

# GEOELEKTRICKÉ METODY

Elektromagnetické pole;

měrný el. odpor, permitivita, polarizovatelnost

**Dělení** podle různých kritérií:

charakter elektromagnetického pole: stejnosměrné - střídavé (harmonické  
- neharmonické)

charakter zdroje: přirozený - umělý

místo měření: povrchové, letecké, vrtní, důlní

V praxi se nejčastěji používá dělení na

STEJNOSMĚRNÉ

ELEKTROCHEMICKÉ

ELEKTROMAGNETICKÉ

**Stejnoseměrné metody:** 1. odporové: - odporové profilování  
- vertikální elektrické sondování (VES)

2. potenciálové: sleduje se elektrický potenciál nebo jeho gradient

**Elektrochemické metody:** metoda spontánní polarizace (SP)  
metoda vyzvané polarizace (VP)

**Elektromagnetické metody:**

1. využívající jev elektromagnetické indukce (různé varianty podle typu zdroje, frekvence atd., profilování nebo sondování)  
Obvykle se měří magnetická složka pole.

2. měření času příchodu odražených elektromagnetických vln  
radar (GPR)

# Hlavní používané fyzikální veličiny:

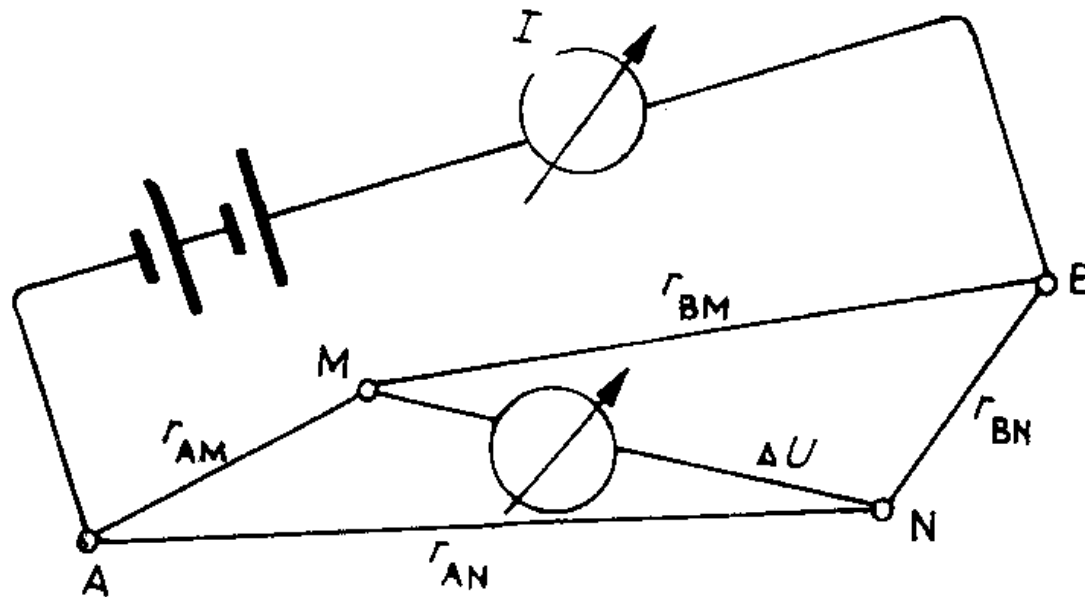
Název	Označení	Jednotka
napětí	U	volt (V)
elektrický proud	I	ampér (A)
měrný odpor	$\rho$	ohm metr ( $\Omega\text{m}$ )
měrná vodivost	$\gamma$	siemens na metr (S/m)
polarizovatelnost	$\eta$	procenta (%)
intenzita magnetického pole	H	ampér na metr (A/m)
dielektrická konstanta	K	bezrozměrné číslo
rychlost šíření elektromagnetických vln	v	metr za sekundu (m/s) <i>metr za nanosekundu (m/ns)</i>
frekvence	f	hertz (Hz)
kruhová frekvence	$\omega$	hertz (Hz)
	$\omega = 2\pi f$	

# ODPOROVÉ METODY - TEORIE

Ohmův zákon:  $\Delta U = \rho \cdot I$

Potenciál bodového zdroje:  $U = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot r}$

Pro homogenní poloprostor:



$$\Delta U = \underbrace{(U_M^A - U_M^B)}_{\substack{\text{ÚČINEK ELEKTROD} \\ \text{A,B v bodě M}}} - \underbrace{(U_N^A - U_N^B)}_{\substack{\text{ÚČINEK ELEKTROD} \\ \text{A,B v bodě N}}} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{AM}} \right)$$

MĚRNÝ EL.ODPOR HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ  
(ZDÁNĹIVÝ MĚRNÝ ODPOR):

$$\rho = \frac{\Delta U}{I}$$

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{AM}}} \quad \dots \text{konstanta uspořádaní}$$

## Měrné odpory sedimentů

Hornina, ruda	Měrný odpor $\rho$ ( $\Omega$ m)
Sedimentární horniny	
hlíny	$10^{-1}$ až $10^2$
jíly	10 až $10^2$
písky	$10^2$ až $10^4$
písky nasycené minerální vodou	$10^{-1}$ až 10
pískovce	$10^2$ až $10^4$
vápence	$10^2$ až $10^4$
opuky	10 až $10^2$
slepence	10 až $10^4$
sádrovce	$10^4$ až $10^6$

# Měrné odpory magmatitů, metamorfitů a rud

Magmatické a metamorfované horniny	
žula, syenit	$10^2$ až $10^5$
diabas, čedič, gabro	$10^2$ až $10^5$
krystalické břidlice	$10^2$ až $10^4$
jílovité břidlice	$10$ až $10^3$
křemence	$10^3$ až $10^5$
mramory	$10^2$ až $10^5$
ruly	$10^2$ až $10^4$
Rudy	
chalkopyritové zrudnění	$10^{-4}$ až $10^{-1}$
galenitové zrudnění	$10^{-2}$
arzenopyritové zrudnění	$10^{-1}$
hematitové zrudnění	$10^{-1}$ až $10^2$
chromitové zrudnění	$10^3$
wolframitové zrudnění	$10^3$ až $10^4$
antimonitové zrudnění	$10^3$ až $10^7$

