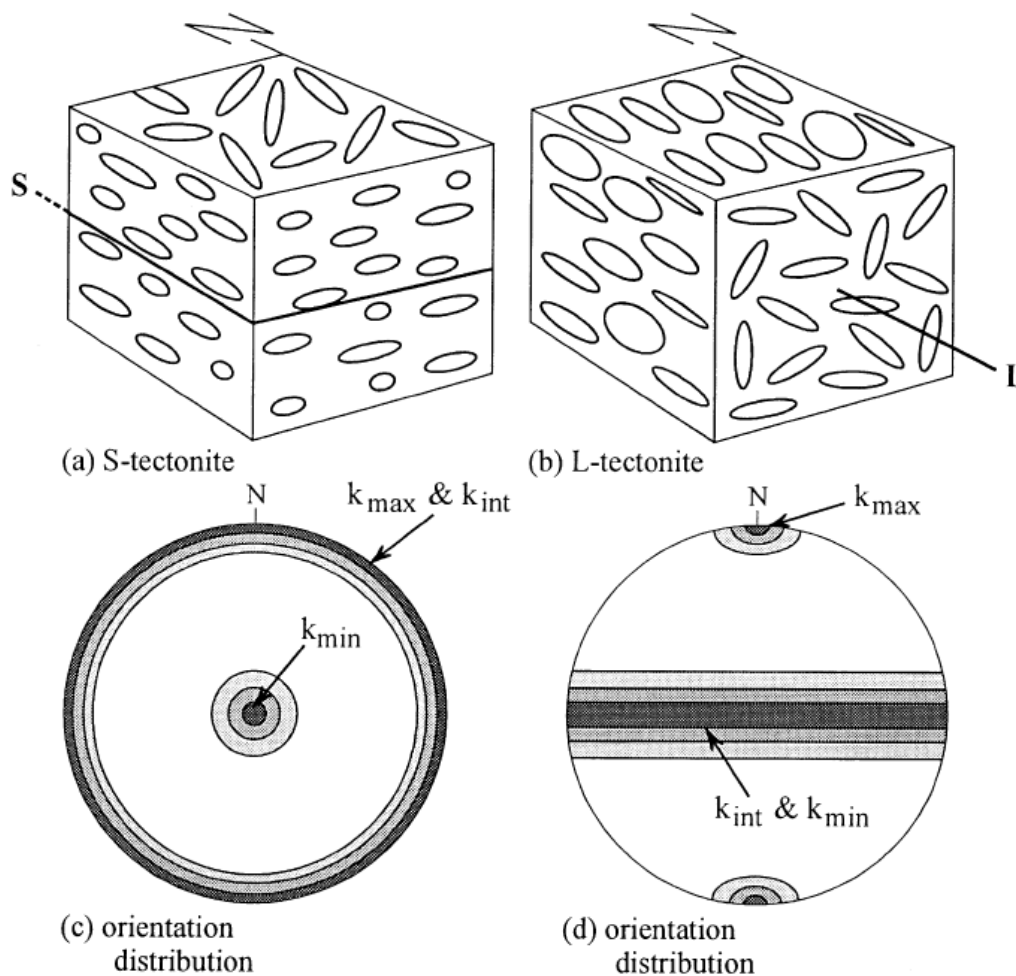
Závislost stupně anizotropie na přednostním uspořádání minerálů



Elipsoid anizotropie susceptibilitivity ve vztahu ke strukturním prvkům v hornině

FOLIOVANÉ HORNINY

HORNINY S LINEÁRNÍ STAVBOU



Orientační tenzor (matice)

