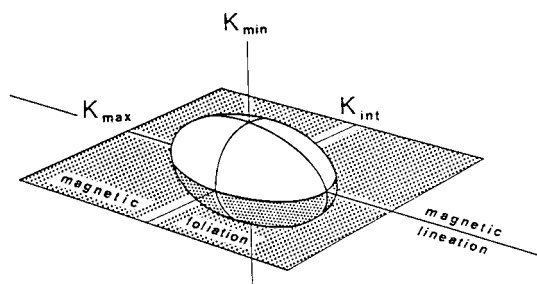


# Magnetická anizotropie hornin

(stručný přehled a využití v geologii)



Martin Chadima  
AGICO, s.r.o., Brno

Magnetická anizotropie hornin

## Osnova

1. Základní principy magnetismu a magnetické anizotropie
2. Anizotropie minerálů
3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin
4. Magnetická stavba sedimentárních hornin
5. Magnetická stavba vyvřelých hornin
6. Magnetická stavba metamorfitů
7. Odběr vzorků, měření a zpracování dat
8. Separace paramagnetické a feromagnetické anizotropie
9. 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](mailto:chadima@sci.muni.cz))  
AGICO, s.r.o., Brno

## Přednášky

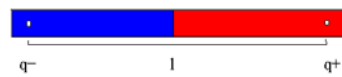
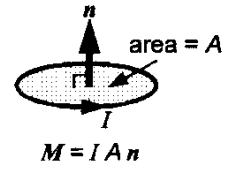
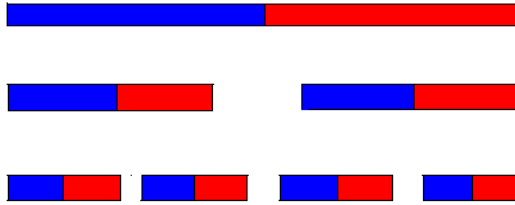
<http://www.sci.muni.cz/~chadima/geomagnetismus/>

## Definice a využití

- 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
- využití pro geologické mapování, ve strukturní geologii, sedimentologii, vulkanologii...

## 1. Základní principy magnetismu a magnetické anizotropie

Magnetický dipól



Magnetický moment  $m = q \cdot l$

$q$  – magnetický náboj  
 $l$  - vzdálenost

## 1. Základní principy magnetismu a magnetické anizotropie

Stupeň namagnetování látky v magnetickém poli popisuje magnetizace

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r \quad [\text{A/m}]$$

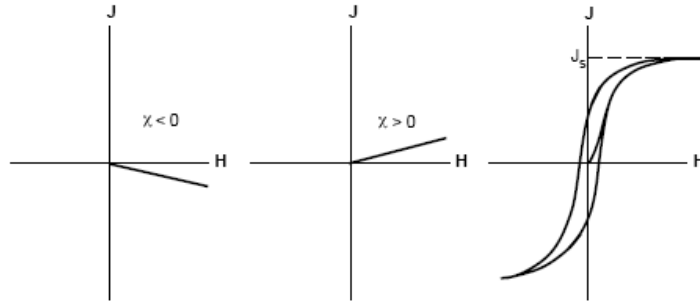
indukovaná magnetizace

remanentní magnetizace

$$\mathbf{M}_i = k \mathbf{H}$$

magnetická susceptibilita

## 1. Základní principy magnetismu a magnetické anizotropie



### Diamagnetismus

- indukovaná magnetizace působí proti směru vnějšího pole
- magnetická susceptibilita je malá, záporná
- bez vnějšího pole je indukovaná magnetizace rovna nule

- *křemen*
- *kalцит*

### Paramagnetismus

- indukovaná magnetizace ve směru vnějšího pole
- magnetická susceptibilita je malá, kladná
- bez vnějšího pole je indukovaná magnetizace rovna nule

- *pyroxeny*
- *amfiboly*
- *olivín*
- *slídy*

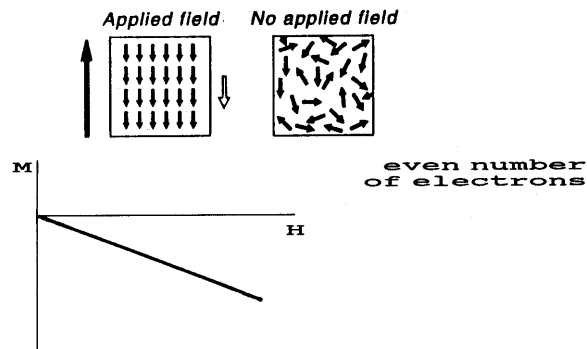
### Ferromagnetismus

- složitější závislost mezi vnějším polem a indukovanou magnetizací
- magnetická susceptibilita vysoká
- bez vnějšího pole zůstává zbytková (remanentní) magnetizace

- *železo*
- *magnetit*
- *hematit*
- *pyrhotin*

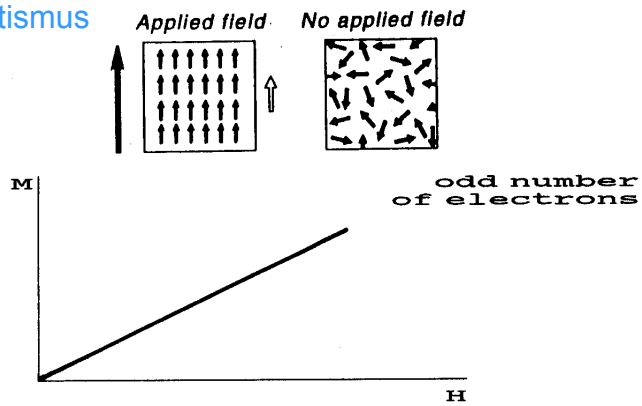
## 1. Základní principy magnetismu a magnetické anizotropie

