

# ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

**Užívané parametry:** rezistivita (konduktivita), polarizovatelnost, difúzně-adsorpční potenciály, dielektrická konstanta, piezoelektrický modul

**Ohmův zákon:**  $U = IR$ , kde  $R = r \cdot l / s$

$r$  – rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ],  $s$  - průřez,  $l$  – délka,  $\gamma = 1/r$  – **konduktivita** [ $S \cdot m^{-1}$ ], S-Siemens

**Vodiče, polovodiče, izolátory(nevodiče, dielektrika):**

*Vodiče:* vodivost elektronová (kovy), iontová (elektrolyty)

*Polovodiče:* elektronová, děrová

*Dielektrika:* vodivá jen pro střídavý proud

**Polarizace dielektrika:**  $P = \varepsilon_0 \kappa E$

$P$  - vektor polarizace,  $E$  - intenzita el. pole

$\kappa$  - dielektrická susceptibilita,

$\varepsilon_0$ - permitivita vakua =  $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

# Polarizace

Silový účinek elektrického pole na látkové prostředí se projevuje vznikem **polarizace**

1. Elektronová - excentricita elektronových orbitál vůči jádru
2. Atomová - posun atomů nebo iontů v krystalových mřížkách
3. Dipólová - orientace molekul vnějším polem
4. Elektrochemická - transport iontů ve vícefázových soustavách a vznik elektrické dvojvrstvy

Elektrické vlastnosti pevných látek jsou určovány strukturou vnějších elektronových orbitál, druhem vzájemné vazby atomů a stavbou krystalové mřížky.

# Vodiče, polovodiče, dielektrika

Podle vodivosti elektrického proudu rozdělujeme horniny i minerály na vodiče, polovodiče a dielektrika (izolátory)

Z fyzikálního hlediska se tyto skupiny liší stavbou krystalové mřížky a strukturou elektronových energetických pásů. Formálním kritériem může být koncentrace **volných nosičů proudu**, což jsou elektrony, vakance, intersticiály a dislokace.

Polovodiče...konc.  $10^{16}$ - $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$        $\mathbf{r}$  od  $10^{-5}$  do  $10^3$   $\Omega\cdot\text{m}$

Vodiče.....konc..nad  $10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$        $\mathbf{r}$  pod  $10^{-6}$   $\Omega\cdot\text{m}$

Dielektrika ....konc.méně než  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$        $\mathbf{r}$  nad  $10^4$   $\Omega\cdot\text{m}$

## Rezistivity minerálů [ $\Omega\text{m}$ ]

anhydrit	$10^7 - 10^{10}$	křemen	$10^{10} - 10^{16}$
biotit	$10^{11} - 10^{15}$	živce	$10^{12} - 10^{14}$
fluorit	$10^{13} - 10^{14}$	halit	$10^{10} - 10^{17}$
kalцит	$10^{12} - 10^{14}$	síra	$10^{12} - 10^{15}$
muskovit	$10^{10} - 10^{14}$	ropa	$10^9 - 10^{11}$
galenit	$10^{-5} - 10^{-3}$	magnetit	$10^{-5} - 10^2$
hematit	$10^{-2} - 10^{-1}$	pyrit	$10^{-5} - 1$
grafit	$10^{-6} - 10^{-4}$	jíl. minerály	$1 - 10^2$
siderit	$70 - 10^4$	wolframit	$10 - 10^5$
voda	$10^{-1} - 10^3$	led	$4,7 \cdot 10^5 - 6,7 \cdot 10^5$

Rezistivity jsou v rozmezí několika řádů, řídí se nejen složením minerálů, ale v rámci jednoho druhu mají vliv příměsi, alterace, mikrotrhliny, defekty v mřížce.

## Rezistivity hornin [ $\Omega\text{m}$ ]

granit, granodiorit	$10^2 - 10^6$	rohovec	$10^6 - 10^7$
syenit, diorit, gabro	$10^2 - 10^8$	grafitické	
pyroxenit, peridotit	$10^2 - 10^6$	břidlice	$10^{-1} - 10^3$
diabáz	$10^2 - 10^6$	hlíny	$1 - 10^2$
andezit	$10^3 - 10^5$	jíly	$10^{-1} - 10^2$
bazalt	$10^3 - 10^6$	slíny	$10 - 10^2$
břidlice	$10^3 - 10^5$	pískovec	$30 - 10^3$
fylit	$10^2 - 10^4$	vápenec	$10^2 - 10^3$
rula	$10^4 - 10^5$	uhlí	$10^{-2} - 10^5$
amfibolit	$10^5 - 10^7$		
mramor	$10^2 - 10^5$		
kvarcit	$10^3 - 10^5$		

Rezistivita minerálů i hornin klesá s frekvencí elektrického proudu.

	voči- vost	sku- pina	S [Ωm]	M I N E R Á L		
				podle Kobranova (1962)	podle Sumner (1976)	podle Beblo (1982)
VODIČE	elektronová	I.	< 10 <sup>-6</sup>	Kovy: Ag, Au, Cu, Hg, Pt	Kovy: Au, Cu Sulfidy: (MILLERIT), (kovelín) Arsenidy: (NIKELÍN)	Kovy: Ag, Au, As, Bi, Cu, Fe, Ni, Pt, Sb Sulfidy: (MILLERIT) Arsenidy: (nikelín)
				II.	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-2</sup>	<u>GRAFIT</u> Sulfidy: <u>BORNIT</u> , <u>galenit</u> , <u>chalkozín</u> , (chalkopyrit), (molybdenit), <u>pyrit</u> , <u>pyrhotin</u> Arsenidy: (NIKELÍN) Oxidy: (hematit), <u>kasiterit</u> , (KUPRIT), <u>magnetit</u>
POLOVODIČE	elektronová a iontová	III.	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>2</sup>	Sulfidy: <u>galenit</u> , (chalkozín), <u>molybdenit</u> , (Markazit), <u>pyrit</u> , (pyrhotin), (sfalerit) Oxidy a hydroxidy: (BRAUNIT), (ILMENIT), <u>kasiterit</u> , <u>magnetit</u> , (MANGANIT), <u>psilomelan</u> , (TITANOMAGNETIT) Silikáty: (muskovit) Karbonáty: (siderit)	Sulfidy: (BISMUTINIT), (galenit) (chalkopyrit), (markazit), <u>molybdenit</u> , (pyrit), <u>sfalerit</u> Sulfoarsenidy: <u>arsenopyrit</u> , (enargit), (kobaltin) Sulfoantimonidy: <u>tetraedrit</u> , Oxidy a hydroxidy: <u>ilmenit</u> , <u>kasiterit</u> , (KUPRIT), <u>magnetit</u> , (MANGANIT), <u>psilomelan</u> , <u>pyrolusit</u> , (RUTIL), <u>URANIT</u>	Sulfidy: <u>argentit</u> , (BISMUTINIT), (galenit), (chalkozín), (chalkopyrit), <u>markazit</u> , <u>MOLYBDEENIT</u> , <u>pyrit</u> , <u>sfalerit</u> , (stanin) Sulfoarsenidy: (kobaltin) Sulfoantimonidy: <u>tetraedrit</u> Oxidy a hydroxidy: <u>hematit</u> , <u>chromit</u> , (ilmenit), <u>kasiterit</u> , <u>KUPRIT</u> , <u>magnetit</u> , (MANGANIT), <u>PSILOMELAN</u> , <u>pyrolusit</u> , (RUTIL), <u>URANIT</u>
				IV.	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>	Sulfidy: (galenit), (chalkopyrit), <u>molybdenit</u> , <u>sfalerit</u> Oxidy a hydroxidy: (BAUXIT), <u>hematit</u> , <u>kasiterit</u> , <u>magnetit</u> , (psilomelan) Silikáty: (SERPENTIN) Karbonáty: (siderit) Halogeny: (halit), sylvín
IZOLÁTOŘI	iontová	V.	10 <sup>6</sup> -10 <sup>10</sup>	Sulfidy: (sfalerit), (RUMELKA) Hydroxidy: (LIMONIT) Karbonáty: <u>kalcit</u> Sulfáty: <u>ANHYDRIT</u>	-	Sulfidy: <u>RUMELKA</u> Hydroxidy: (LIMONIT) Sulfáty: (anhydrit) Silikáty: (AMFIBOL) síra
				VI.	10 <sup>10</sup> -10 <sup>14</sup>	Oxidy: <u>KŘEMEN</u> Silikáty: <u>ŽIVEC</u> , (slída), (muskovit) Karbonáty: (kalcit) Halogeny: <u>halit</u> , (sylvín) (síra)
		VII.	> 10 <sup>14</sup>	Silikáty: (slída) Halogeny: (halit), <u>sylvín</u> , (FLUORIT) (síra)	-	Halogeny: (halit) <u>síra</u>

