

# Petrofyzika

## Elektrické vlastnosti hornin



**Martin Chadima**  
(František Hrouda a Marta Chlupáčová)

AGICO, s.r.o., Brno ([chadima@agico.cz](mailto:chadima@agico.cz))

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Praha



ADVANCED  
GEOSCIENCE  
INSTRUMENTS  
COMPANY



Institute of Geology of the CAS, v. v. i.

**Geoelektrika** je jedním z oborů užité geofyziky.

Pro geoelektriku je charakteristický velký počet dílčích metod, z nichž mnohé mají řadu modifikací, což umožňuje horniny diferencovat podle:

**1. měrného odporu** (diferenciální vodivost či odpor)

odporové a nízkofrekvenční elektromagnetické metody

**2. permitivity** (schopnost materiálu odolávat elektrickému poli)

vysokofrekvenční elektromagnetické metody

**3. polarizovatelnosti** (schopnost hornin hromadit náboje na rozhraní kapalně a pevné fáze)

sponánní a vyzvaná polarizace

# Geoelektrika

- Elektrické vlastnosti hornin mohou být zkoumány v laboratoři na vzorcích, nebo v terénu, kde jsou horniny v přirozených úložných podmínkách.
- Např. měrný odpor hornin zjištěný laboratorně je většinou podstatně vyšší než hodnoty naměřené přímo v terénu, což je způsobeno nemožností zachovat přirozený stav odebraného vzorku, zejména jeho vlhkost a mineralizaci vod zaplňujících póry.
- Výsledky laboratorních měření slouží tedy pouze jako orientační, nejspolehlivější údaje o elektrických vlastnostech hornin poskytuje měření ve vrtech (karotáž).

# Fyzikální příčina elektrických vlastností

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

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

1. Elektronová - excentricita elektronových orbitalů vůči kladnému náboji atomového jádra
2. Atomová - posun atomů nebo iontů v krystalových mřížkách
3. Dipólová - orientace elementárních dipólů (polárních molekul) vnějším elektrickým polem
4. Elektrochemická - transport iontů ve vícefázových soustavách a vznik elektrické dvojvrstvy

# Rezistivita (konduktivita)

**Rezistivita** - materiálová konstanta charakterizující lokální (diferenciální) vodivostní či odporové vlastnosti látek vedoucích elektrický proud

Rezistivita je číselně rovna velikosti elektrického odporu homogenního vodiče s jednotkovým obsahem kolmého průřezu na jednotku délky.

Rezistivita je převrácená hodnota konduktivity (měrné vodivosti).

- **Rezistivita (měrný odpor)**
- **Konduktivita (měrná vodivost)**
- **Ohmův zákon:**  $U = IR$ , kde  $R = r \cdot l / s$
- $r$  – rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ],  $s$  - průřez,  $l$  – délka,
- $\gamma = 1/r$  – **konduktivita** [ $\Omega^{-1}m^{-1}$  nebo  $Sm^{-1}$ ] (Siemens na metr)

## Podle vodivosti el. proudu rozlišujeme

- **Vodiče**: vodivost elektronová (kovy), iontová (elektrolyty)
- **Polovodiče**: elektronová, děrová
- **Dielektrika** (*nevodiče, izolátory*): vodivá jen pro střídavý proud

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       $10^{16}$  až  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$        $r < 10^{-5} \text{ do } 10^3 > \Omega \cdot \text{m}$

Vodiče       $> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$        $r < 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$

Dielektrika       $< 10^{15} \text{ cm}^{-3}$        $r > 10^4 \Omega \cdot \text{m}$

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

## Hlavní horninotvorné minerály = dielektrika

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	$10^9 - 10^{11}$

## Rudní minerály většinou polovodiče

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	$10^1 - 10^4$	wolframit	$10 - 10^5$

## Přírodní vodiče

zlato, stříbro, měď, platina

voda	$10^{-1} - 10^3$	led	$4,7 \cdot 10^5 - 6,7 \cdot 10^5$
------	------------------	-----	-----------------------------------

## Rezistivita hornin závisí na

- objemu vodivé složky v hornině
- její vodivosti
- způsobu distribuce, tedy strukturu (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)
- vodivé rudní minerály
- grafit (sedimenty, metamorfity)
- jílové minerály (sedimenty, alterované zóny)