### Diamagnetismus



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

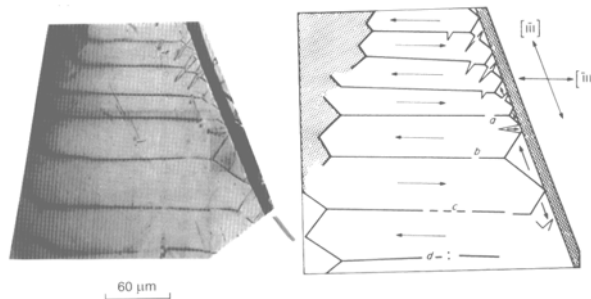
## Paramagnetismus



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

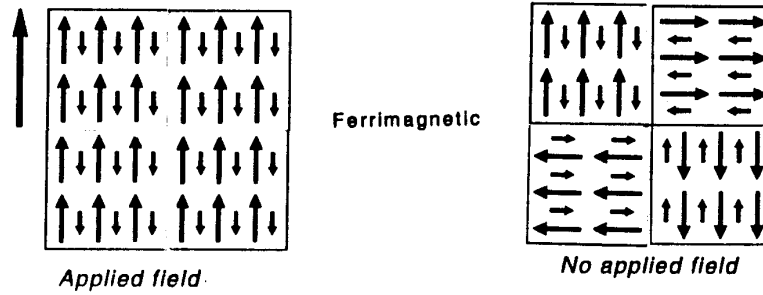
## Feromagnetismus

- Ferimagnetismus
- Antiferomagnetismus
- Feromagnetismus (s.s.)



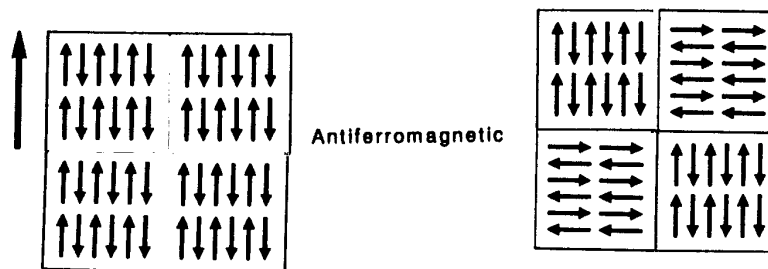
**Magnetické domény** – regiony se souhlasně uspořádanými magnetickými momenty

## Ferimagnetismus



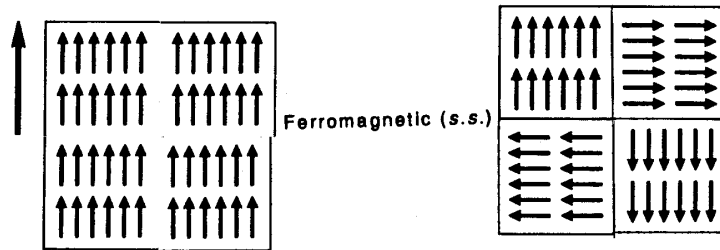
magnetit  $k = 3 - 6$   
titanomagnetit  $k = 0,5 - 3,5$   
monoklin. pyrhotin  $k = 0,2 - 0,7$

## Antiferromagnetismus



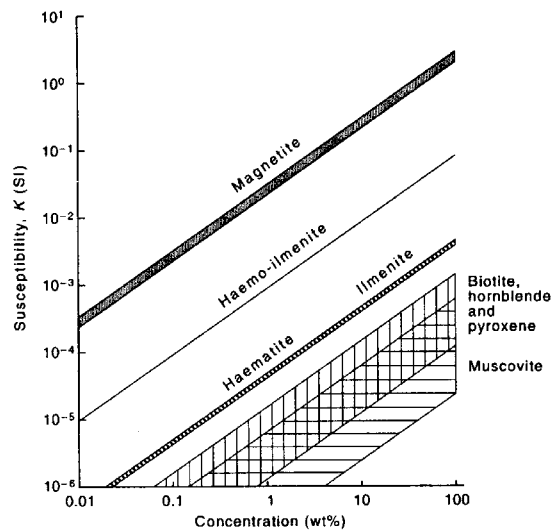
hematit  $k = 0,001 - 0,2$   
hexagonal. pyrhotin

### Ferromagnetismus (*sensu stricto*)



kovové železo

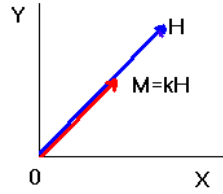
### Příspěvky jednotlivých minerálů k celkové susceptibilitě horniny