Orientační tenzor charakterizující přednostní orientaci

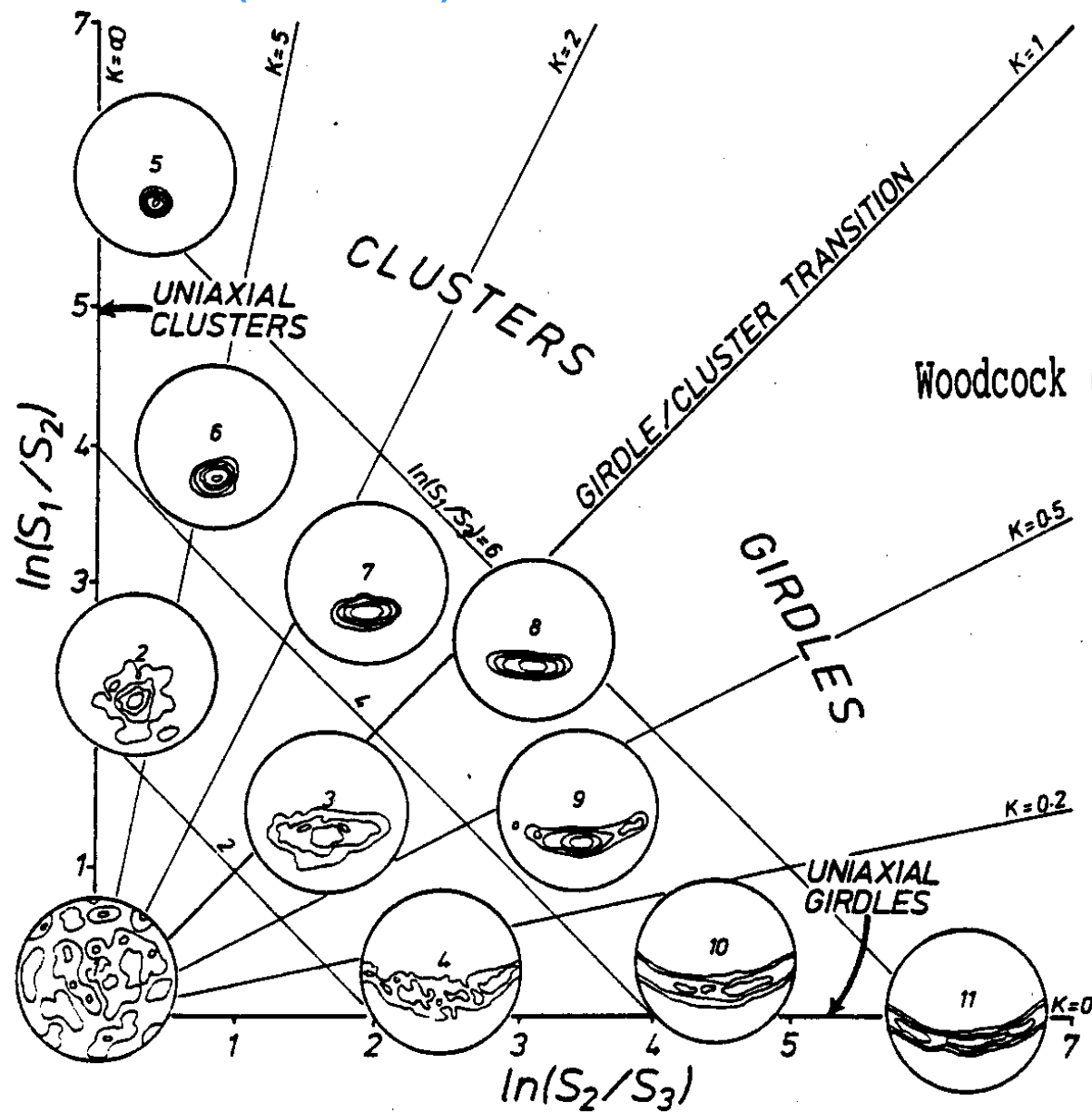
$$\mathbf{E} = (1/n) \begin{vmatrix} \sum l_i^2 & \sum l_i m_i & \sum l_i n_i \\ \sum l_i m_i & \sum m_i^2 & \sum m_i n_i \\ \sum l_i n_i & \sum m_i n_i & \sum n_i^2 \end{vmatrix}$$