Tabulka 9 ..: Rešeršní tabulka intervalových hodnot měrného odporu souboru přírod. minerálů (charakteristika skupin I.-VII. převzata z práce Kobranova  
Pozn.: Minerál, který lze zařadit pouze do jedné skupiny, je označen velkými písmeny. Rozdílnou šrafovou jsou podtrženy ty minerály, jejichž odpory odpovídá intervalu hodnot: ————— celý interval 10<sup>4</sup> Ωm, ———— jen hodnotami v intervalu 10<sup>3</sup> Ωm, ————— jen hodnotami 10<sup>2</sup> Ωm, ( ) minerály zasahují do skupiny je hodnotami řádu 10<sup>1</sup> Ωm. Sestavila D. Venhodová.

# Rezistivita hornin 2

## Rezistivita hornin závisí na :

- 1, objemu vodivé složky v hornině
- 2, její vodivosti
- 3, způsobu distribuce, tedy struktury (vnitřní stavbě) vodivé složky

Vodivá složka se uplatňuje nejvíce u sedimentů, kde ji tvoří mineralizovaná voda v pórech a někdy i jílové minerály a grafit.

## Co tedy tvoří obvykle vodivou složku:

**voda** v pórech (sedimenty, tektonické zóny, alterované zóny, zvětraliny)

vodivé **rudní minerály** - rudní ložiska

**grafit** (sedimenty, metamorfity) a **jílové minerály** (sedimenty, alterované zóny, slabě metamorf. vulkanity)

# Permitivita (dielektrická konstanta)

Permitivita  $\epsilon$  je parametr vyjadřující schopnost dielektrické polarizace prostředí podle vztahu

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E},$$

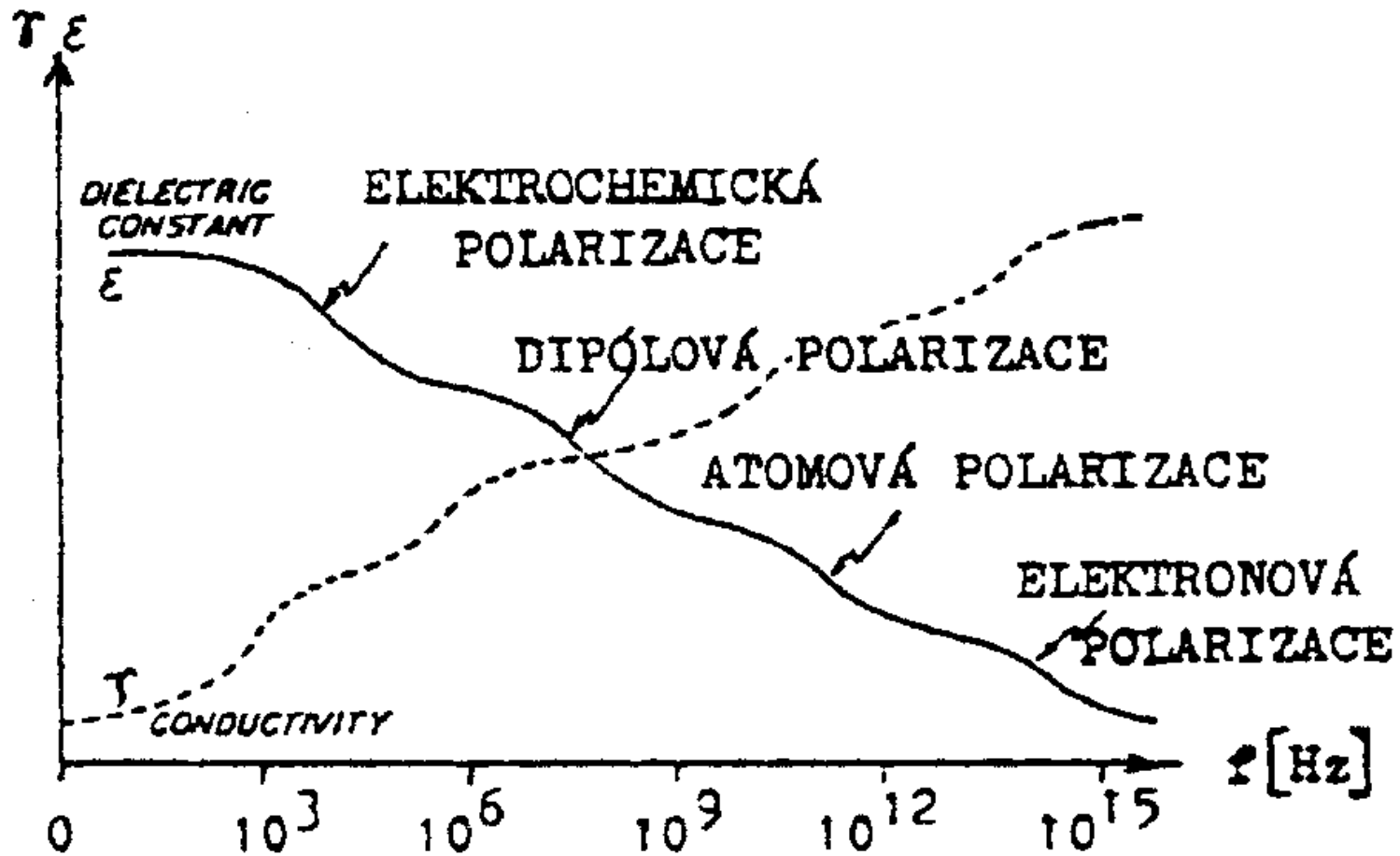
kde  $\mathbf{E}$  je vektor intenzity elektrického pole a  $\mathbf{D}$  je vektor elektrické indukce. V praxi se pracuje s hodnotami relativní permitivity  $\epsilon_r$  dané vztahem  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ .

Permitivita běžných horninotvorných minerálů je nízká, v rozmezí 4 až 8. Zvýšenou permitivitu mají polovodivé rudní minerály, řádově  $10^2$ . Extrémně vysokou permitivitu  $10^3 - 10^4$  mají všechna feroelektrika, například pyrolusit. Permitivita hornin je určována permitivitou jednotlivých minerálů, jejich poměrným zastoupením a vzájemnou vazbou. Ovlivňuje ji přítomnost vody v pórovém prostoru

Permitivita hornin se uplatňuje v geoelektrice, a to v oblasti VF polí nad  $10^6$  Hz.

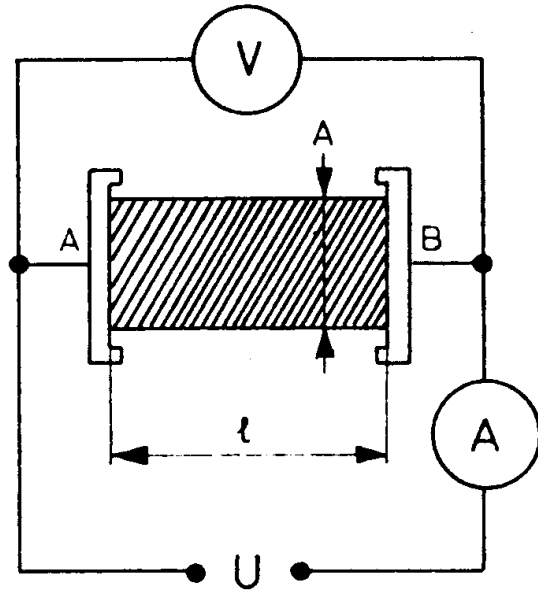


# Vztahy mezi polarizací, konduktivitou a dielektrickou konstantou



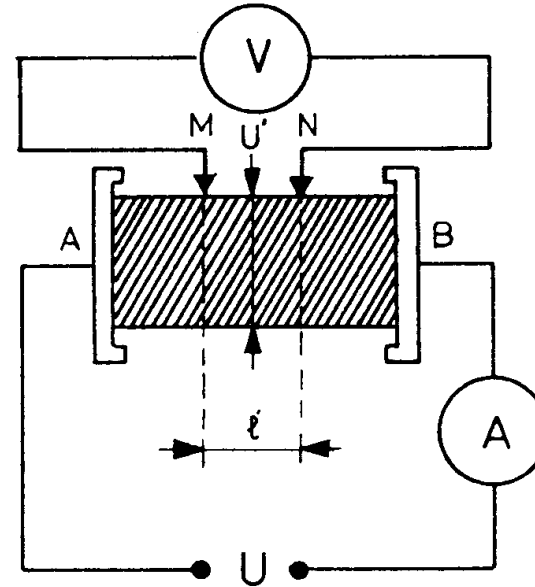
# Měření rezistivity

můstkové zapojení: dvoupólové, čtyřpólové



a) DIPOLE METHOD

A,B current electrodes

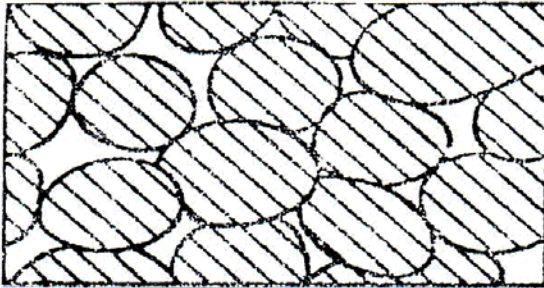


b) FOUR POLE METHOD

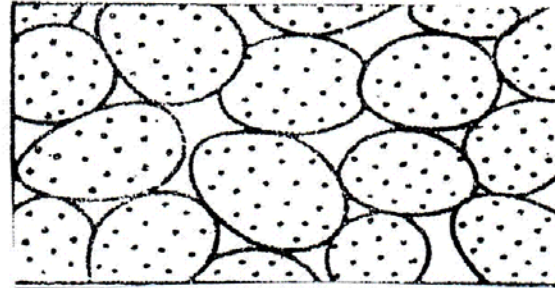
A,B current electrodes  
M,N potential electrodes

# Pórovitost sedimentů 1

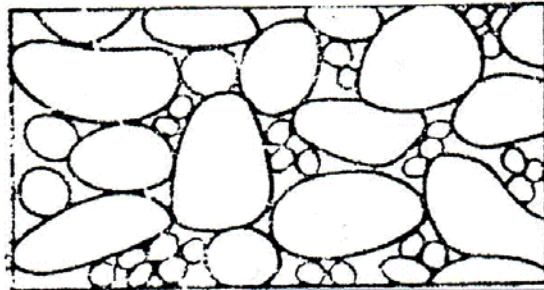
Vodivé  
valouny



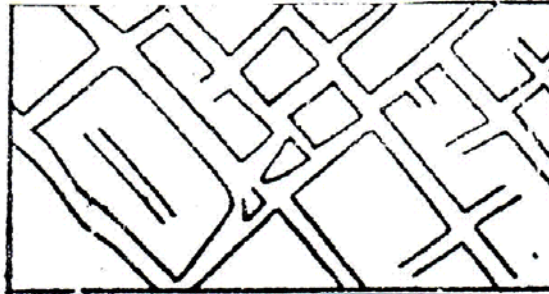
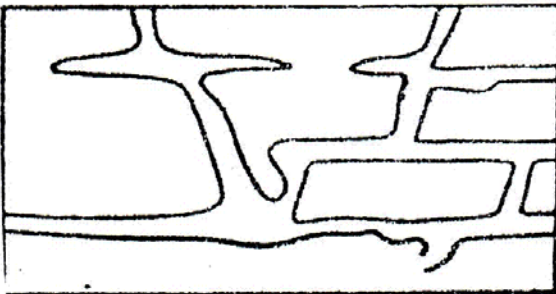
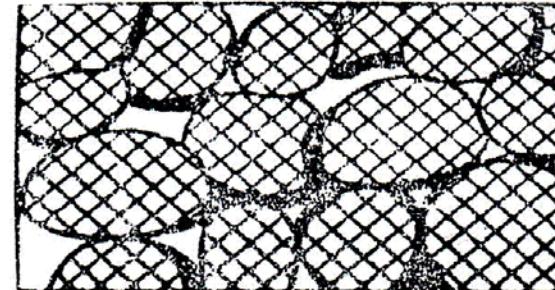
Nevodivé  
valouny