# Rezistivita: 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) :

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

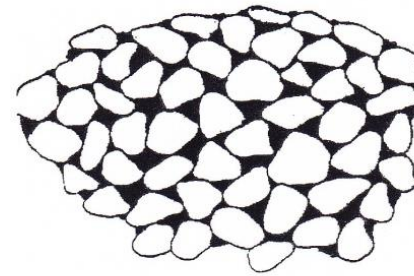
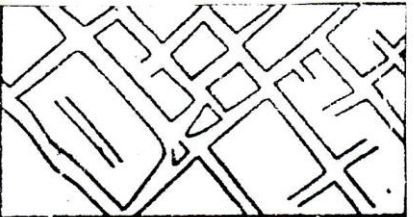
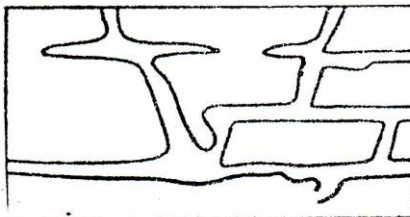
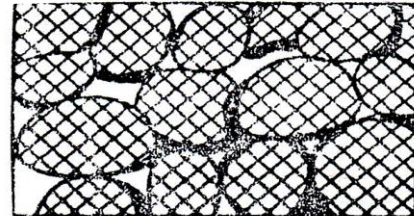
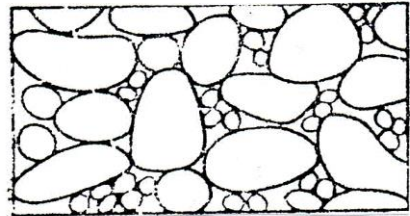
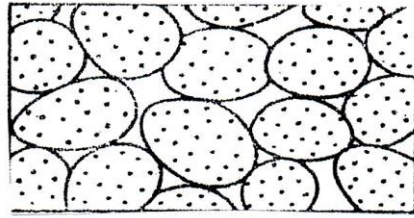
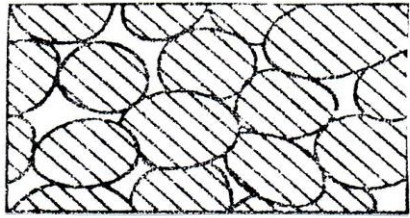
$p$  - pórovitost,  $a$  - strukturní součinitel,  $b$  – cementační faktor

V případě částečného zaplnění pórového prostoru byla stanovena

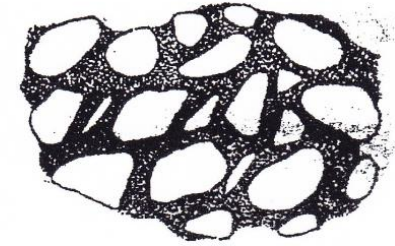
následující závislost  $r = m S_w^{-n} F r_w$