### Anizotropie magnetické susceptibility (AMS)

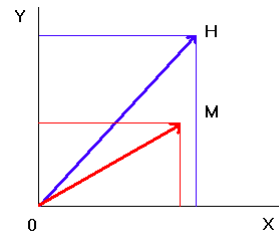
Magnetizace izotropních látek

$$\begin{aligned} M_1 &= k H_1 \\ M_2 &= k H_2 \\ M_3 &= k H_3 \end{aligned}$$



Magnetizace anizotropních, lineárně magnetických látek

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



Maticový zápis

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

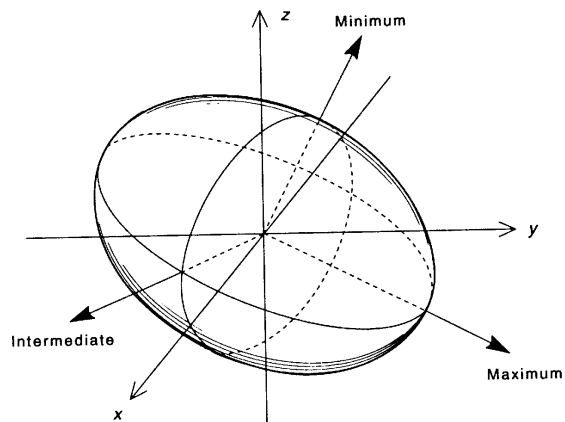
Vektor intenzity pole

Vektor magnetizace

Tenzor susceptibility

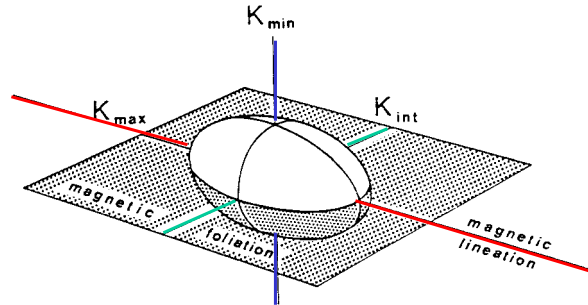
### Elipsoid jako geometrická reprezentace tenzoru

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





## Magnetická stavba – stavba definovaná na základě magnetické anizotropie

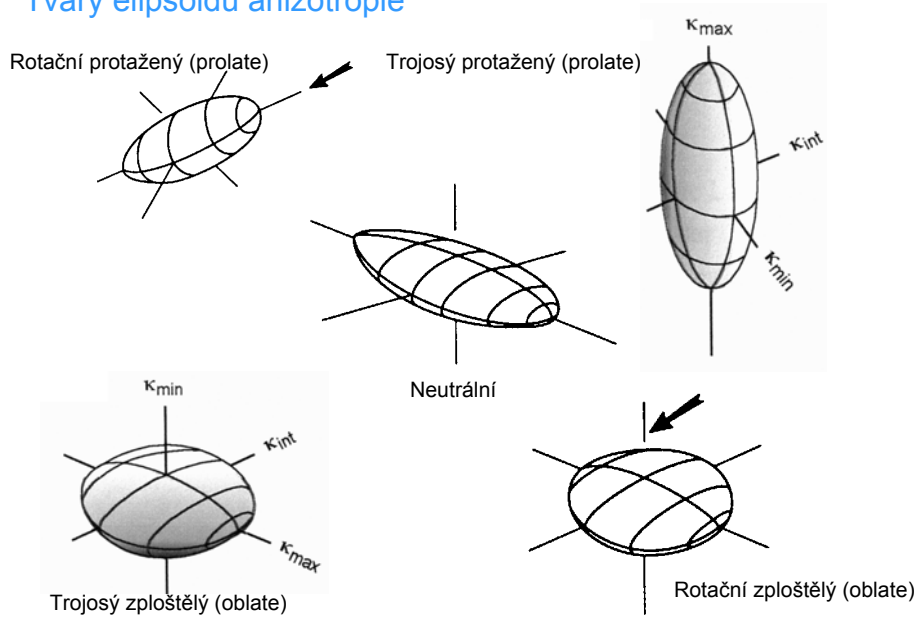


$$M_1 = k_{11} H_1 \quad k_{\max} \quad \blacksquare$$

$$M_2 = k_{22} H_2 \quad k_{\text{int}} \quad \blacktriangle$$

$$M_3 = k_{33} H_3 \quad k_{\min} \quad \bullet$$

## Tvary elipsoidů anizotropie



### 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

-1 < T < 0

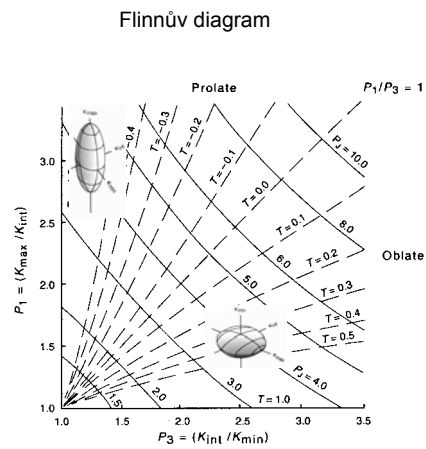
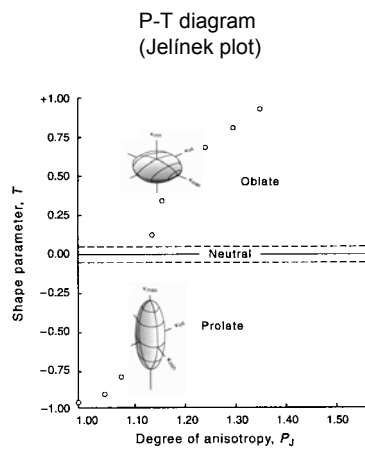
planární magnetická stavba