l_i, m_i, n_i směrové kosíny

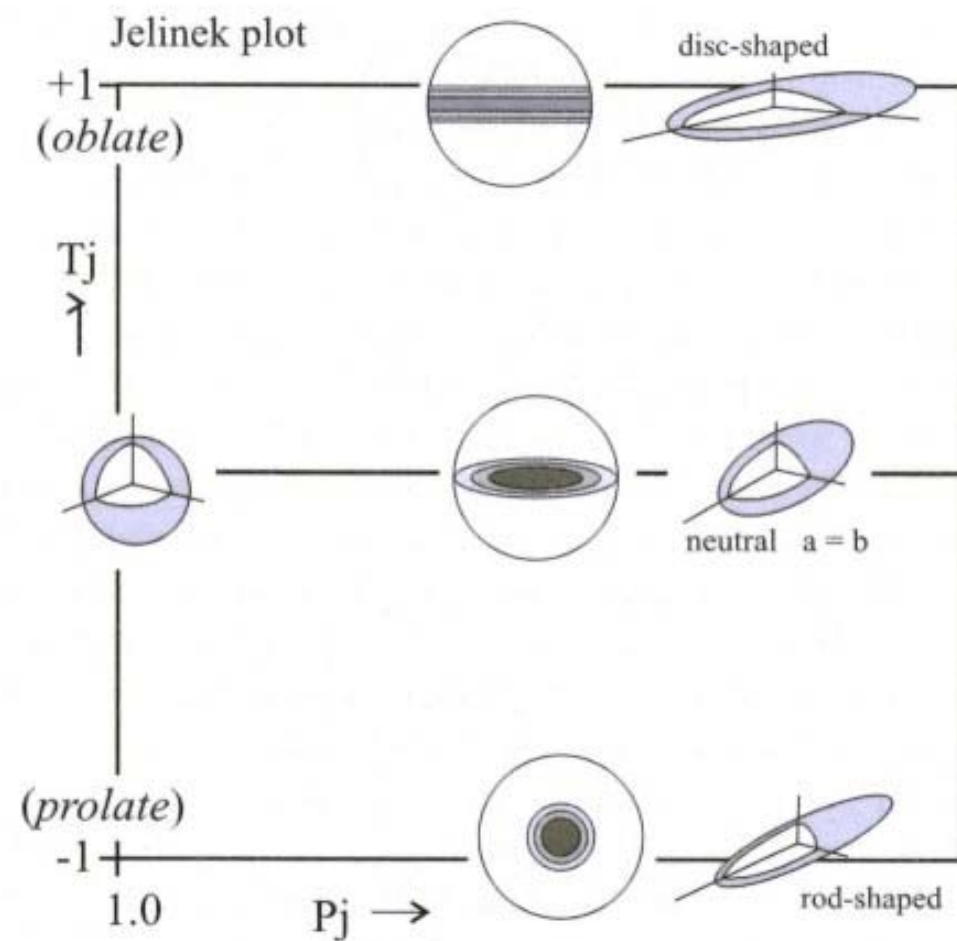
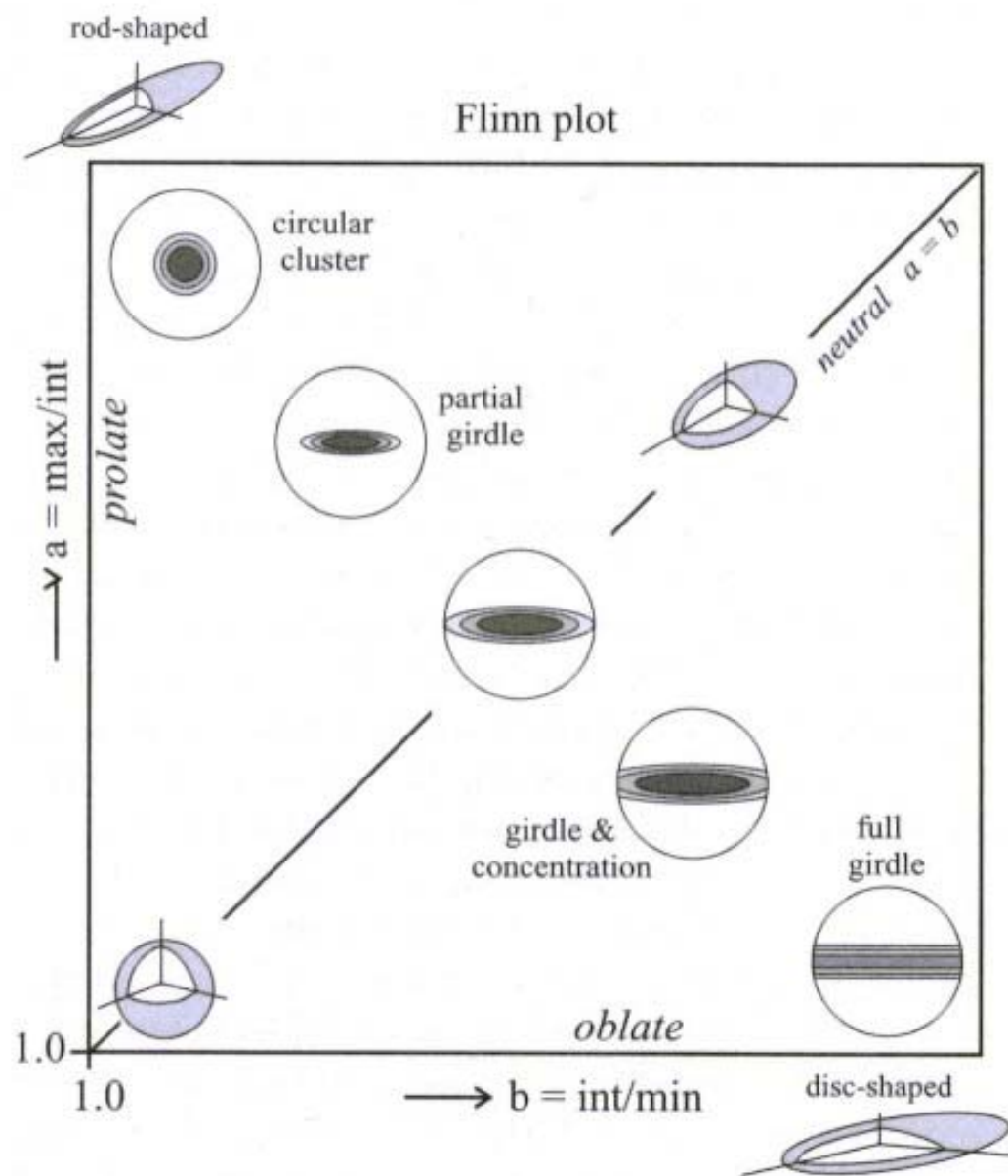
$E_1 \geq E_2 \geq E_3$ hlavní směry