# Základní typy uspořádání elektrod při odporovém profilování

DVOUBODOVÉ  
POTENCIÁLOVÉ



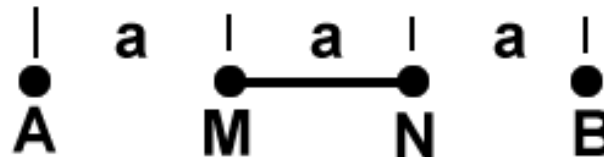
$$k = \lambda \pi \cdot r_{AM}$$

TŘÍBODOVÉ  
GRADIENTOVÉ



$$k = \lambda \pi \frac{r_{AM} \cdot r_{AN}}{r_{AN} - r_{AM}}$$

SYMETRICKÉ  
WENEROVO



$$k = \lambda \pi \cdot a$$

SYMETRICKÉ  
SCHLUMBERGEROVO

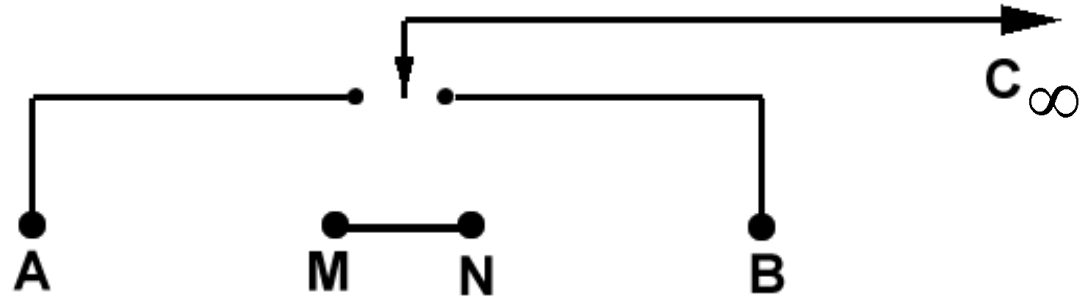


$$k = \lambda \pi \frac{r_{AM} \cdot r_{AN}}{2(r_{AN} - r_{AM})}$$



**z třibodového gradientového:**

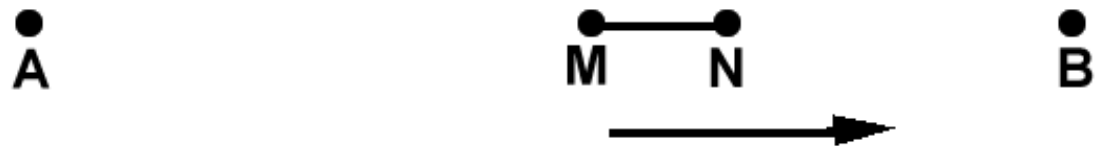
**KOMBINOVANÉ  
PROFILOVÁNÍ**



**DIPÓLOVÉ  
PROFILOVÁNÍ**

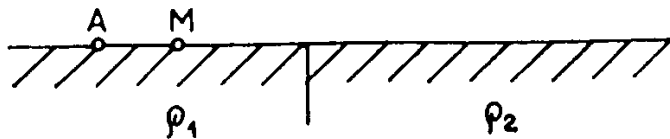
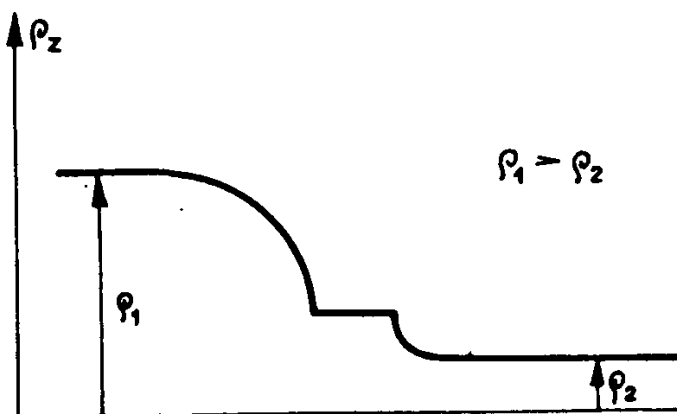
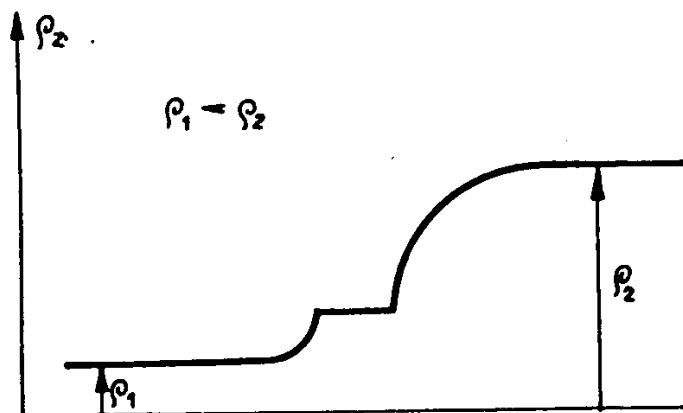


**METODA  
STŘEDOVÉHO  
GRADIENTU**

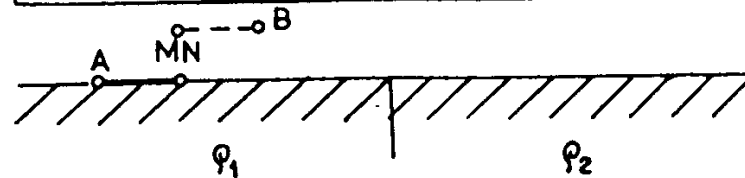
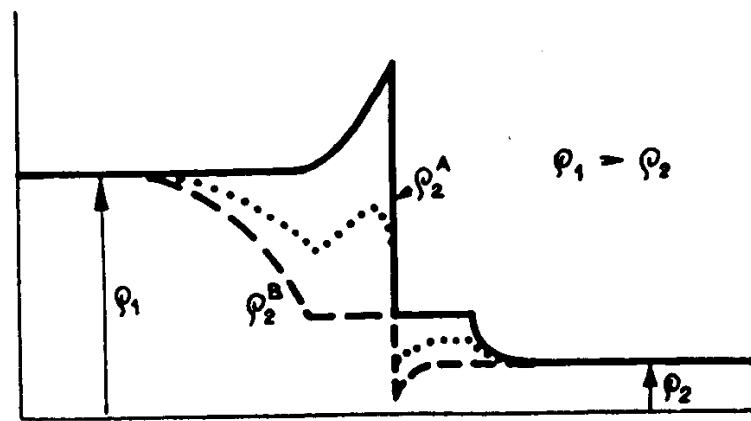
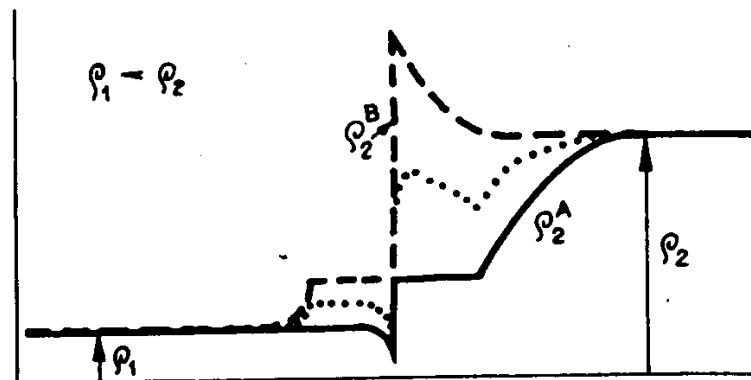


# Odporové profilování nad kontaktem

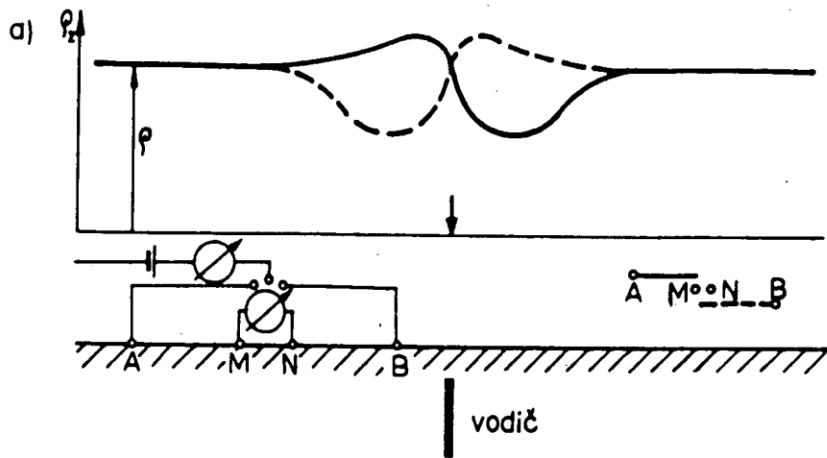
dvoubodové potenciálové



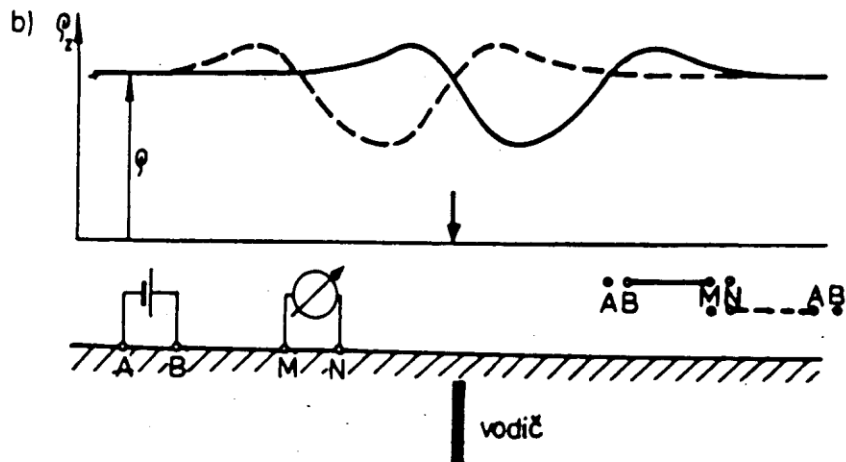
kombinované



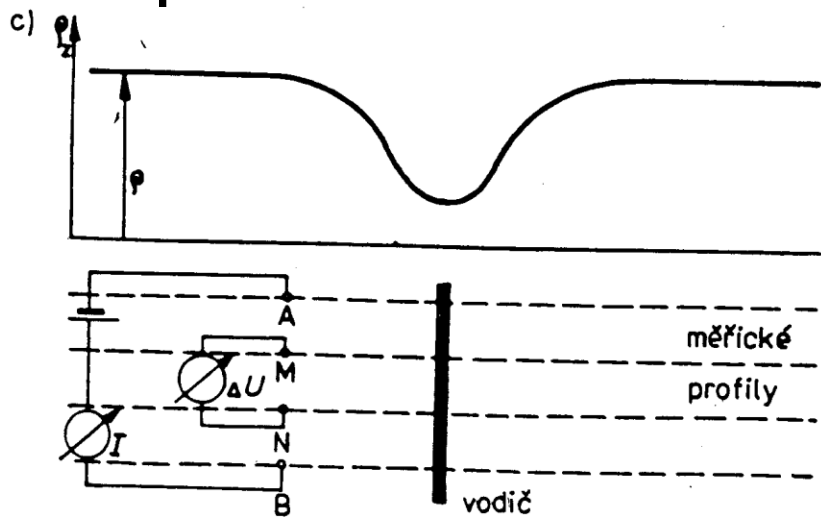
## kombinované



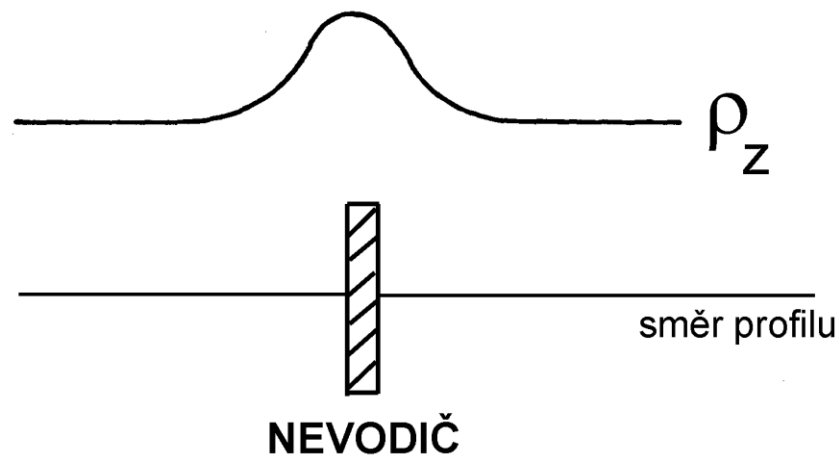
## dipólové



## symetrické Wennerovo s kolným uspořádáním elektrod



## metoda středového gradientu



# VERTIKÁLNÍ ELEKTRICKÉ SONDOVÁNÍ (VES)

Předpokládá horizontálně zvrstvené prostředí.