lineární magnetická stavba

$P_j = P^a$  ← korigovaný stupeň anizotropie

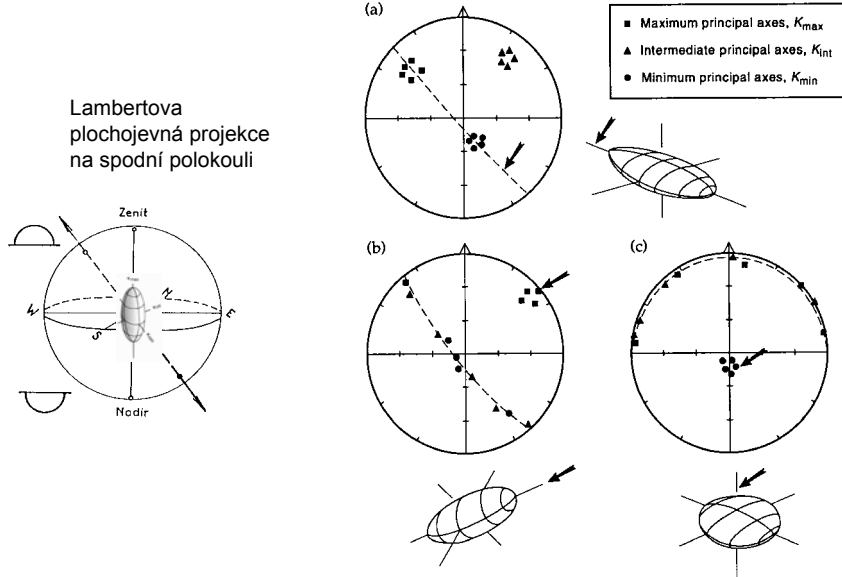
$a = \sqrt{(1+T^2) / 3}$

### Diagramy tvaru a stupně anizotropie



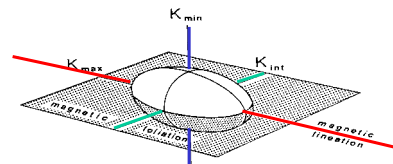
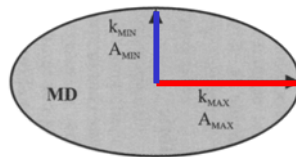
## 1. Základní principy magnetismu a magnetické anizotropie

### Orientace elipsoidu anizotropie

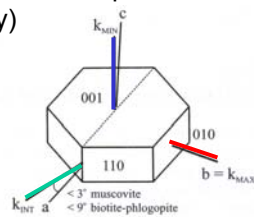


## 2. Anizotropie minerálů

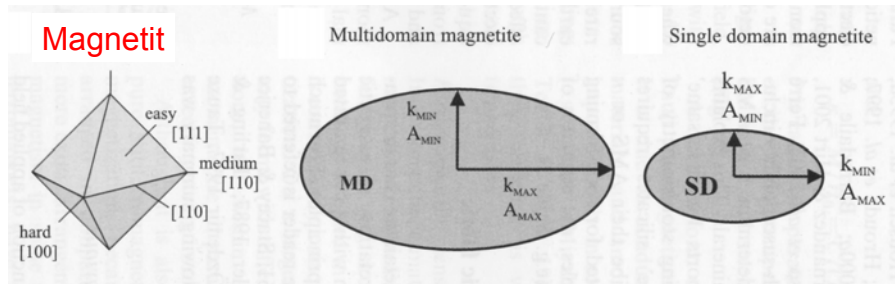
### •Tvarová anizotropie (magnetit)



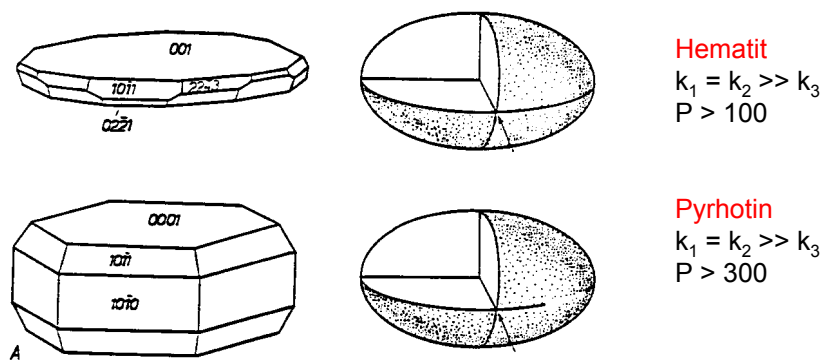
### •Krystalografická anizotropie (ostatní minerály)