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

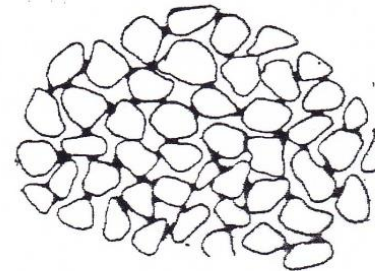
# Rezistivita: Pórovitost sedimentů



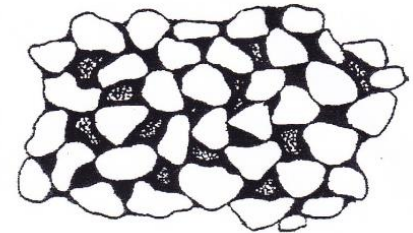
Obr. 5. Basální tmel



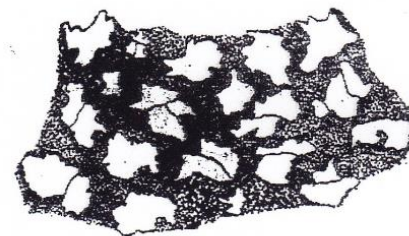
Obr. 6. Pórový tmel



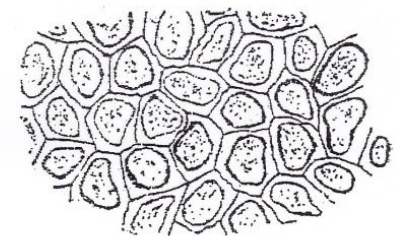
Obr. 7. Kontaktní tmel



Obr. 8. Výplňkový tmel



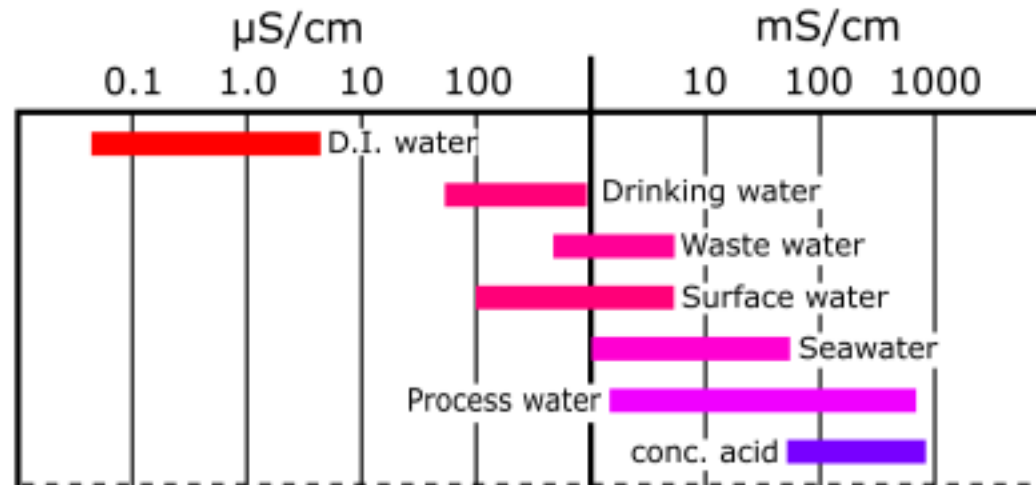
Obr. 9. Korosní tmel



Obr. 10. Regenerační tmel

# Rezistivita: Rezistivita vodných roztoků

Water	$\rho$ ( $\Omega$ cm)
Pure water	20,000,000
Distilled water	500,000
Rain water	20,000
Tap water	1,000-5,000
River water (brackish)	200
Sea-water (coastal)	30
Sea-water (open sea)	20-25