Obojí  
valouny  
nevodivé

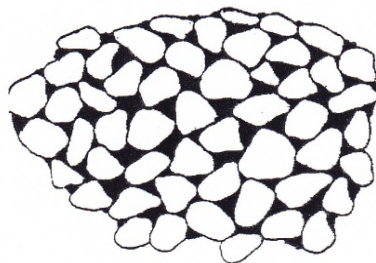


Ucpání pórů  
může být  
vodivé i  
nevodivé

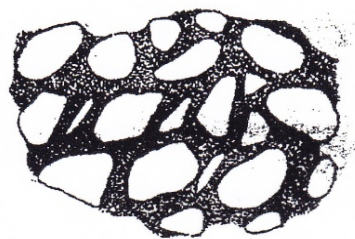


# Pórovitost sedimentů 2

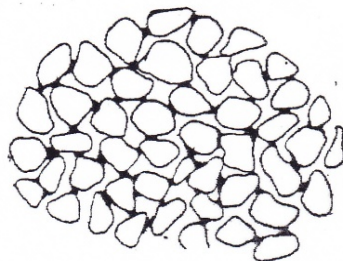
## Povaha tmelu



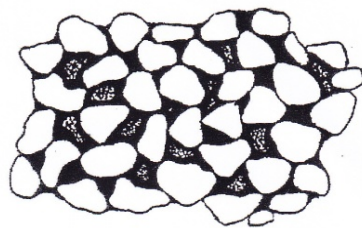
Obr. 5. Basální tmel



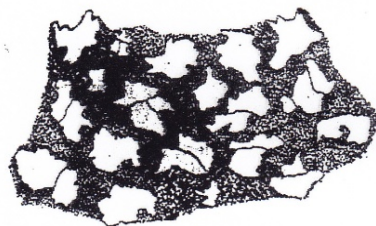
Obr. 6. Pórový tmel



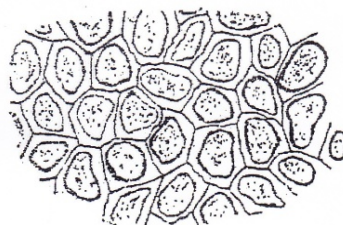
Obr. 7. Kontaktní tmel



Obr. 8. Výplňkový tmel



Obr. 9. Koroční tmel



Obr. 10. Regenerační tmel

## Rezistivita hornin 3

**Závislost na teplotě.** Rozhodující vliv na rezistivitu hornin má voda, pro kterou platí:

$$r_T = r_{18} / (1 + \alpha(T - 18^\circ))$$

kde  $r_T$  je rezistivita elektrolytu při teplotě  $T$ ,  $\alpha$  je teplotní koeficient, který pro většinu elektrolytů je rovný 0,025 na stupeň. Proto rezistivita hornin většinou s teplotou mírně klesá. Platí to pouze pro teploty nad bodem mrazu a **do cca 70 °C**.

Pod 0° rezistivita náhle stoupá, protože rezistivita ledu je vysoká,  $5 \cdot 10^5 \Omega \cdot m$ , a s pokračujícím poklesem teploty ještě narůstá.

**Nad 100 °C** dochází k dehydrataci a **rezistivita narůstá**,

**od 300 °C** naopak **klesá** v závislosti na množství volných nosičů proudu, u dielektrik do 600 °C souvisí pokles s uvolňováním iontů-příměsí z mřížky nebo elektronů u polovodičů do vodivostního pásma. **Do 1000 °C** převládá u hornin vodivost vyvolaná **pohybem iontů v krystalové mřížce**. Celkem se rezistivita hornin mění a zpravidla klesá asi o 6 řádů. Stejně narůstá tedy jejich vodivost.

# Závislost na tlaku

Je různá, závisí na pórovitosti. Zmenšuje-li se pórovitost, rezistivita stoupá, klesá vliv elektrolytu.

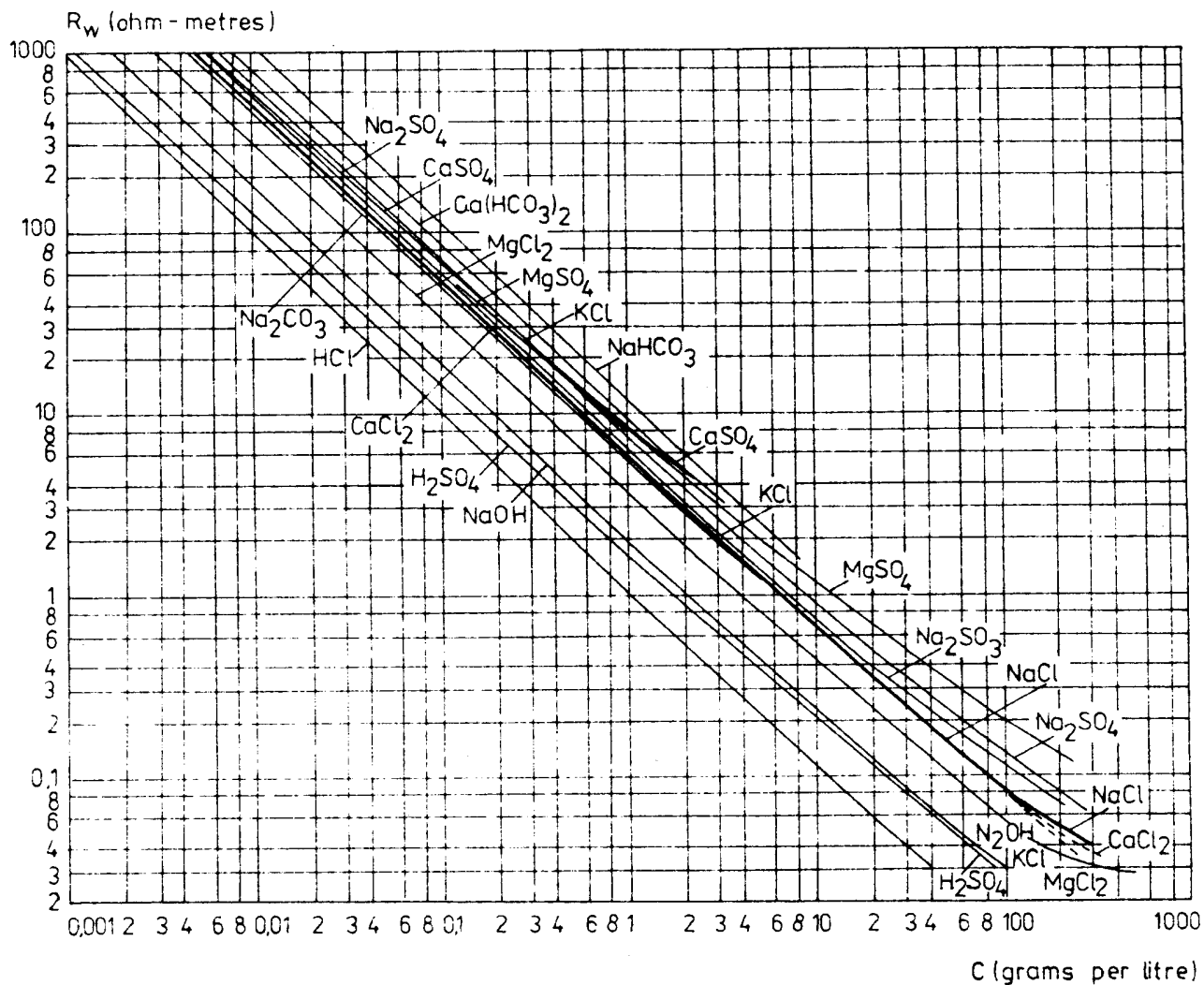
Při vysokých tlacích dochází ke sbližování a rozšiřování vodivostních pásů a zvýšení vodivosti.