Tvarová anizotropie



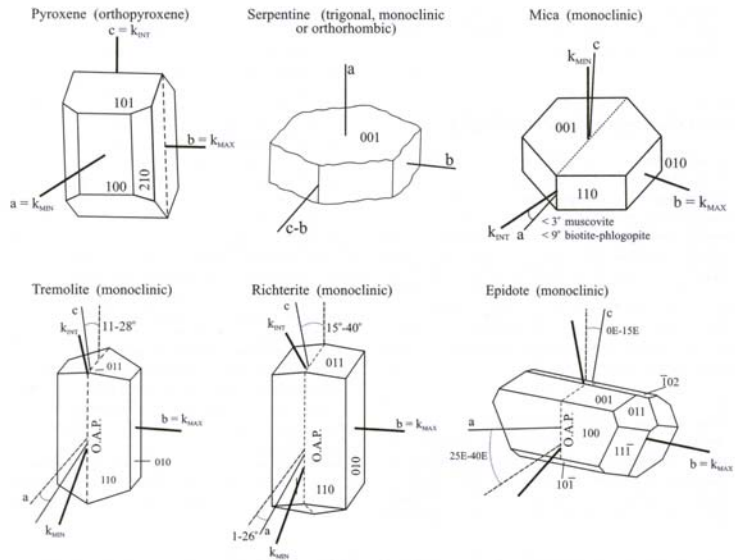
Krystalografická anizotropie



## 2. Anizotropie minerálů

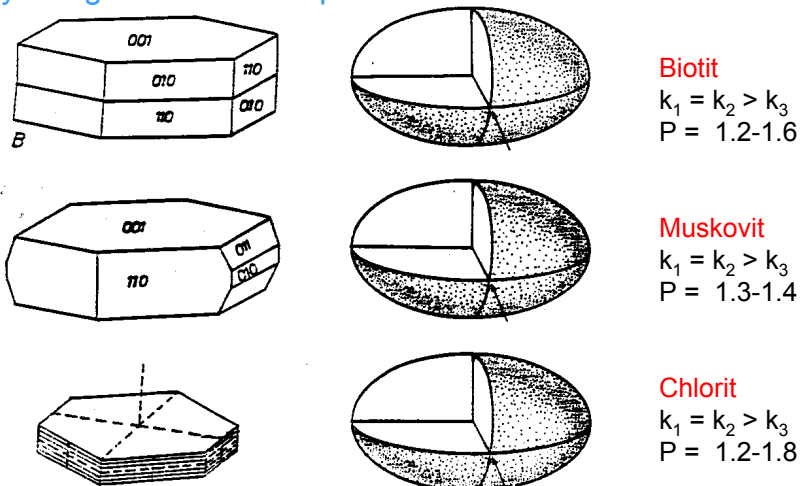
### Krystalografická anizotropie

#### Paramagnetické minerály



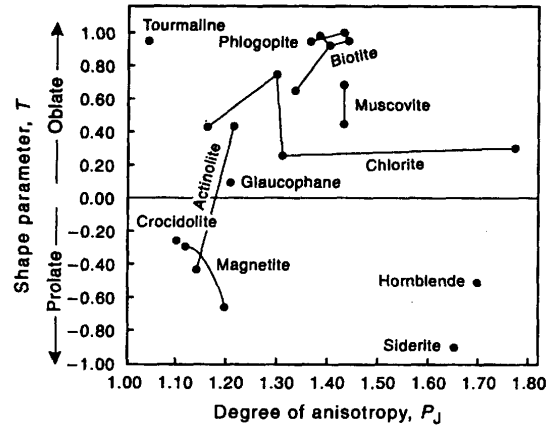
## 2. Anizotropie minerálů

### Krystalografická anizotropie



## 2. Anizotropie minerálů

### Stupeň anizotropie a tvar elipsoidu



## 2. Anizotropie minerálů

### Magnetické vlastnosti některých feromagnetických minerálů

Mineral	Composition	Curie/Néel temperature (°C)	Saturation magnetization (A m <sup>2</sup> /kg)	Mass susceptibility (× 10 <sup>-8</sup> SI/kg)	P <sub>J</sub>	T	'Easy' direction	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Magnetite	α-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	575	90-93	578	1.18	-0.30	<111>*	5200
Maghaemite	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(350)	80-85	500	†	†	<111>	4800
Haematite	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	680	0.2-0.5	25	>100	1.0	Basal	5300
Goethite	γ-FeOOH	120-130	0.001-1	0.5-1.5	†	†	†	4300
Pyrrhotite	FeS <sub>1.14</sub>	320	1-2	0.1-20	3-400	0.8	Basal	4600
Franklinite	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	60	0.006-3	†	†	†	†	5340
Jacobsite	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	300	0.7-3	†	†	†	†	4870
Chromite	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-84	0.003-0.007	†	†	†	†	5090
Cobaltite	CoAsS	†	0.0005-0.2	†	†	†	†	6300