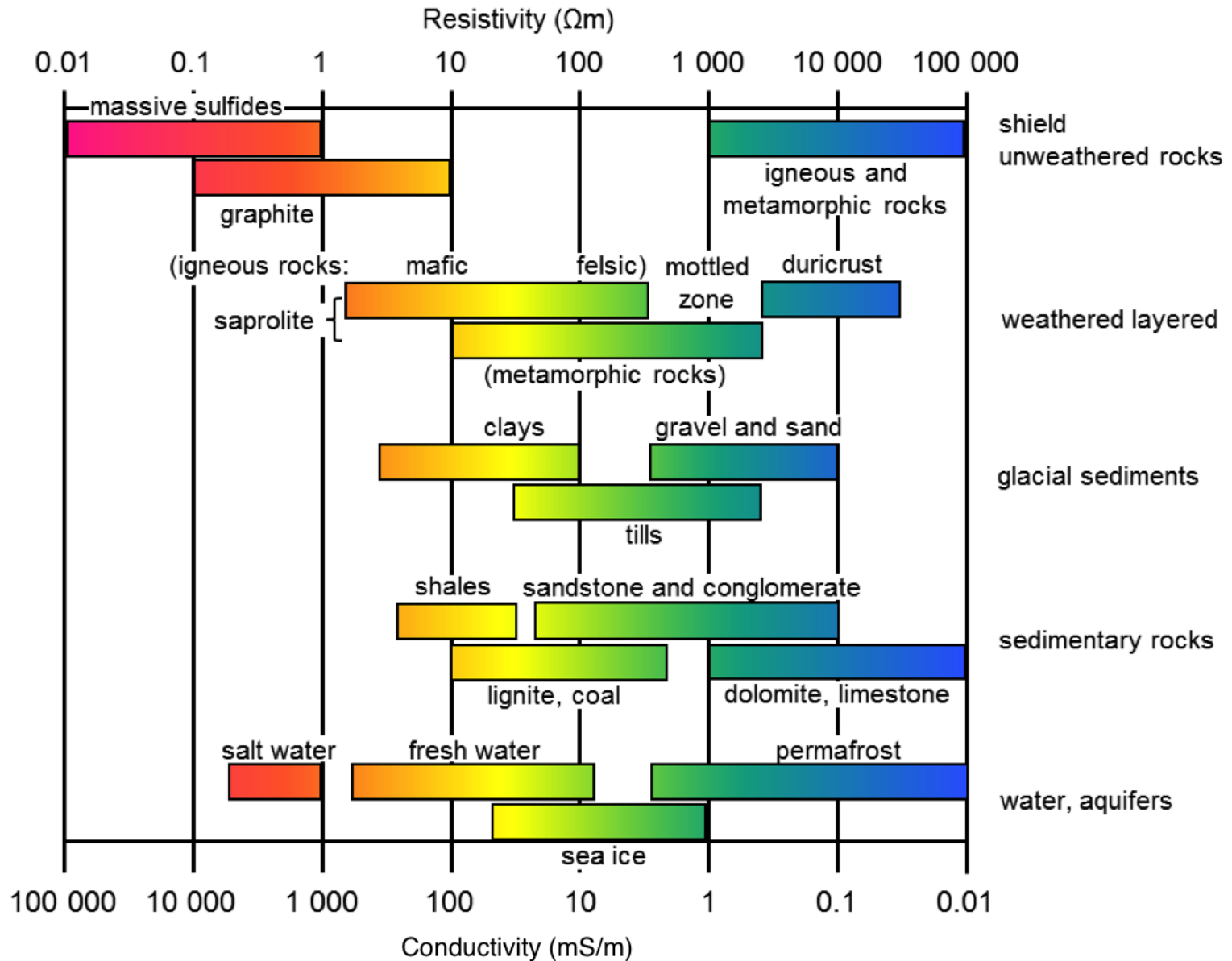


# Rezistivita hornin [ $\Omega\text{m}$ ]

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.

# Rezistivita (konduktivita) hornin



# Rezistivita: 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 vodivost vyvolaná pohybem iontů v krystalové mřížce. Celkem se rezistivita mění a klesá asi o 6 řádů a stejně narůstá tedy vodivost.

# Rezistivita: Závislost na tlaku

- Je různá, závisí na pórovitosti. Zmenšuje-li se pórovitost, rezistivita stoupá, klesá vliv elektrolytu.
- Při vysokých tlacích dochází ke sblížování a rozšiřování vodivostních pásů a zvýšení vodivosti.
- Vcelku je změna rezistivity vlivem tlaku méně významná než změna teplotní.

# Rezistivita: 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  $\lambda = (r_{klm}/r_{prl})^{1/2}$  vždy větší než 1

střední rezistivita  $r_m = (r_{prl} \cdot r_{klm})^{1/2}$  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.



# Permitivita (dielektrická konstanta)

- Permitivita vyjadřuje schopnost materiálu odolávat elektrickému poli.
- 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  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ , kde  $\epsilon_0$  - permitivita vakua =  $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

- 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 pyroluzit (burel,  $\text{MnO}_2$ ).
- 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  $10^6 \text{ Hz}$ .

# Polarizovatelnost

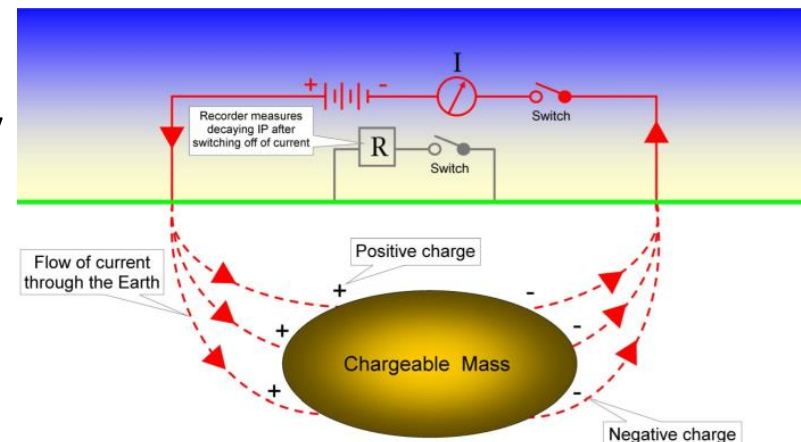
**Polarizovatelnost** vyjadřuje schopnost hornin hromadit náboje na rozhraní kapalně a pevné fáze

## Spontánní polarizace

- Využívá měření přirozených elektrických proudů v zemi, které jsou vyvolány elektrochemickou aktivitou některých minerálů (sulfidy, grafit), což umožňuje výskyt takových minerálů zjistit a mapovat.
- Sledování filtračních potenciálů vzniklých při proudění podzemní vody pórovitým horninovým prostředím; tak je možno zjistit směr proudění podzemní vody, místa úniků vody a skryté vývěry.