- $E_1 > E_2 = E_3$ shluk (*cluster*)
- $E_1 = E_2 \geq E_3$ pás (*girdle*)

Orientační tenzor (matice)



Orientační tenzor (matice)



Elipsoid anizotropie z orientačního tenzoru (a opačně)

$$L = (AE_3 + B) / (AE_2 + B)$$

$$F = (AE_3 + B) / (AE_3 + B)$$

$$P = (AE_3 + B) / (AE_1 + B)$$

$$A = 3(1 - P_c) / (2P_c + 1)$$

$$B = 3P_c / (2P_c + 1)$$

$$L = (AE_1 + B) / (AE_2 + B)$$

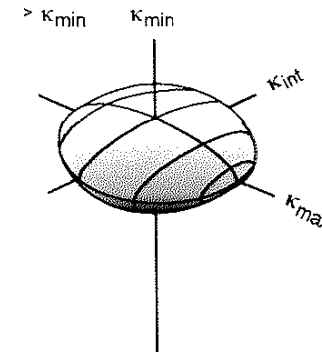
$$F = (AE_2 + B) / (AE_3 + B)$$

$$P = (AE_1 + B) / (AE_3 + B)$$

$$A = 3(P_c - 1) / (P_c + 2)$$

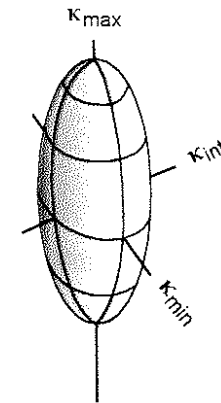
$$B = 3 / (P_c + 2)$$

magneticky zploštěná zrna



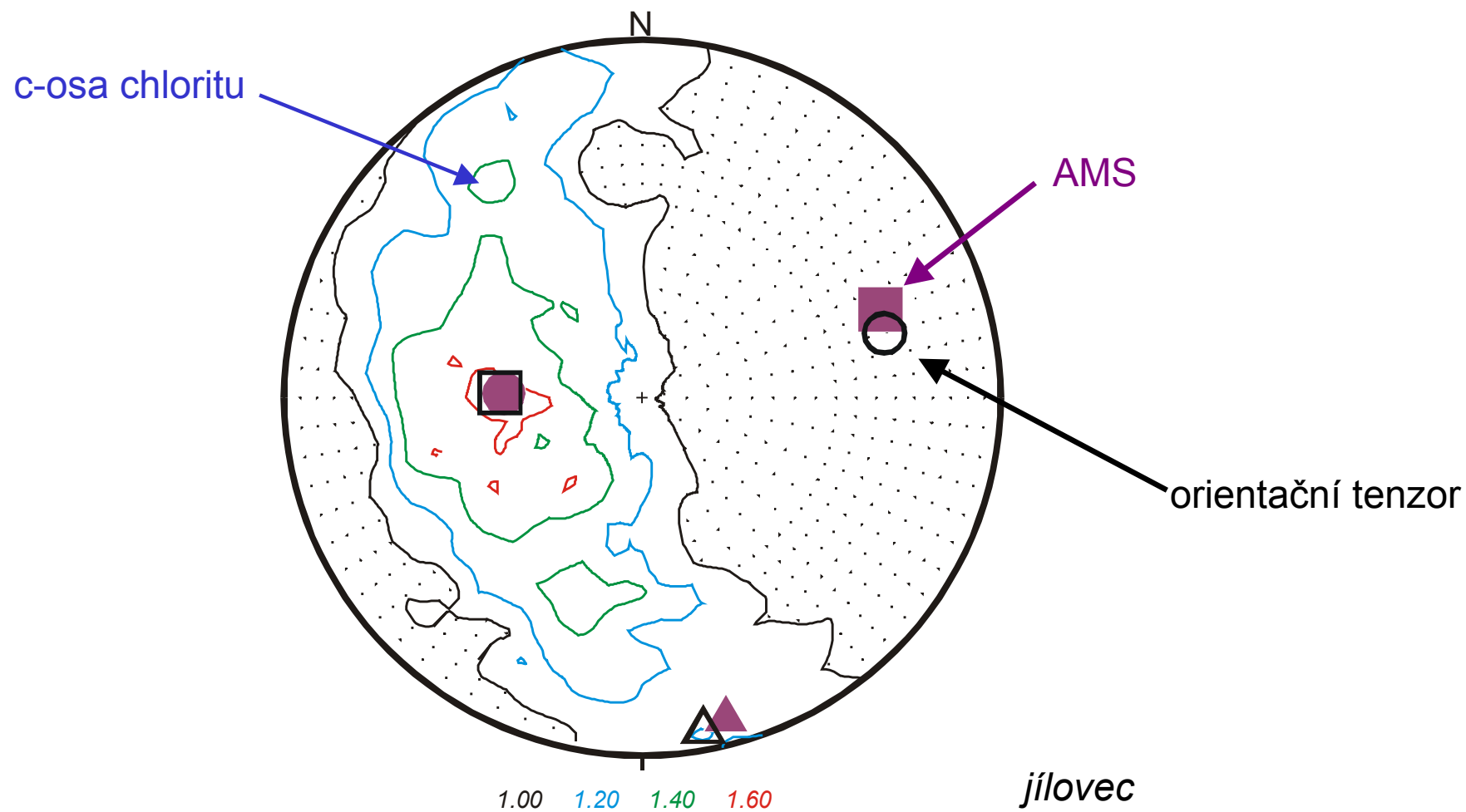
$$P_c = k_1 / k_3$$

magneticky protáhlá zrna

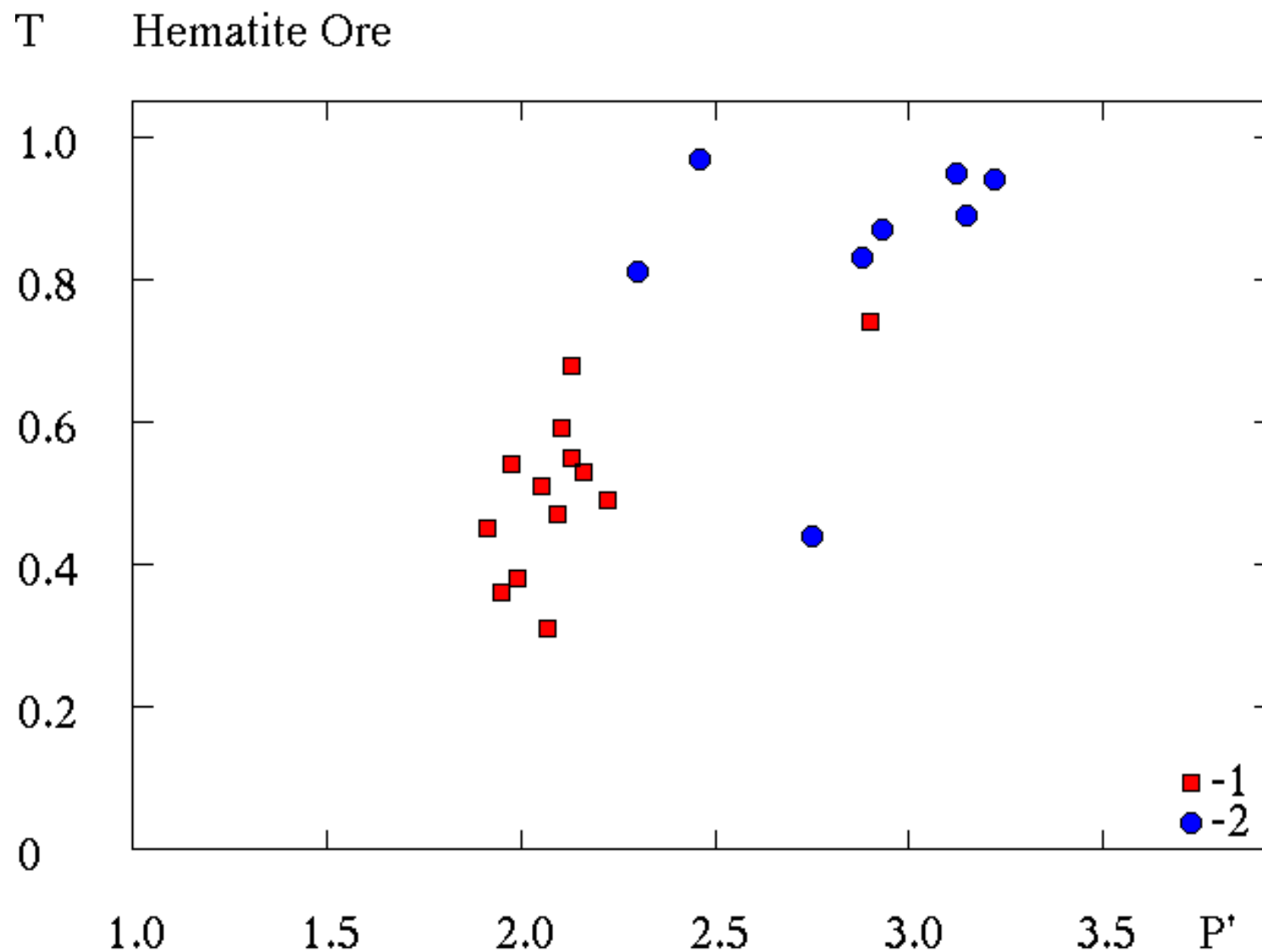