**Vcelku je změna rezistivity vlivem tlaku méně významná než změna teplotní.**



# Rezistivita vodných roztoků

Figure 1. DEPENDENCE OF ELECTRIC RESISTIVITY  $R_w$  OF VARIOUS SOLUTIONS ON CONCENTRATION  $C$  AT THE TEMPERATURE  $T = 18^\circ\text{C}$



# Formační faktor

u bezjílových sedimentů charakterizuje pórový prostor

$$F = r/r_w$$

$r$  - rezistivita horniny

$r_w$  - rezistivita elektrolytu

Formační faktor závisí na pórovitosti a vodivosti elektrolytu

Vztah formačního faktoru k pórovitosti (pískovce, prachovce) :

$$F = p^{-b} \quad F = ap^{-b}$$

$p$  - pórovitost,  $a$  - strukturní součinitel,  $b$  – cementační faktor

V případě částečného zaplnění pórového prostoru byla stanovena následující závislost  $r = m S_w^{-n} F r_w$ ,

kde  $S_w$  je nasycenost a  $m$  se pohybuje v rozmezí 0,05 pro pískovce až 0,5 pro kompaktní horniny.

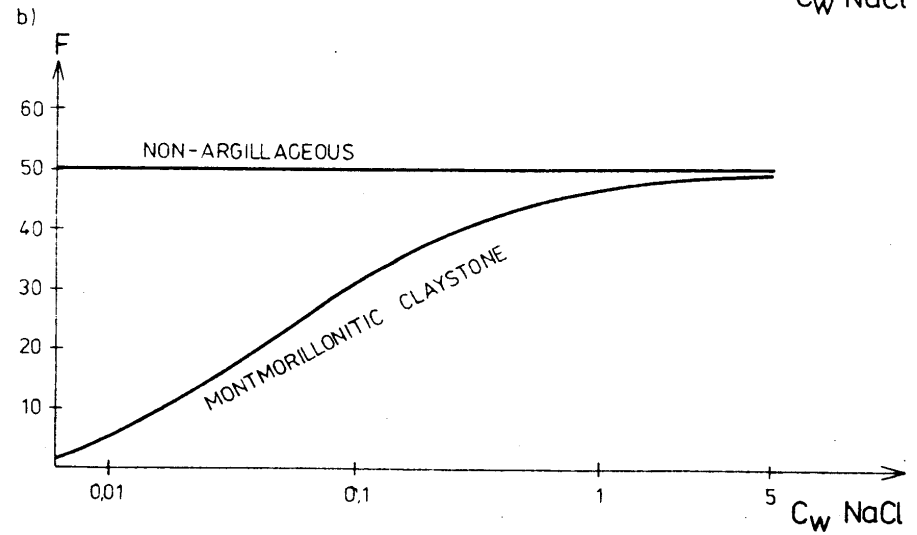
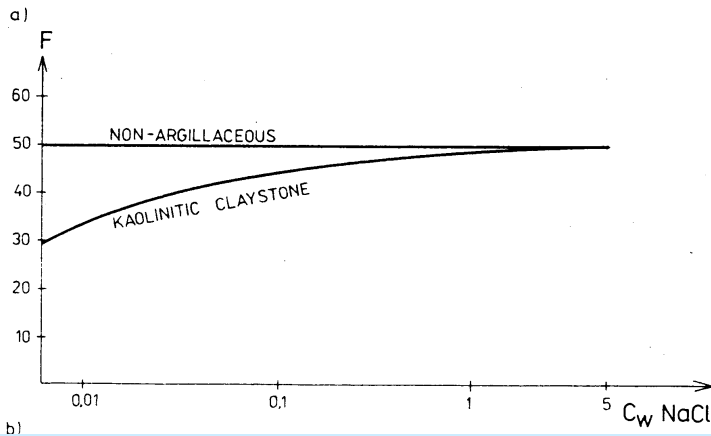
$F$  je důležitým parametrem pro sedimentární petrologii a karotážní interpretaci v sedimentárních pánvích



# Formační faktor různých hornin

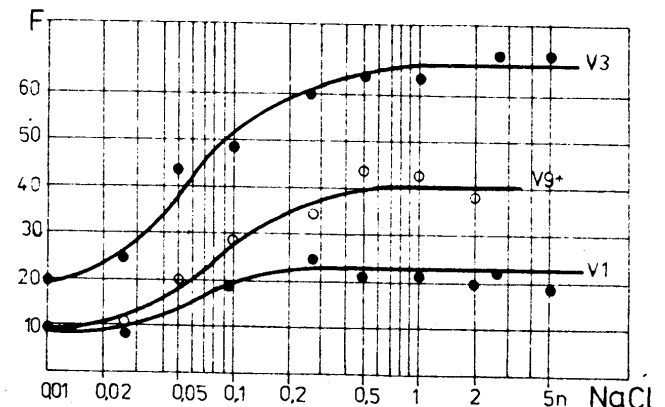
Vztah F ke koncentraci elektrolytu :

Figure 10. a), b) DEPENDENCE OF FORMATION FACTOR ON CONCENTRATION OF ELECTROLYTE FOR A NON-ARGILLACEOUS ROCK AND FOR A SHALE, BOTH OF THE SAME POROSITY



Formační faktor při různé koncentraci elektrolytu zůstává konstantní pro sedimenty bez jílové příměsi, v přítomnosti jílových minerálů stoupá s rostoucí koncentrací elektrolytu v závislosti na přítomném jílovém minerálu a jeho množství.