Symetrické Schlumbergerovo uspořádání, dipólové usp.

Typy křivek - podle počtu vrstev

třívrstevné:

$$\mathbf{H} \quad \rho_1 > \rho_2 < \rho_3$$

$$\mathbf{K} \quad \rho_1 < \rho_2 > \rho_3$$

$$\mathbf{Q} \quad \rho_1 > \rho_2 > \rho_3$$

$$\mathbf{A} \quad \rho_1 < \rho_2 < \rho_3$$

čtyřvrstevné

HK, QK atd.

Geofyzika n.p.; závod Brno, Poděbradova 102; komplexní skupina č.:

Lokalita:

Profil:

VES č.:

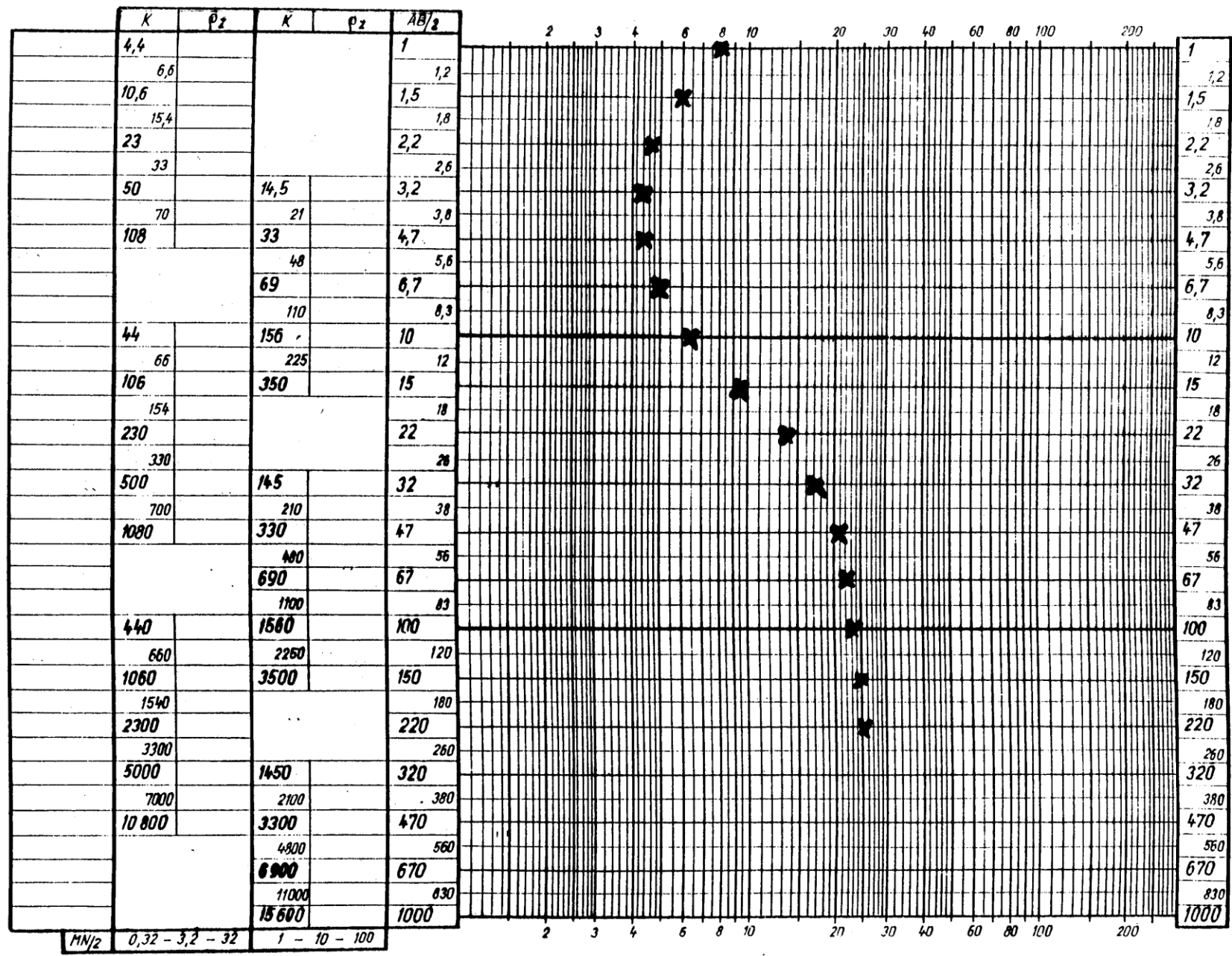
Měřil:

Datum:

Pk:

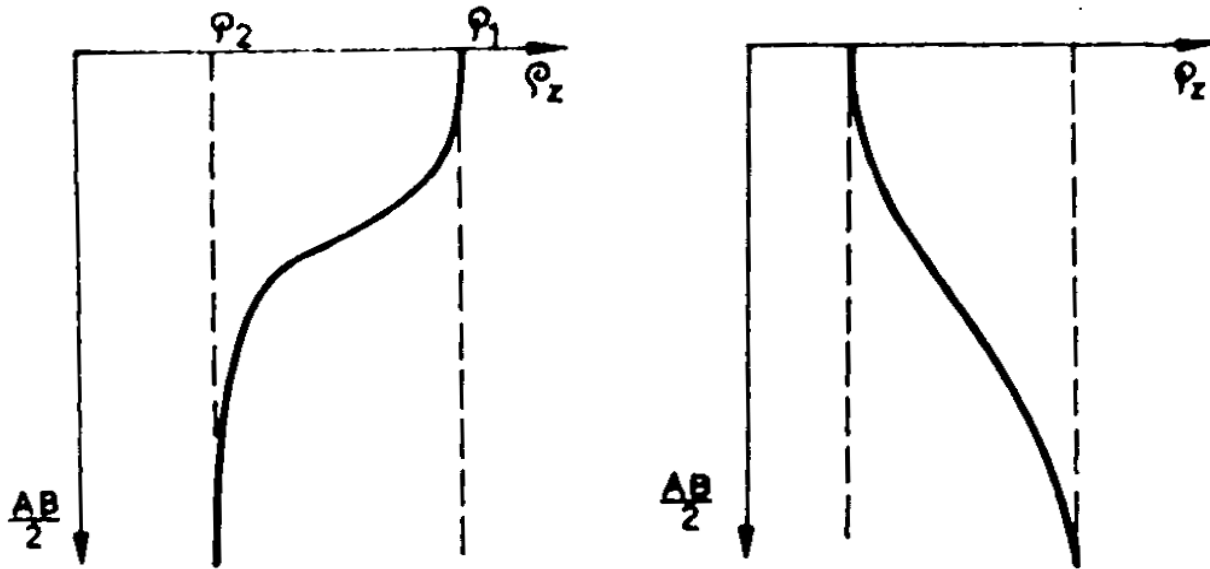
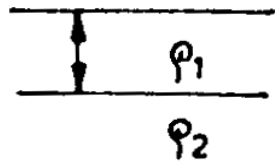
Přístroj:

Počítal:

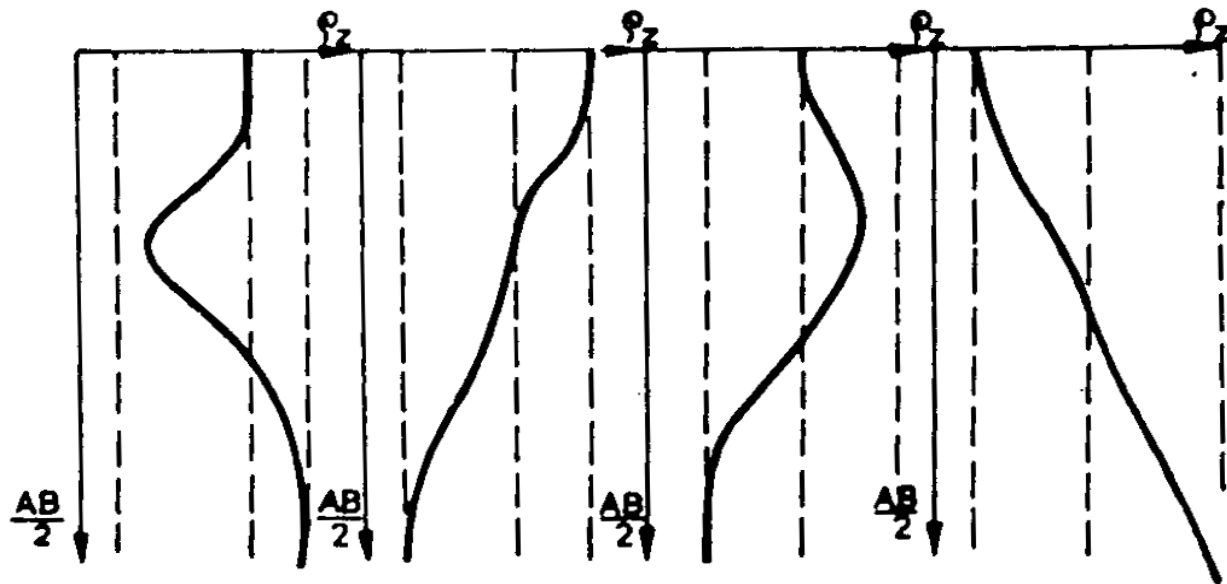
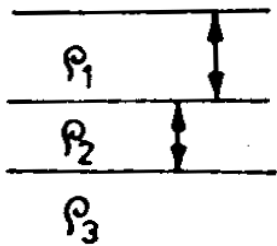


MN/2 0,32 - 3,2 - 32 1 - 10 - 100

a)



b)



H

Q

K

A

**Interpretace: - pomocí nomogramů**  
**- řešení obrácené úlohy pomocí počítače**

**Princip mnohoznačnosti - stejný účinek vrstev s konstantní podélnou vodivostí  $h/\rho$  nebo příčným odporem  $h\rho$ .**

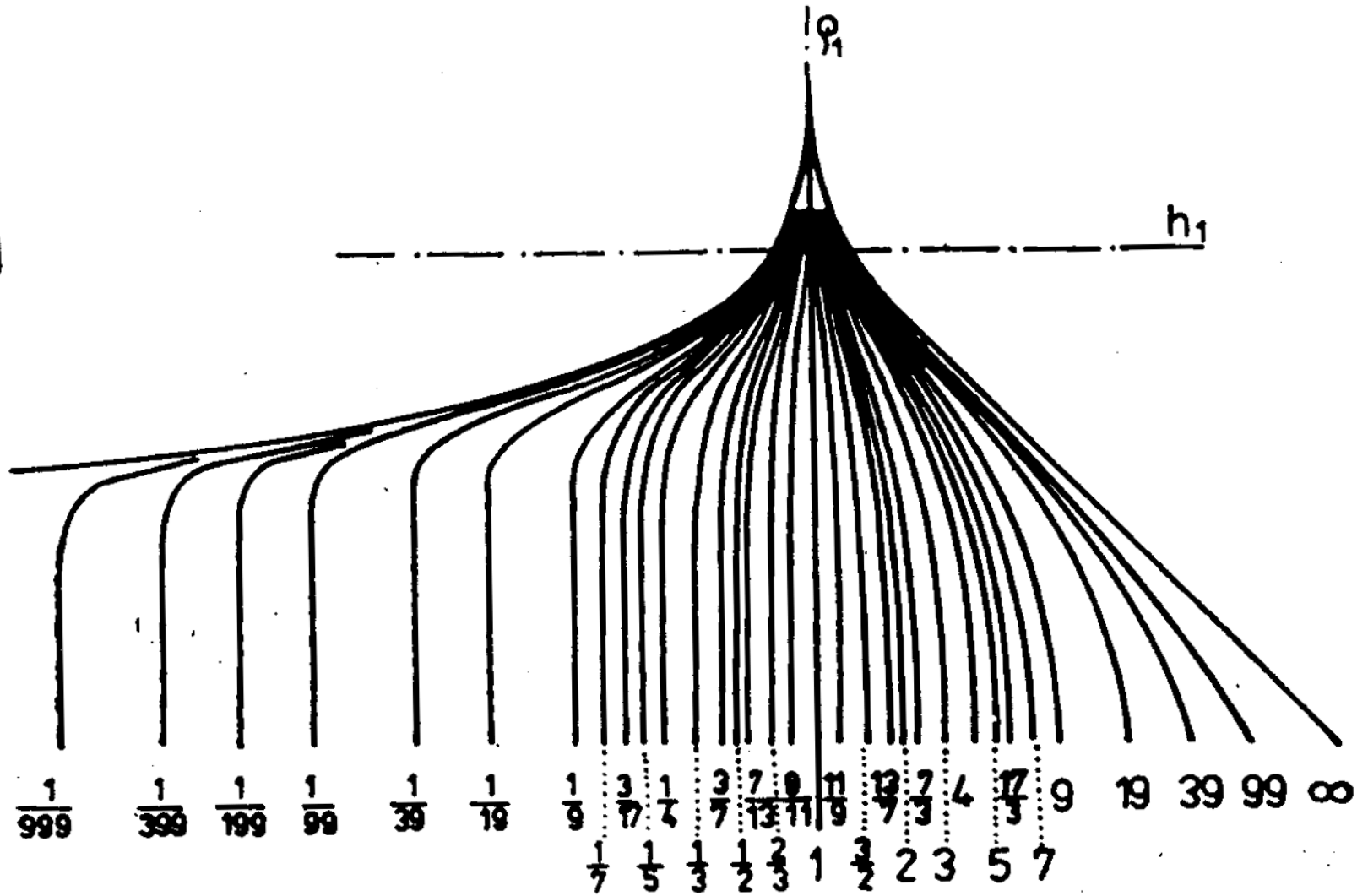
**Výstupy:**

- hloubkový řez zdánlivého měrného odporu**
- mapy izolinií zdánlivého měrného odporu pro různé hodnoty  $AB/2$**

**Aplikace:**

- struktura sedimentárních pánví (uhlí, ropa a plyn)**
- hydrogeologie (hladina spodní vody)**
- standardní součást komplexu metod**

c)





**Interpretace:** - pomocí nomogramů  
- řešení obrácené úlohy pomocí počítače

**Princip mnohoznačnosti** - stejný účinek vrstev s konstantní podélnou vodivostí  $h/\rho$  nebo příčným odporem  $h\rho$ .

**Výstupy:**

- hloubkový řez zdánlivého měrného odporu
- mapy izolinií zdánlivého měrného odporu pro různé hodnoty  $AB/2$

**Aplikace:**

- struktura sedimentárních pánví (uhlí, ropa a plyn)
- hydrogeologie (hladina spodní vody)
- standardní součást komplexu metod

# POTENCIÁLOVÉ METODY

## Metoda nabitého tělesa

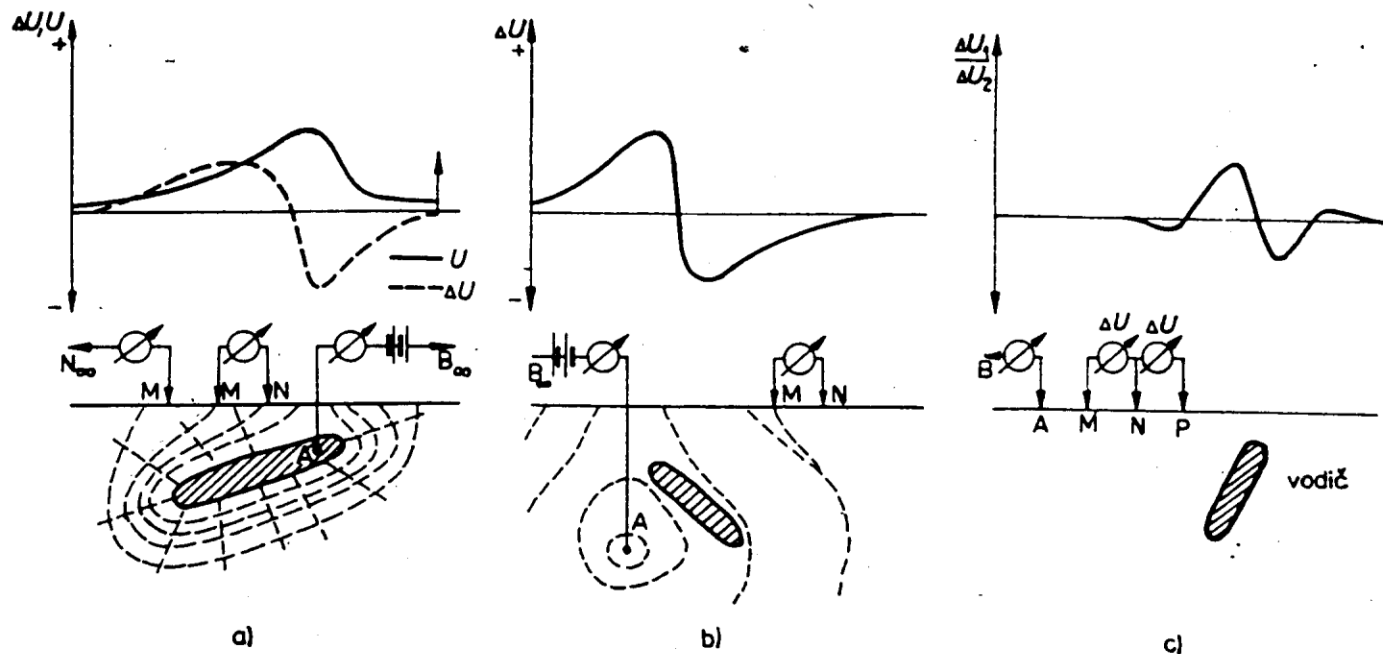
Tvar a úložní poměry rudních těles zastižených vrtem nebo báňským dílem

## Metoda ponořené elektrody

„Ponořená elektroda“ ve vrtu, měření na povrchu. Vyhledávání rudních těles.