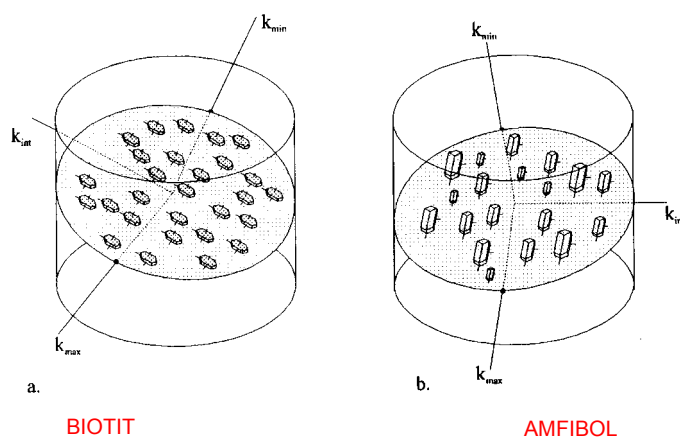
## 2. Anizotropie minerálů

### Magnetické vlastnosti některých paramagnetických a diamagnetických minerálů

Mineral	Mean susceptibility (SI $\times 10^{-6}$ )	$P_1$	T	Reference
<i>Paramagnetic minerals</i>				
Actinolite (1)	3560	1.136	-0.43	1
Actinolite (2)	6500	1.204	0.43	1
Hornblende	8920	1.665	-0.51	1
Crocidolite	333	1.098	-0.25	1
Glaucophane	787	1.205	0.10	1
Chlorite (1)	358	1.262	0.74	1
Chlorite (2)	70	1.753	0.30	1
Chlorite (3)	1550	1.302	0.26	1
Chlorite (4)	370	1.154	0.42	1
Biotite (1)	1230	1.372	0.95	1
Biotite (2)	1180	1.319	0.98	1
Biotite (3)	998	1.198	0.90	2
Biotite (4)	1290	1.361	0.99	2
Phlogopite	1178	1.310	0.95	1
Muscovite (1)	165	1.413	0.44	1
Muscovite (2)	122	1.393	0.67	1
Siderite	3980	1.565	-0.90	1
Tourmaline	1690	1.005	1.00	1
<i>Diamagnetic minerals</i>				
Quartz (1)	-13.4	1.01	1.0	3
Quartz (2)	-15.4	1.01	1.0	4
Calcite	-13.8	1.11	1.0	5
Dolomite	-38.0	4.96	0.0	1

## 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

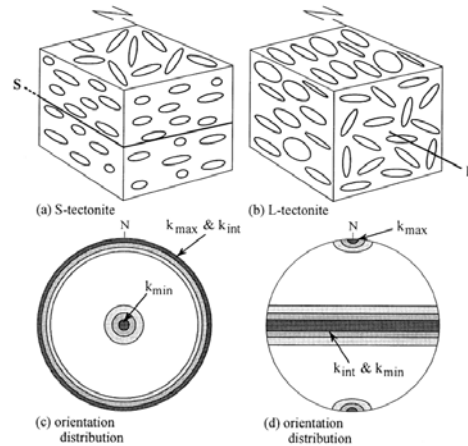
### Přednostní uspořádání magnetických minerálů ve vzorku horniny



### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

#### Elipsoid anizotropie susceptibilitivity ve vztahu ke strukturálním prvkům v hornině

FOLIOVANÉ HORNINY      HORNINY S LINEÁRNÍ STAVBOU



### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

#### 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

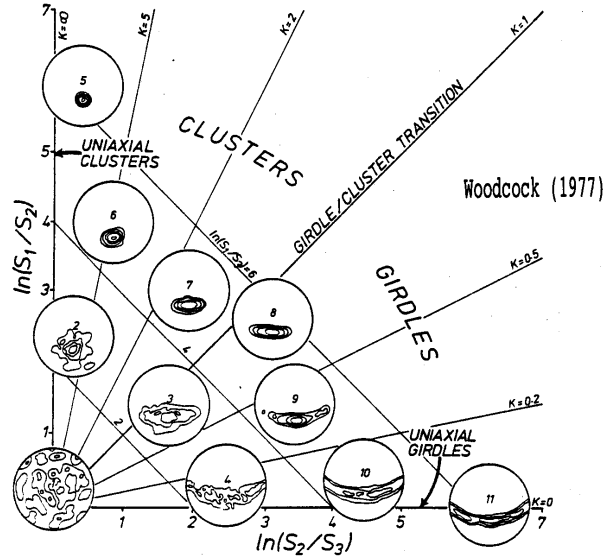
•  $E_1 > E_2 = E_3$  shluk (*cluster*)

•  $E_1 = E_2 \geq E_3$  pás (*girdle*)



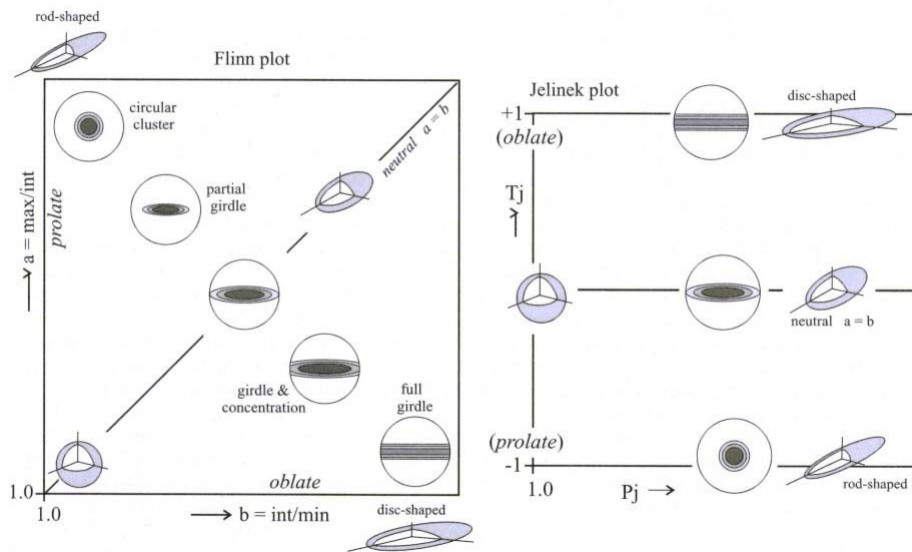
3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