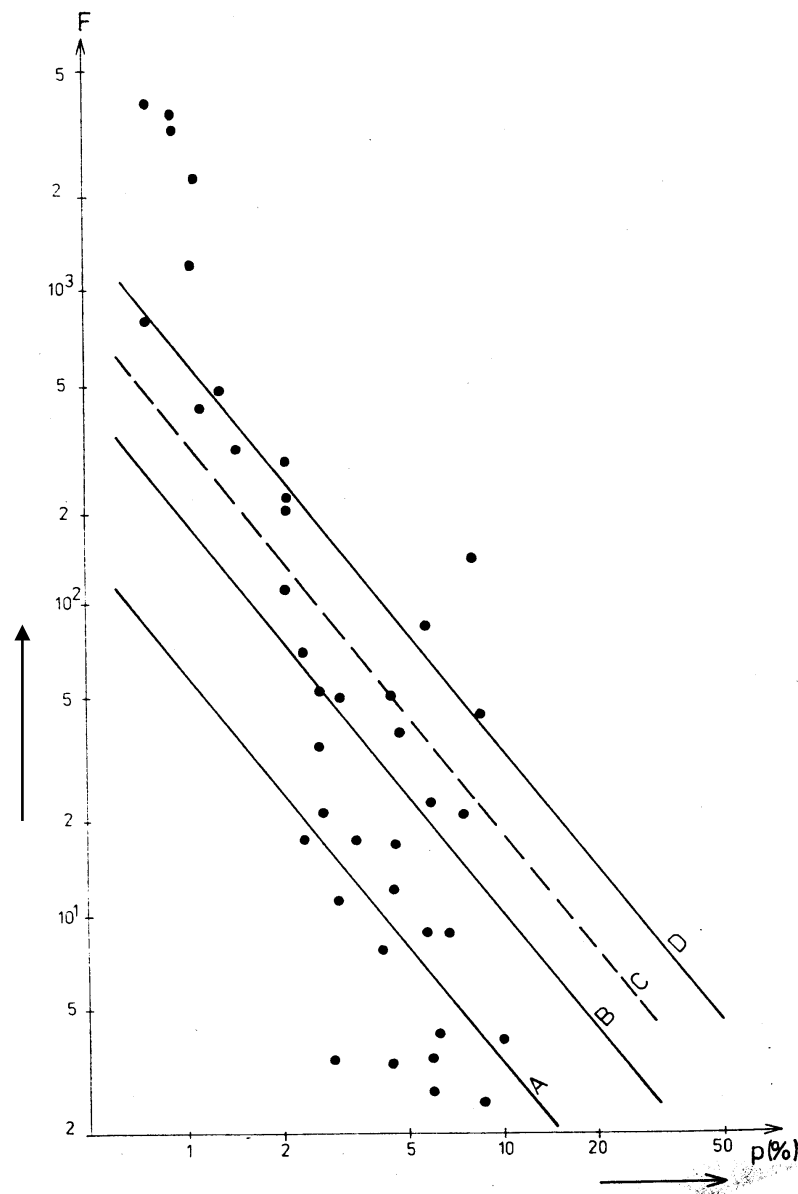
Figure 11 DEPENDENCE OF FORMATION FACTOR ON CONCENTRATION OF PORE ELECTROLYTE



# Propylitizace andezitů - formační faktor

Při propylitizaci vzniká sekundární pórovitost, ta se pak může indikovat elektrickými metodami. Užívaná při hledání zlata ve středoslovenských vulkanitech.

Figure 16. DEPENDENCE OF FORMATION FACTOR ON POROSITY.  
DATA IN FIELDS A, B, C, D, RESPECTIVELY, CORRESPOND  
TO DECREASING INTENSITY OF ALTERATION



# Anizotropie rezistivity

rezistivita i vodivost jsou tenzory 2. řádu

Dvě příčiny:

1. mikroanizotropie minerálů daná krystalovou mřížkou
2. **makroanizotropie daná strukturou vodivostní složky – je významnější**

Vrstevnatá textura:

koeficient anizotropie  $\lambda = (r_{\perp}/r_{\parallel})^{1/2}$  vždy větší než 1

střední rezistivita  $r_m = (r_{\perp} \cdot r_{\parallel})^{1/2}$  tj. geometrický průměr  
rezistivity v paralelení a  
kolmém směru

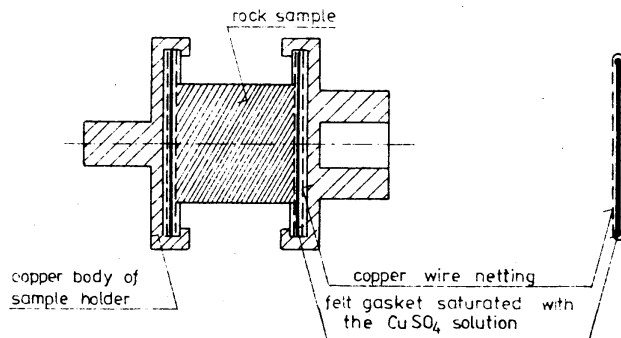
Na rozdíl od AMS nelze zatím celý tenzor měřit, většinou jen tři kolmé složky na hranolech, event. třech kolmých válcích.

# Vyzvaná polarizace

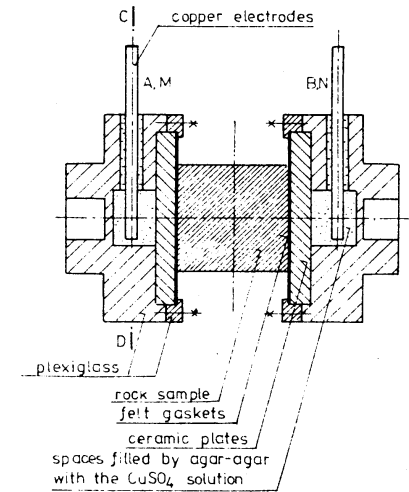
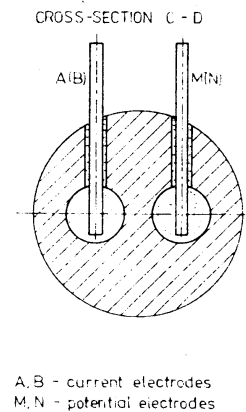
napětí zůstává po vypnutí zdroje po určitý čas

Figure 7 SCHEMATIC VIEWS OF MEASURING DEVICES FOR IP MEASUREMENTS

a) DIPOLE METHOD

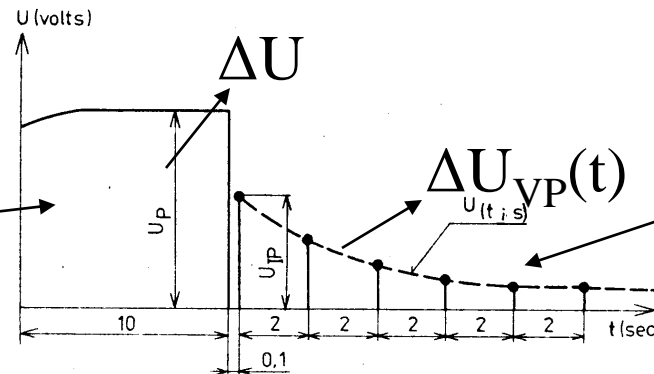


b) FOUR-POLE METHOD



!!