## Metoda poměru gradientů potenciálu

Zjišťuje se  $\Delta U_{NP}/\Delta U_{MN}$ , k vyhledávání nevodivých žil.



Obr. 33. Princip potenciálových metod

a) metoda nabitého tělesa, b) metoda ponořené elektrody, c) metoda poměru gradientů potenciálu

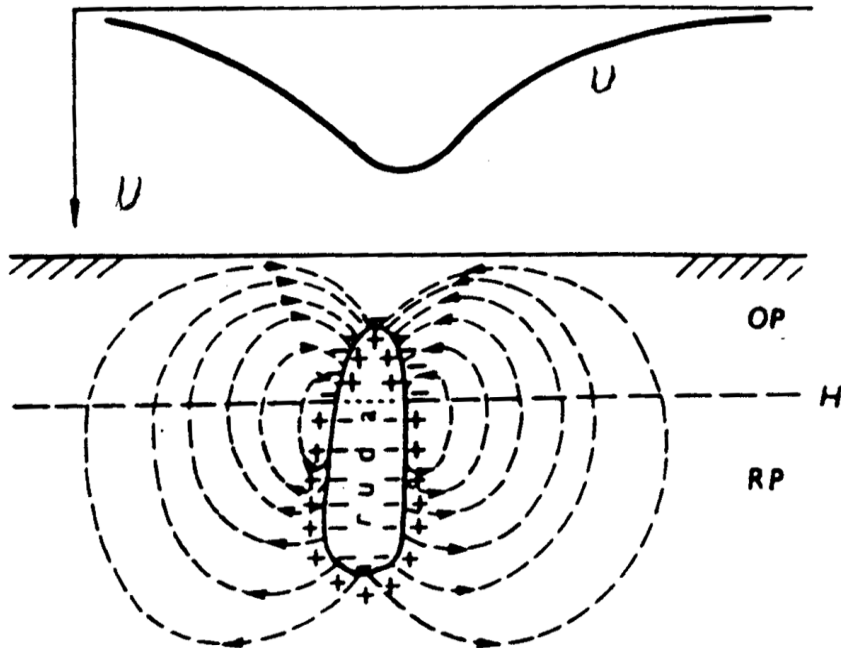
## METODA SPONTÁNNÍ POLARIZACE

Přirozená elektrická pole lokálního charakteru – původ:

- elektrochemický - okolí grafitových a rudních těles
- filtrační
- difúzní -- hydrogeologie, inženýrská geologie

**Měření:** milivoltmetry s velkým vstupním odporem (anomálie dosahují první desítky milivoltů)

nepolarizovatelné elektrody



Obr. 250. Vznik přirozených elektrochemických polí v okolí rudního tělesa  
OP – oxidační prostředí;  
RP – redukční prostředí;  
H – hladina podzemní vody;  $\nabla U$  průběh potenciálu na povrchu

## METODA VYZVANÉ POLARIZACE

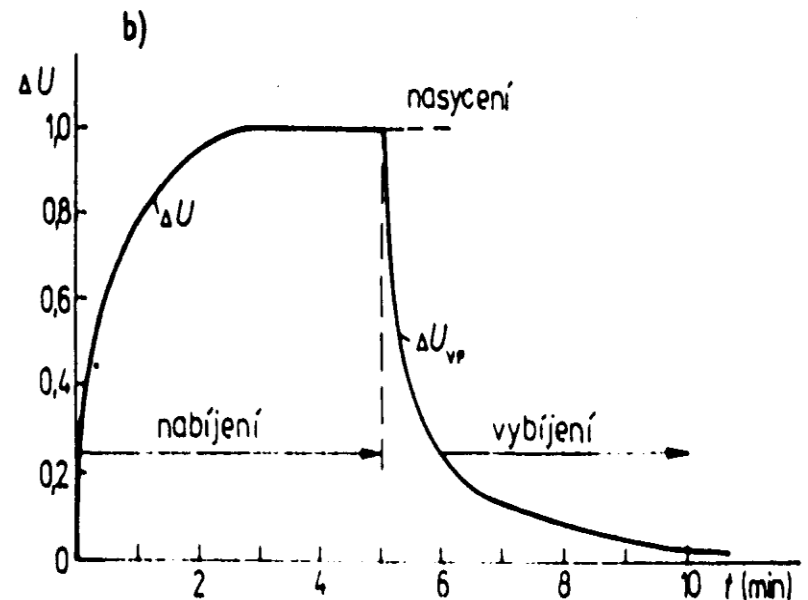
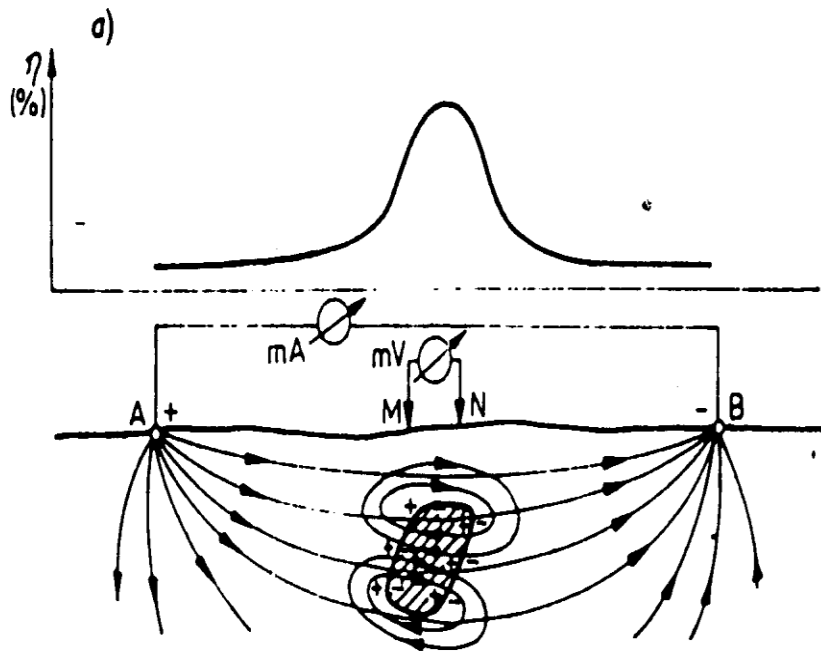
Využívá elektrochemické jevy v hraniční vrstvě mezi tuhou a kapalnou fází prostředí.

Rudní těleso kompaktní: POVRCHOVÁ polarizace

Vtroušené zrudnění: OBJEMOVÁ polarizace

zdánlivá polarizovatelnost  $\eta_z = 100 (\Delta U_{VP} / \Delta U) [\%]$

plus určení zdánlivého měrného odporu jako v odporových metodách.



# ELEKTROMAGNETICKÉ METODY

## - Využití jevu elektromagnetické indukce

Primární pole indukuje ve vodičích v zemi sekundární pole, na povrchu se měří  
jejich součet = VÝSLEDNÉ POLE

### **Metoda TURAM: zdroj statický, přijímač pohyblivý**

Zdroj: obdélníková smyčka nebo „nekonečný“ kabel.

Frekvence v rozsahu 200 - 2000 Hz

Měření: dvěma vertikálními cívkami s konstantním rozestupem 20 až 40 m

- poměr vertikálních složek magnetického pole
- fázový rozdíl mezi složkami

Pro vyhledávání vodičů; při vyšším měrném odporu okolních hornin se používá vyšší frekvence a naopak.