$$P_c = k_1 / k_3$$

Porovnání AMS a neutronové texturní goniometrie

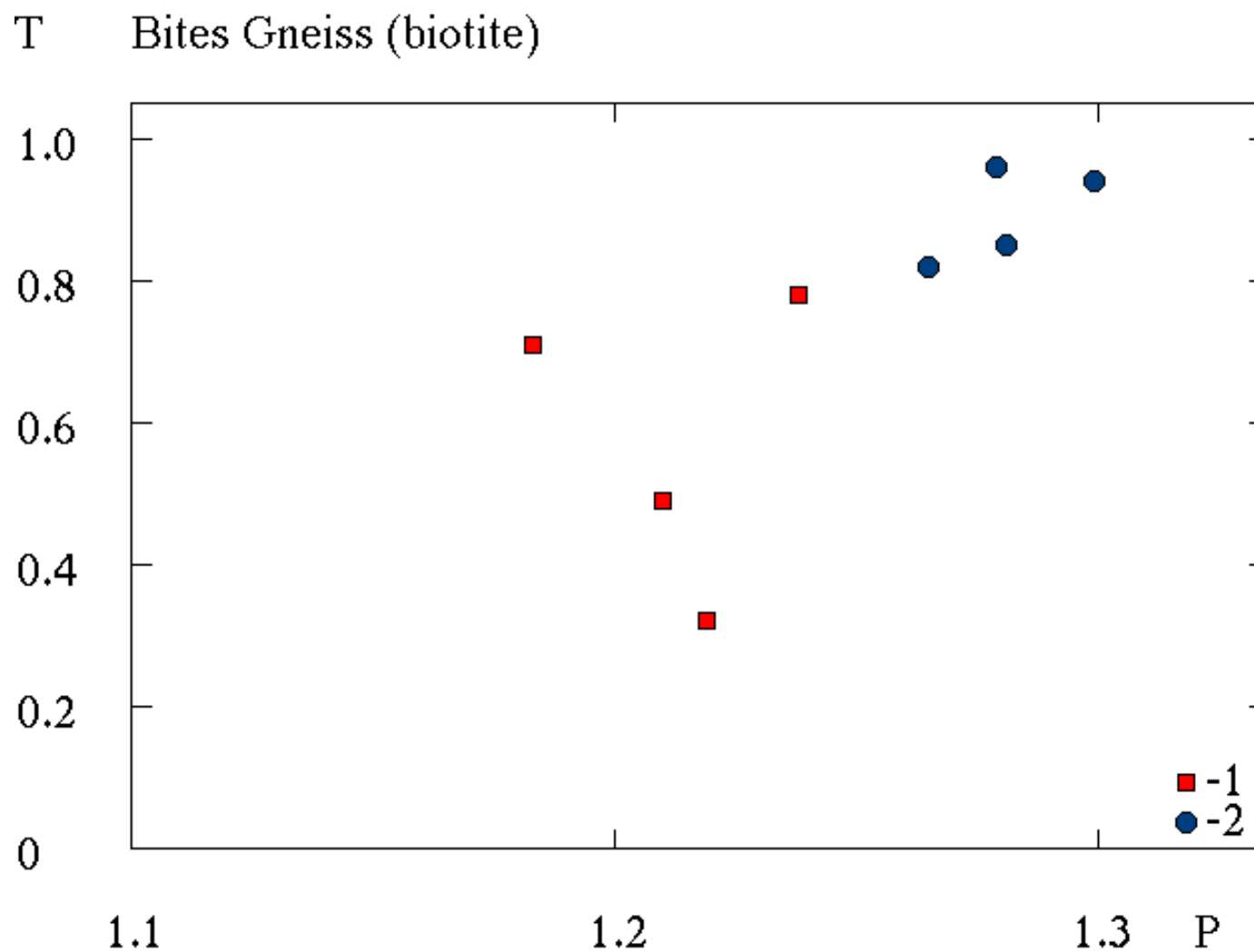


Anizotropie vypočtená a měřená



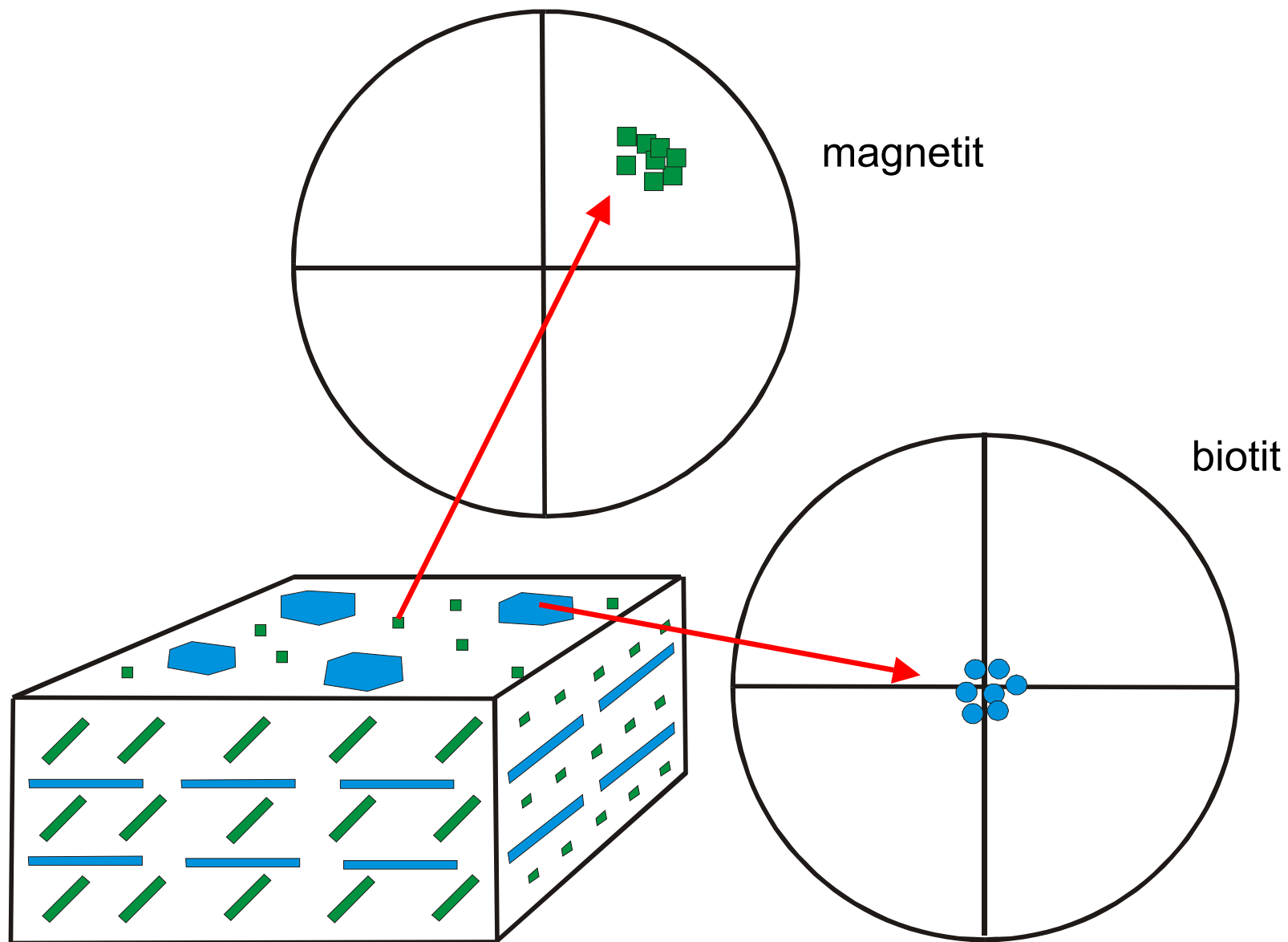
1 – měřená AMS, 2 – vypočtená pomocí texturní goniometrie