Orientační tenzor (matice)



3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

Orientační tenzor (matice)



### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

#### Elipsoid anizotropie z orientačního tenzoru (a opačně)

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

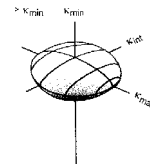
$$F = (AE_3 + B) / (AE_3 + B)$$

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

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

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

magneticky zploštěná zrna



$$P_c = k_1 / k_3$$

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

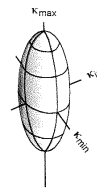
$$F = (AE_2 + B) / (AE_3 + B)$$

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

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

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

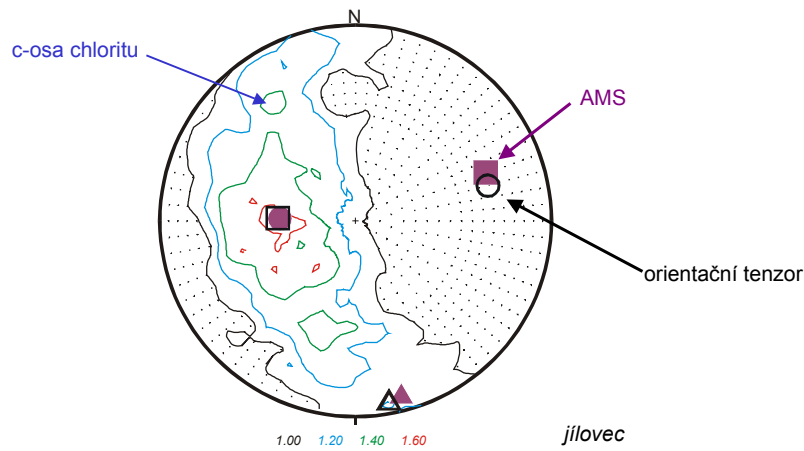
magneticky protáhlá zrna



$$P_c = k_1 / k_3$$

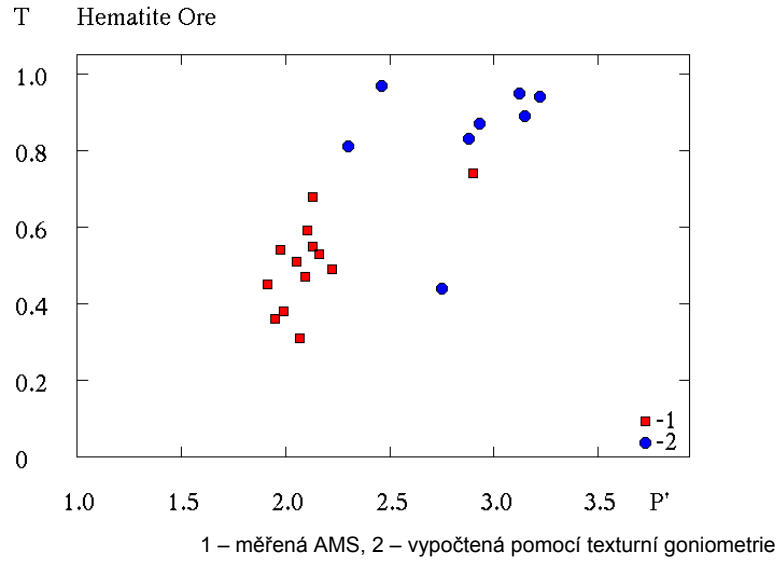
### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

#### Porovnání AMS a neutronové texturní goniometrie



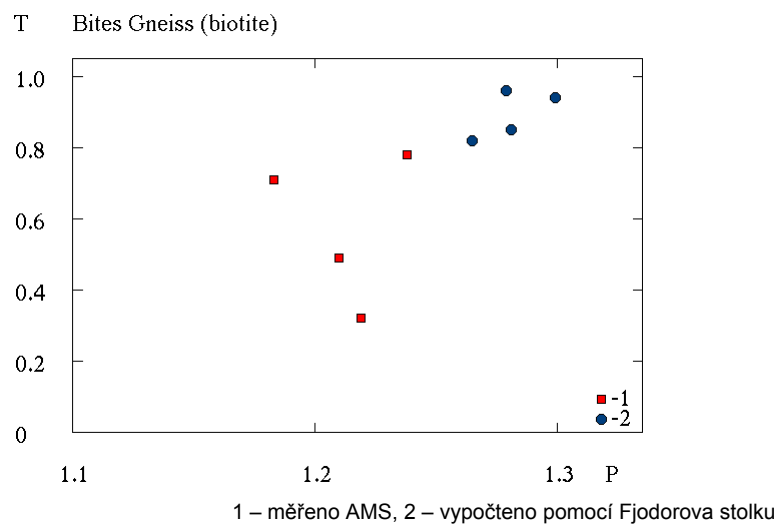
### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