Metoda TURAM: zdroj statický, přijímač pohyblivý

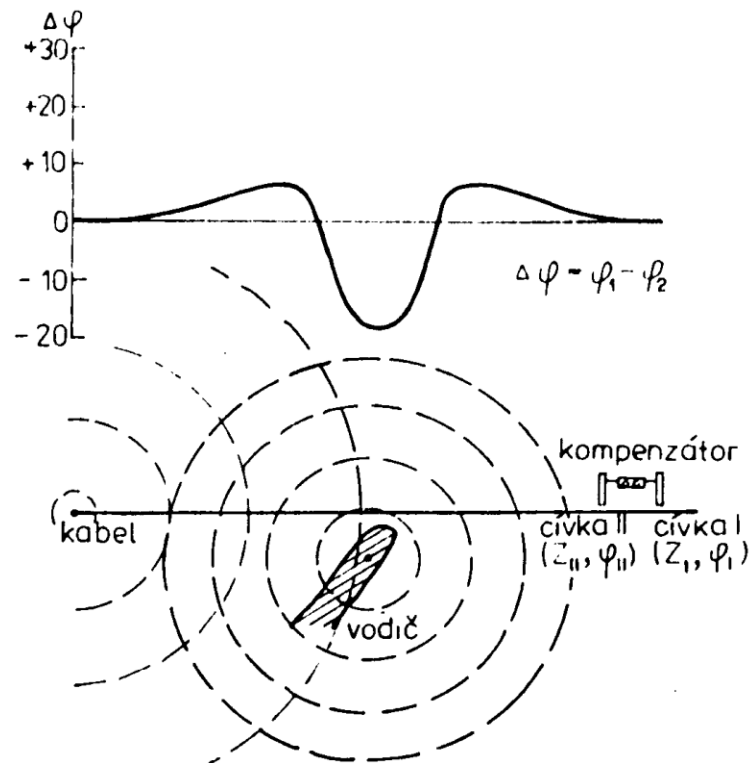
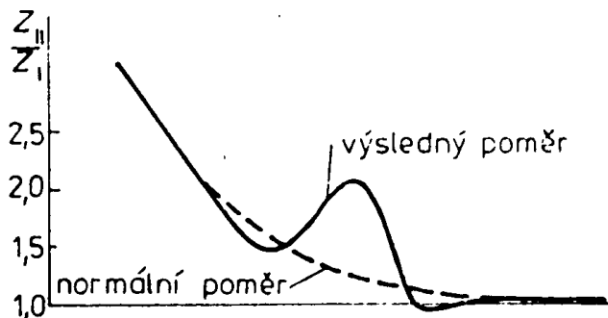
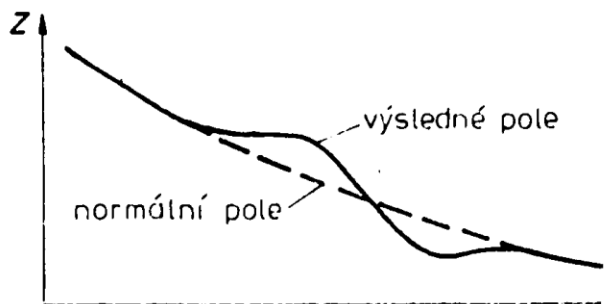
Zdroj: obdélníková smyčka nebo „nekonečný“ kabel.

Frekvence v rozsahu 200 - 2000 Hz

Měření: dvěma vertikálními cívkami s konstantním rozestupem 20 až 40 m

- poměr vertikálních složek magnetického pole
- fázový rozdíl mezi složkami

Pro vyhledávání vodičů; při vyšším měrném odporu okolních hornin se používá vyšší frekvence a naopak.

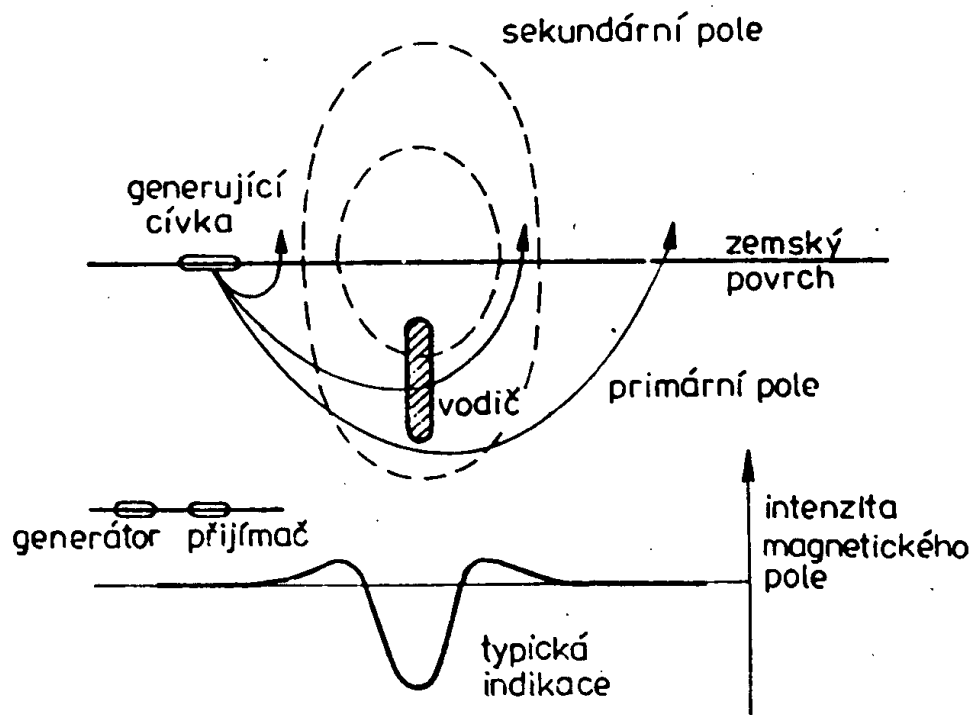


## Metoda SLINGRAM:

Vysílač i přijímač se pohybují po profilu s konstantním rozestupem (desítky metrů).

Měří se vertikální složka magnetického pole, určuje se fázové zpoždění vzhledem k poli primárnímu resp. reálná a imaginární část výsledného pole.

Existují i složitější varianty měření s pohyblivým zdrojem.

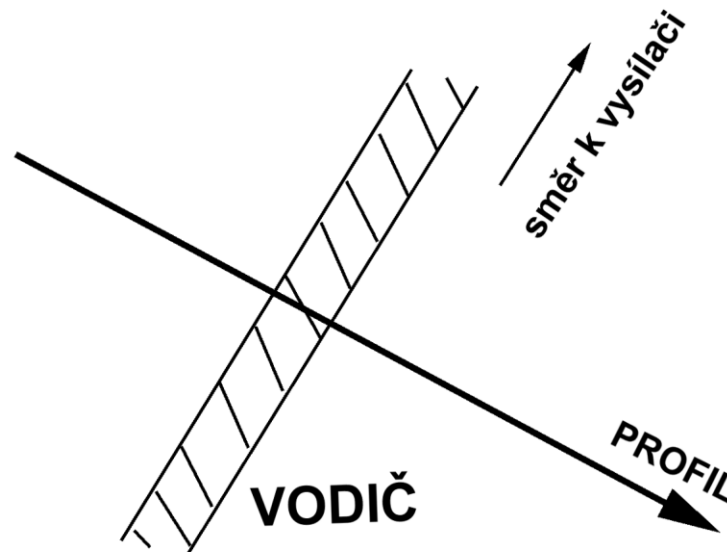


# Metoda velmi dlouhých vln (VDV) ULF in English literature

Frekvence 18 až 24 kHz - speciální radiostanice pro navigaci ponorek.

Primární magnetické pole má pro vzdálený zdroj pouze horizontální složku, stanice se volí tak, aby tato složka byla rovnoběžná s profilem (ten se volí kolmo na předpokládaný směr vodivých geologických struktur).

**Měří se reálná a imaginární část** sekundárního magnetického pole v procentech primárního pole (kompenzačním způsobem pomocí dvou kolmých cívek).





## VDV - zpracování: **gradient reálné části anomálie**

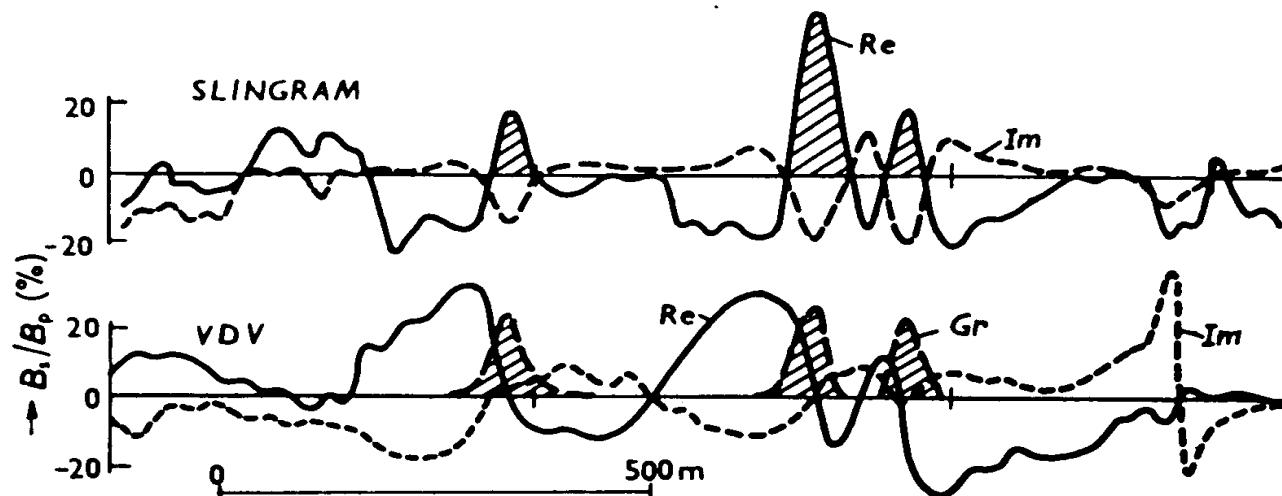
$$\mathbf{GR = Re1 + Re2 - Re3 - Re4}$$

kde Re1 až Re4 jsou sobě následující hodnoty na profilu.