## Vyzvané polarizace

- polarizace vyvolána proudovými impulzy



Induced Polarisation

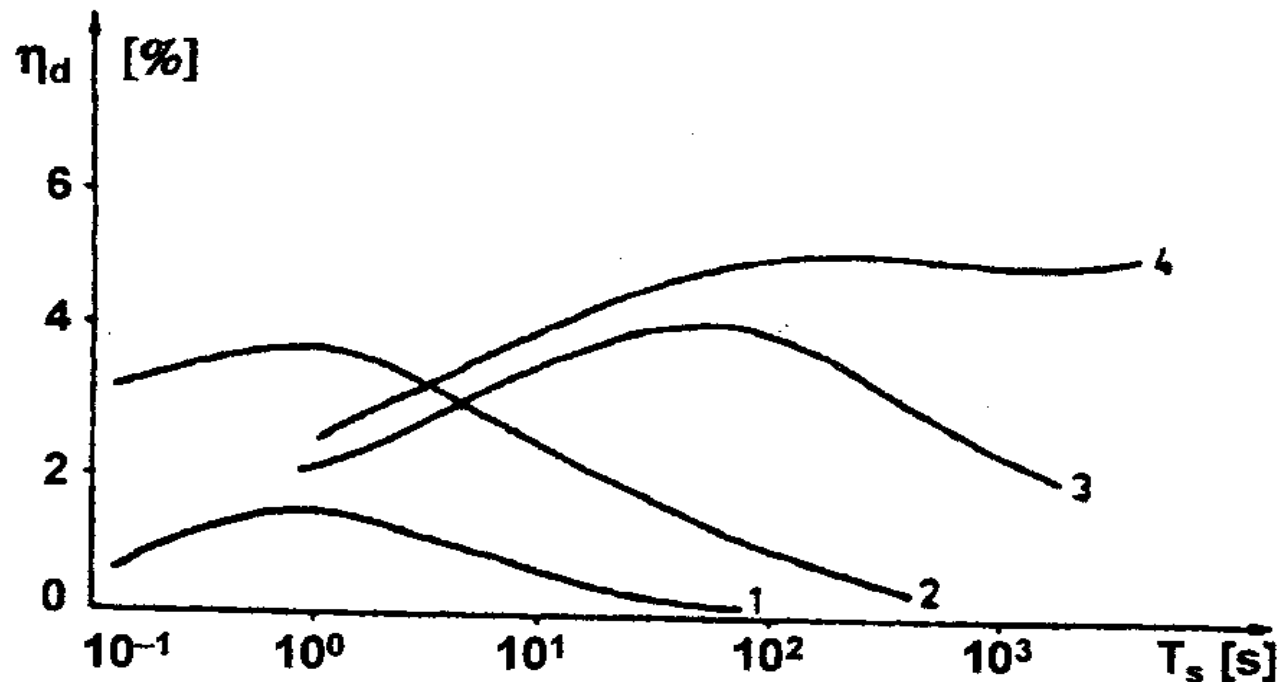
Adapted from: Bleil, D. F., 1953, Induced polarisation: A method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 636-661.

## Polarizovatelné minerály

- některé sulfidy (hlavně pyrit a pyrhotin)
- sirníky s Ni
- hematit, magnetit
- grafit a 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

Na základě rozdílné časové konstanty, získané ze studia dynamických (časových) charakteristik polarizovatelnosti, můžeme rozlišit jednotlivé typy zrudnění podle zrnitosti



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)

# Piezelektrické vlastnosti

**Piezelektrické látky** schopné polarizace vnějším tlakem náleží do skupiny **feroelektrik**. Mají proměnlivou a extrémně vysokou permitivitu, řádově  $10^3$  až  $10^4$ . Piezelektrický 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 **piezelektrický jev**. Projevuje se především u anizotropních minerálů, turmalínu, **křemene**, sfaleritu, nefelínu, analcimu.

## Využití

- akustické měniče v aparaturách na měření rychlosti elastických vln