#### Anizotropie vypočtená a měřená



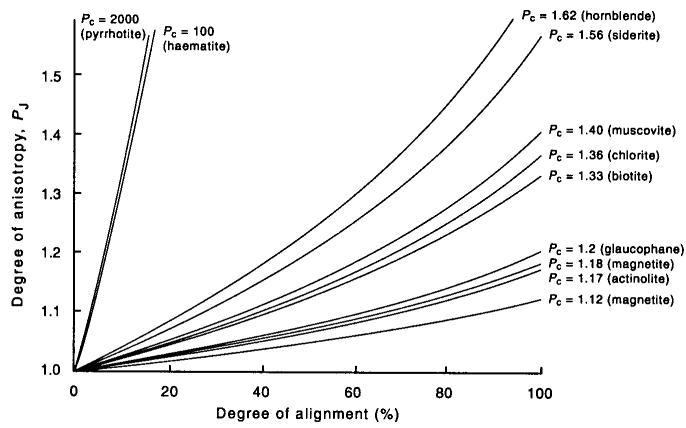
### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

#### Anizotropie vypočtená a měřená

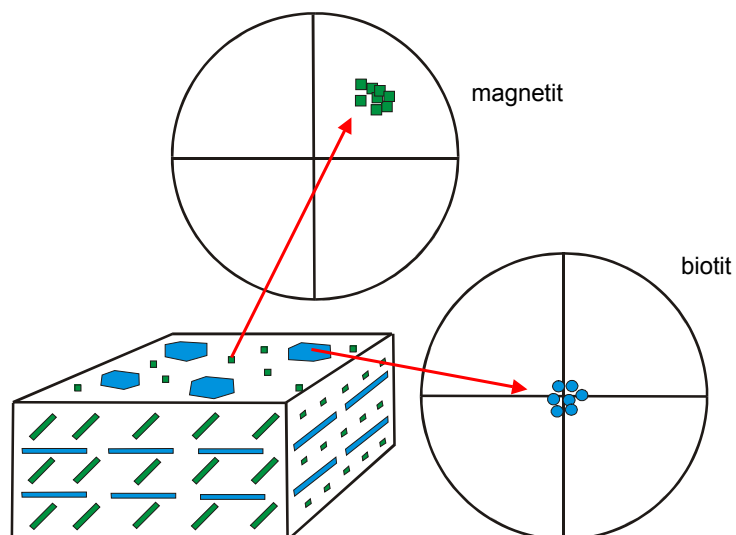


### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin

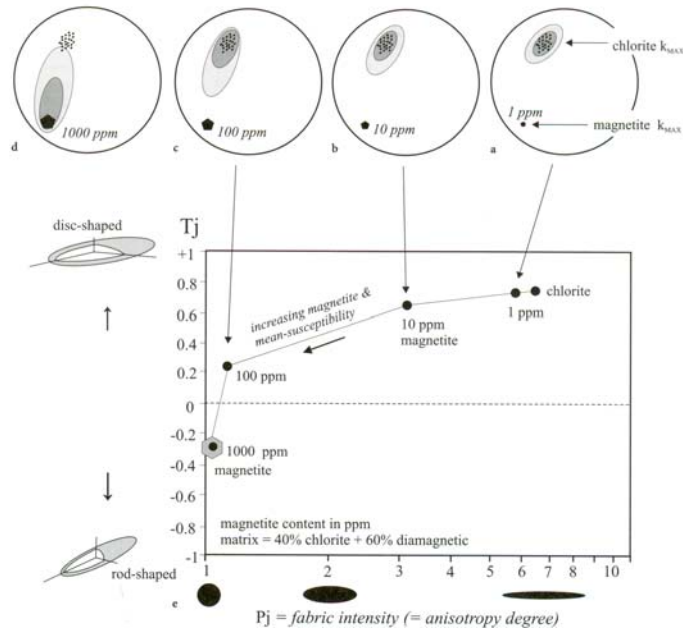
#### Závislost stupně anizotropie na přednostním uspořádání minerálů



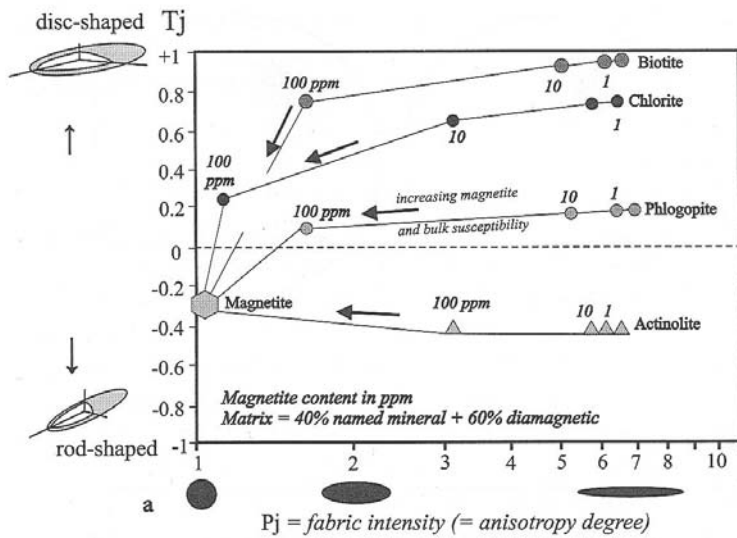
### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin



### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin



### 3. Vztah mezi magnetickou a minerální stavbou hornin



### Vznik magnetických staveb vyššího řádu