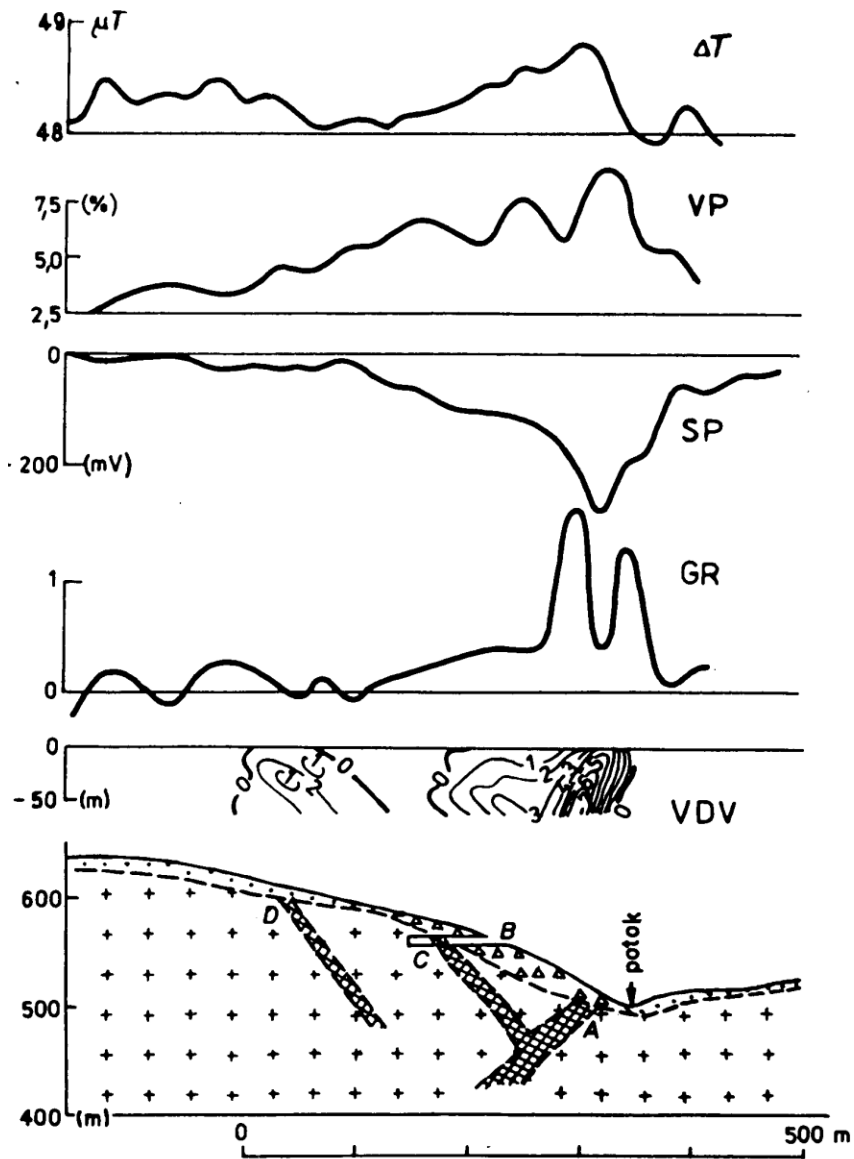
GR má maximum nad vodičem.

Řezy **zdánlivé proudové hustoty** pro posouzení tvaru a hloubkového dosahu vodičů (určuje se z reálné složky).

Odporová varianta - založená na současném měření elektrické složky pole dvojicí elektrod ve směru profilu.



Obr. 285. Porovnání výsledků metody slingram a VDV z lokality Zlaté Hory – Osikový vrch



Obr. 229. Odporová gradientová křivka v komplexu geofyzikálních metod (Sobotínský amfibolitový masív) s interpretovaným geoelektrickým řezem  $\Delta T$  – magnetometrie; VP – zdánlivá polarizovatelnost pro Wennerovo profilování ( $a = 40$  m); SP – spontánní polarizace; GR – gradientová křivka metody kombinovaného středového gradientu; VDV – řez zdánlivé proudové hustoty metody velmi dlouhých vln  
 1 – pokryv; 2 – amfibolit; 3 – sutě; 4 – Cu–Zn-mineralizace (A – hlavní, C a D – vedlejší tělesa, B – štola)

# Elektromagnetické metody s velkým hloubkovým dosahem

Hloubkový dosah roste se snižováním frekvence pole.

## Metoda frekvenční sondáže

Harmonické elektromagnetické pole se budí magnet. nebo elektrickým dipólem, měří se vertikální složka magnetického resp. horizontální složka elektrického výsledného pole, počítá se **zdánlivý měrný odpor** pro různé frekvence primárního pole (odvozeně pro různé hloubky),  $\rho_z = g(f)$ ,  $f$  ... frekvence

## Metody přechodové

Sleduje se přechodové pole vyvolané skokovou změnou primárního pole.  
Aplikace: Horizontálně zvrstvené prostředí (jako u frekvenční sondáže)

Vyhledávání hlouběji uložených rudních těles (do 300 m)

## **Magnetotelurické metody (MT)**

Největší hloubkový dosah z elektromagnetických metod  
- až první stovky kilometrů.

**Zdroj:** změny přirozeného elektromagnetického pole Země (frekvence jednotky Hz a nižší)

Měří se vzájemně kolmé složky pole - elektrická a magnetická, určuje se impedance  $Z$

a počítá se zdánlivý měrný odpor v závislosti na frekvenci.

Používá se v modifikaci sondování i profilování.

Modifikace MT profilování - **metoda AFMAG**

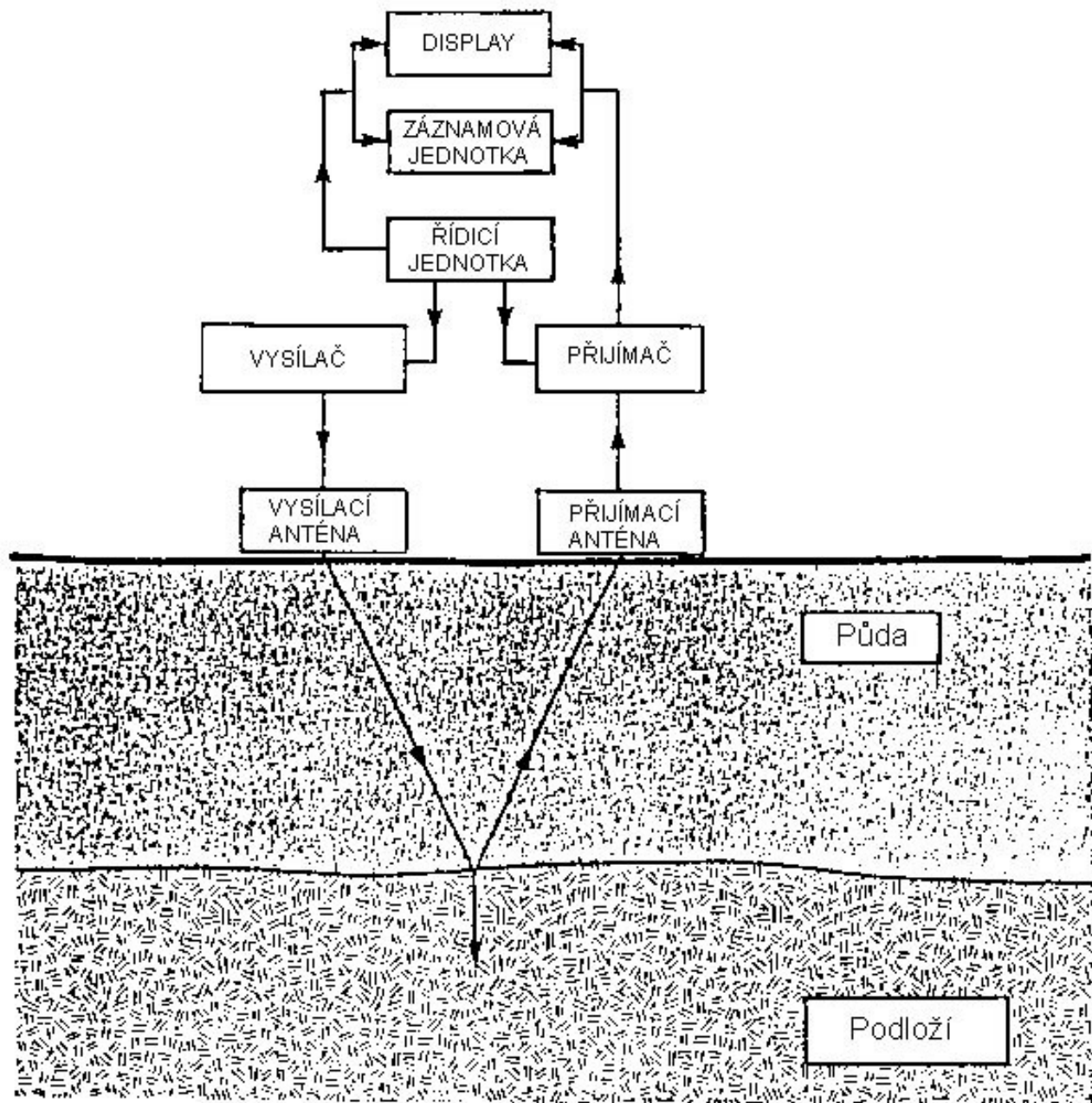
**Zdroj** - pole atmosférických výbojů (blesky)