Napětový  
impulz



Vybíjení po  
vypnutí – časový  
průběh

# Vyzvaná polarizace 2

**Polarizovatelnost  $\eta = \Delta U_{VP}(t)/\Delta U$ . 100 %**

**Polarizovatelné minerály :** některé sulfidy, hlavně pyrit a pyrhotin, siričky s Ni  
hematit, některý magnetit  
grafit, grafitická substance

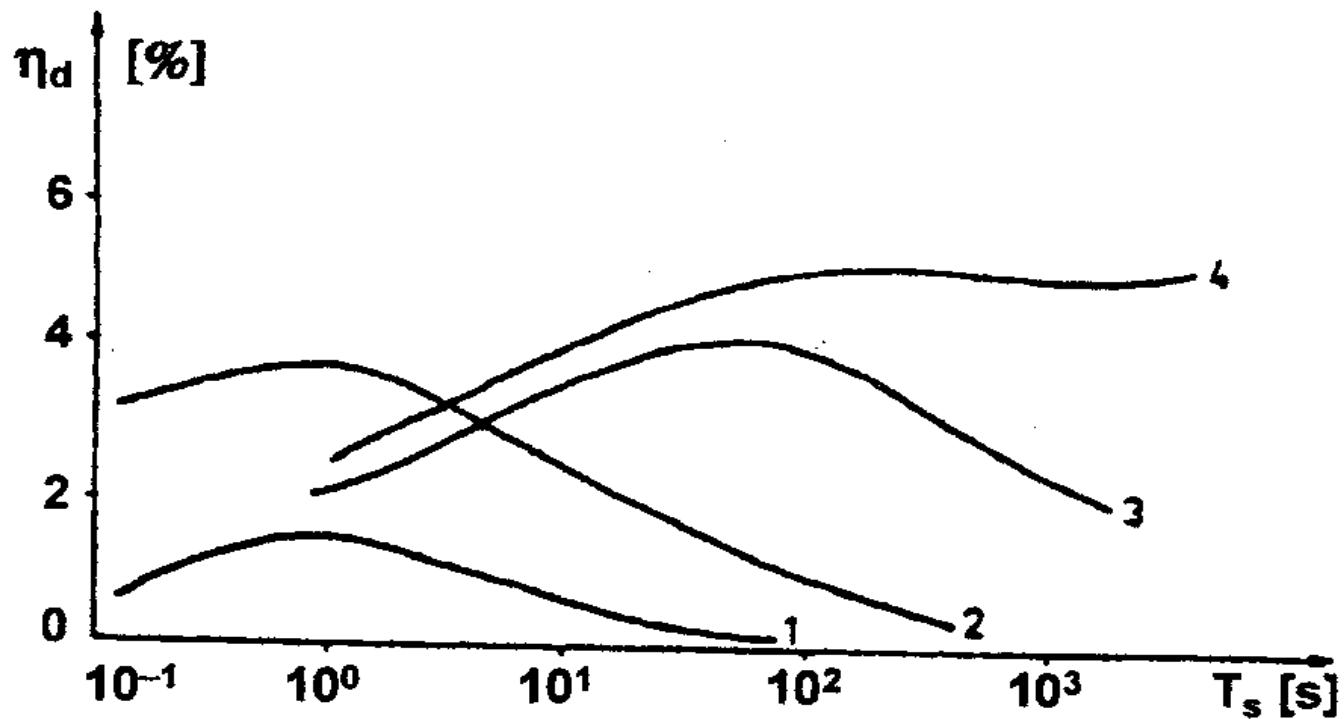
**Aplikace:** vyhledávání rudních ložisek (pyritové a pyrhotinové aureoly polymetalických rud, ložiska Fe-rud a Ni-rud)

**Časová charakteristika závisí na textuře a intenzitě zrudnění.**

Laboratorní měření (v čase 0,5 a 17 sek.) poskytuje vyšší údaje než terénní měření (asi 10x).

Polarizovatelnost stejně jako rezistivita jeví anizotropii.

# Časová charakteristika polarizovatelnosti (terén)



Obr. 4.9 Časová charakteristika polarizovatelnosti pro různé typy mineralizací: 1 – horniny bez zrudnění, 2 – jemnozrné vtroušené typy zrudnění, 3 – hrubozrné impregnační zrudnění, 4 – prožilkové a masívní typy zrudnění (Ioffe a kol., 1979)

# Piezoelektrické vlastnosti

**Piezoelektrické látky** schopné polarizace vnějším tlakem náleží do skupiny **feroelektrik**. Mají proměnlivou a extrémně vysokou permitivitu, řádově  $10^3$  až  $10^4$ . Piezoelektrický jev je vlastní jen krystalům, které nemají střed souměrnosti.

Feroelektrika obecně vykazují nelineární závislost mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole, jejíž grafický průběh je podobný hysterezní křivce feromagnetik. Podobně jako feromagnetické látky i feroelektrika ztrácejí své specifické vlastnosti po překročení kritické Curieovy teploty.

V petrofyzice byl podrobněji zkoumán pouze **piezoelektrický jev**. Projevuje se především u anizotropních minerálů, turmalínu, **křemene**, sfaleritu, nefelínu, analcimu.

Využití : tzv. akustické měniče v aparaturách na měření rychlosti elastických vln, vytvářejí kmity.