Anizotropie vypočtená a měřená

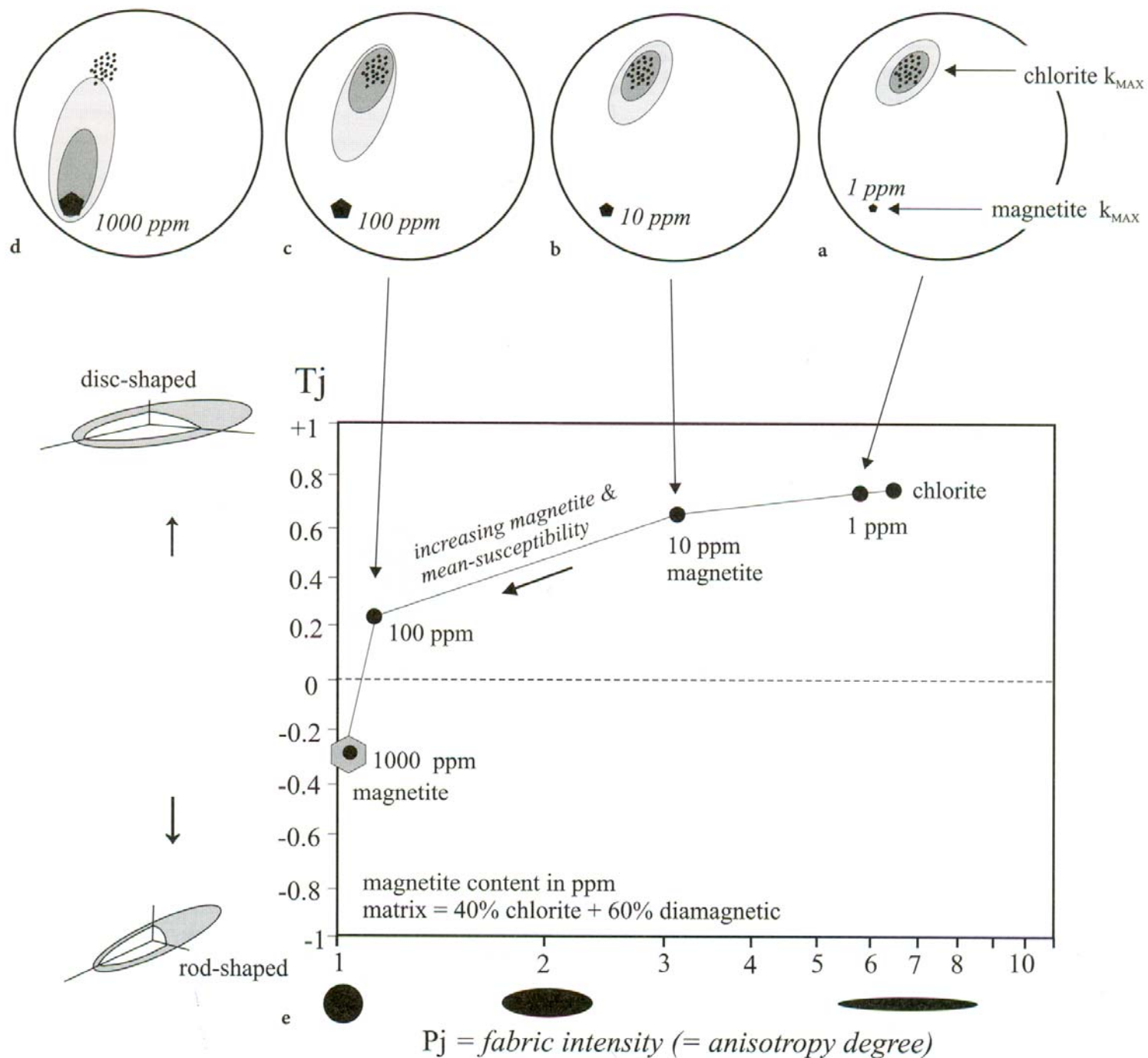


1 – měřeno AMS, 2 – vypočteno pomocí Fjodorova stolku

4. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin



4. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin



Vznik magnetických staveb vyššího řádu