# Konduktivita ultramafických hornin - $f(T)$

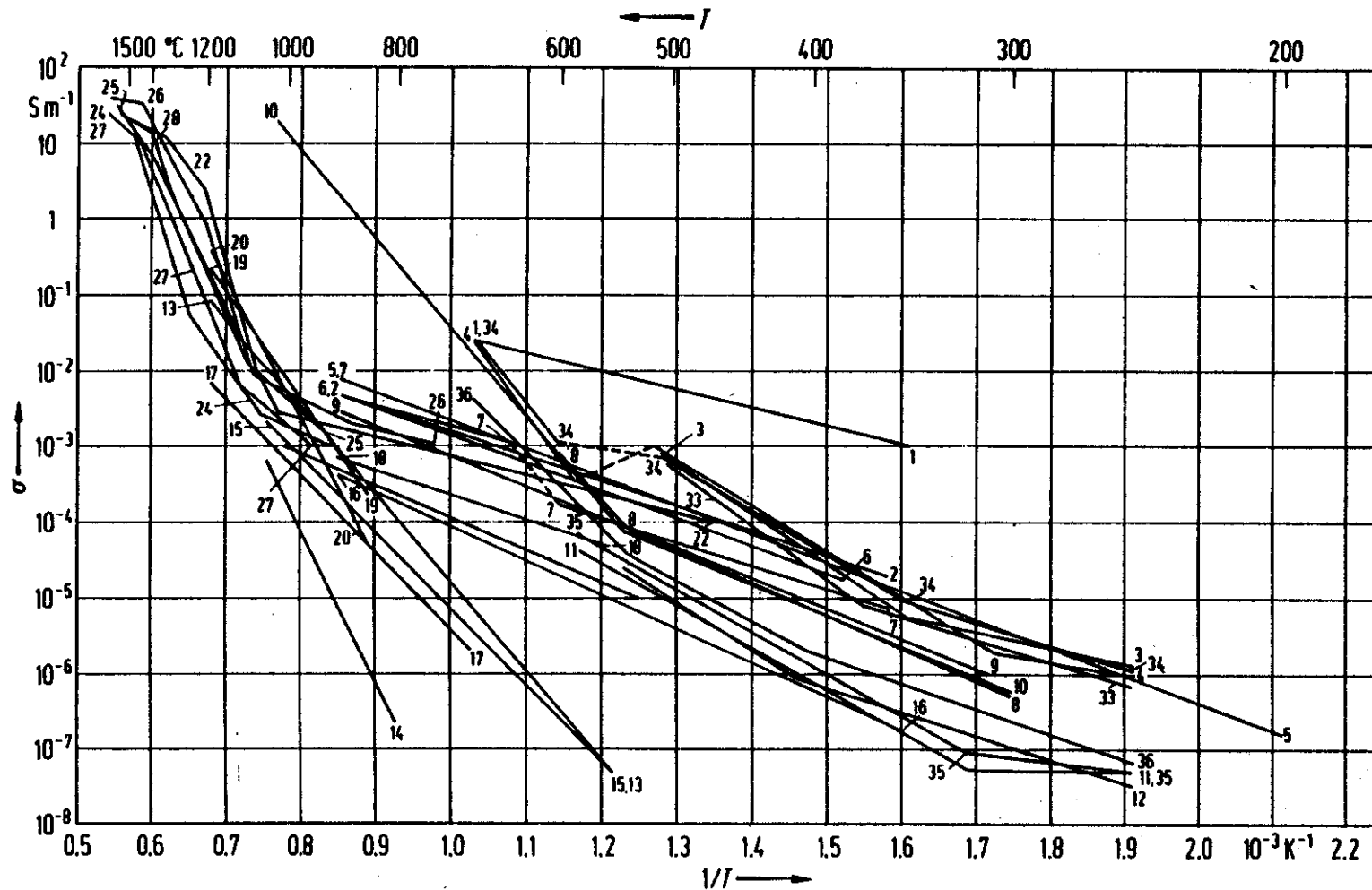


Fig. 5. Electrical conductivity of ultramafic rocks and eclogites as function of temperature. The numbers in the figure refer to the numbers of the last column of Table 3, Ultramafics.



# Konduktivita s hloubkou

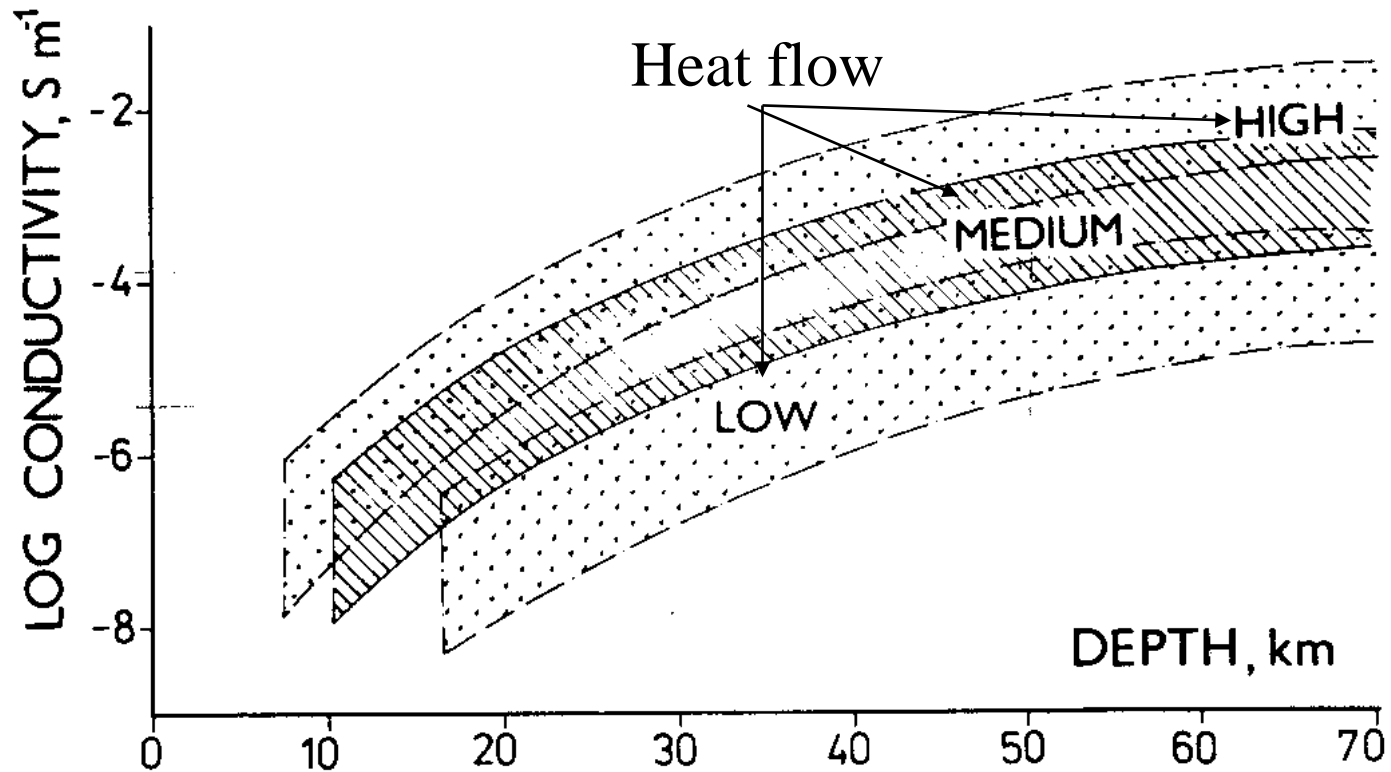


Figure 13

Probable range of electrical conductivity-versus-depth in the lithosphere for areas of low ( $\sim 40 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ), medium ( $\sim 60 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ), and high ( $\sim 80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) heat flow.