System měření podobný jako v metodě VDV,  
frekvence řádově 100 Hz

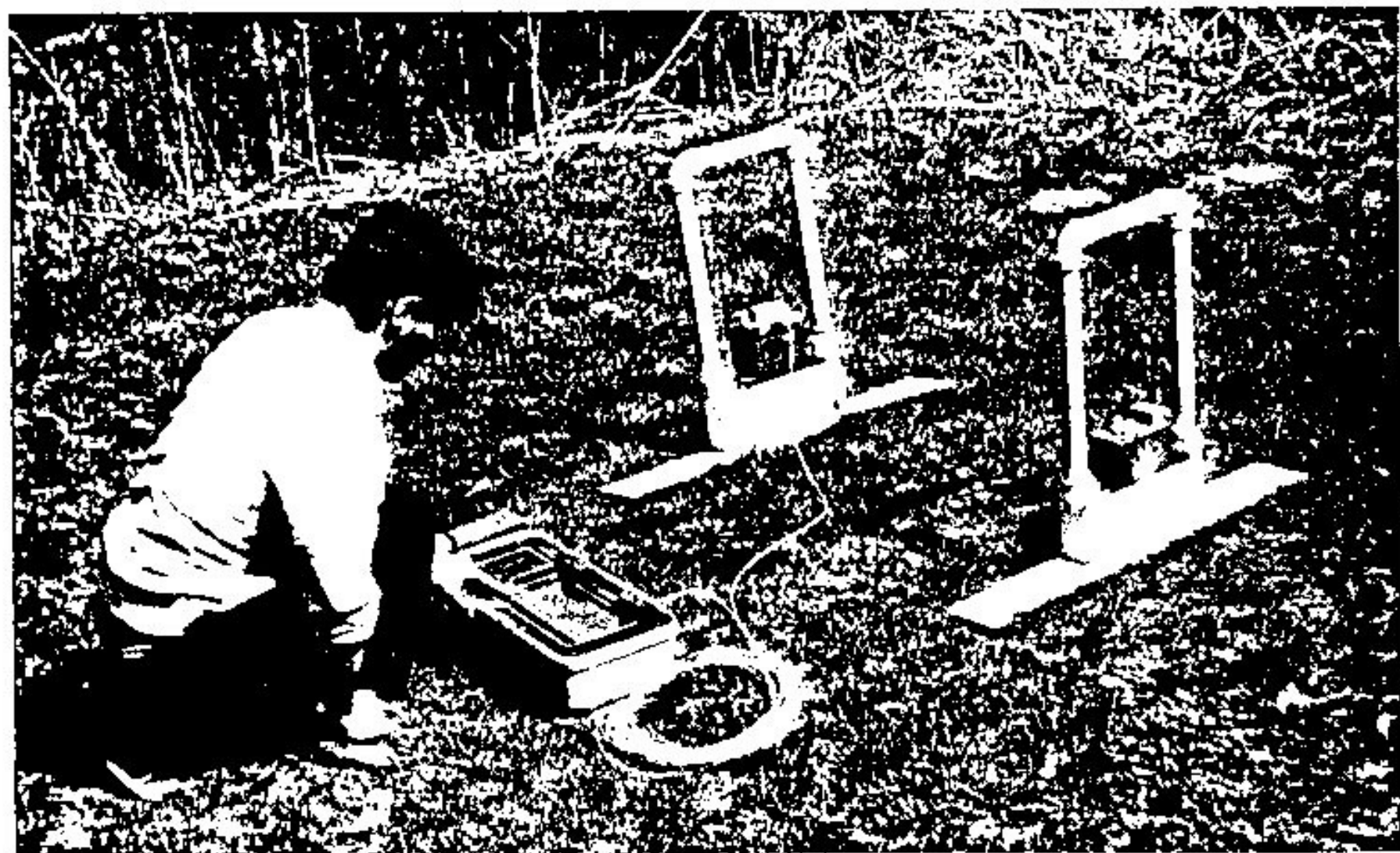
# GPR (Ground Penetrating Radar) Georadar, (zemní radar)

(Podrobnější informace o GPR možno nalézt v článku Davis, J.L., and Annan, A.P. (1989): GROUND-PENETRATING RADAR FOR HIGH-RESOLUTION MAPPING OF SOIL AND ROCK STRATIGRAPHY, Geophysical Prospecting 37, 531-551 a na Internetu např. <http://www.g-p-r.com/tutorial.htm>).

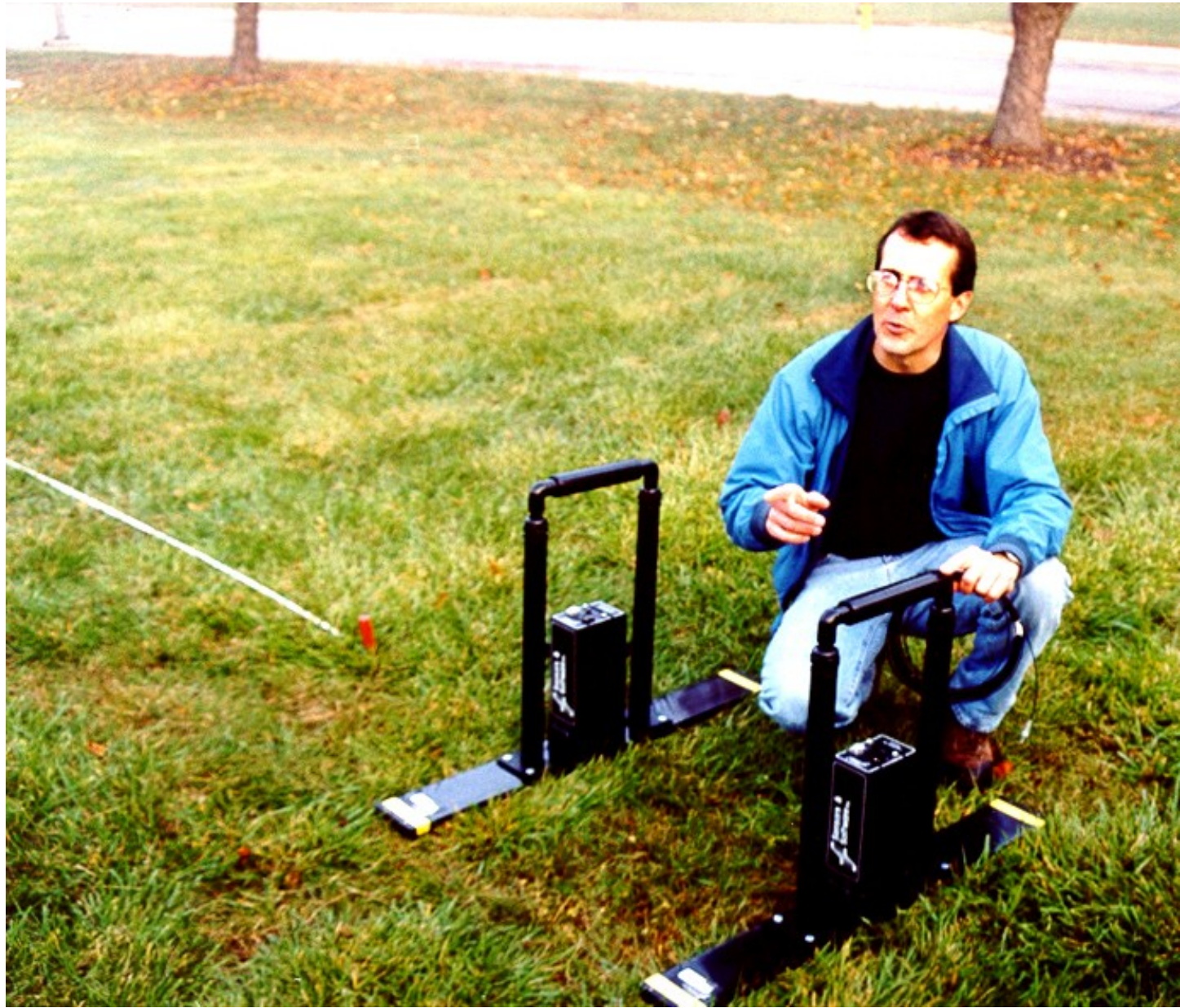
**Princip:** Elektromagnetické záření o frekvencích řádu 10 - 1000 Mhz, nejčastěji kolem 100 Mhz, proniká od vysílací antény pod zemský povrch. jeho část vracejíci se na povrch (odrazy od fyzikálních rozhraní) se snímají přijímací anténou.



Obr. 1a Blokové schéma typického systému GPR



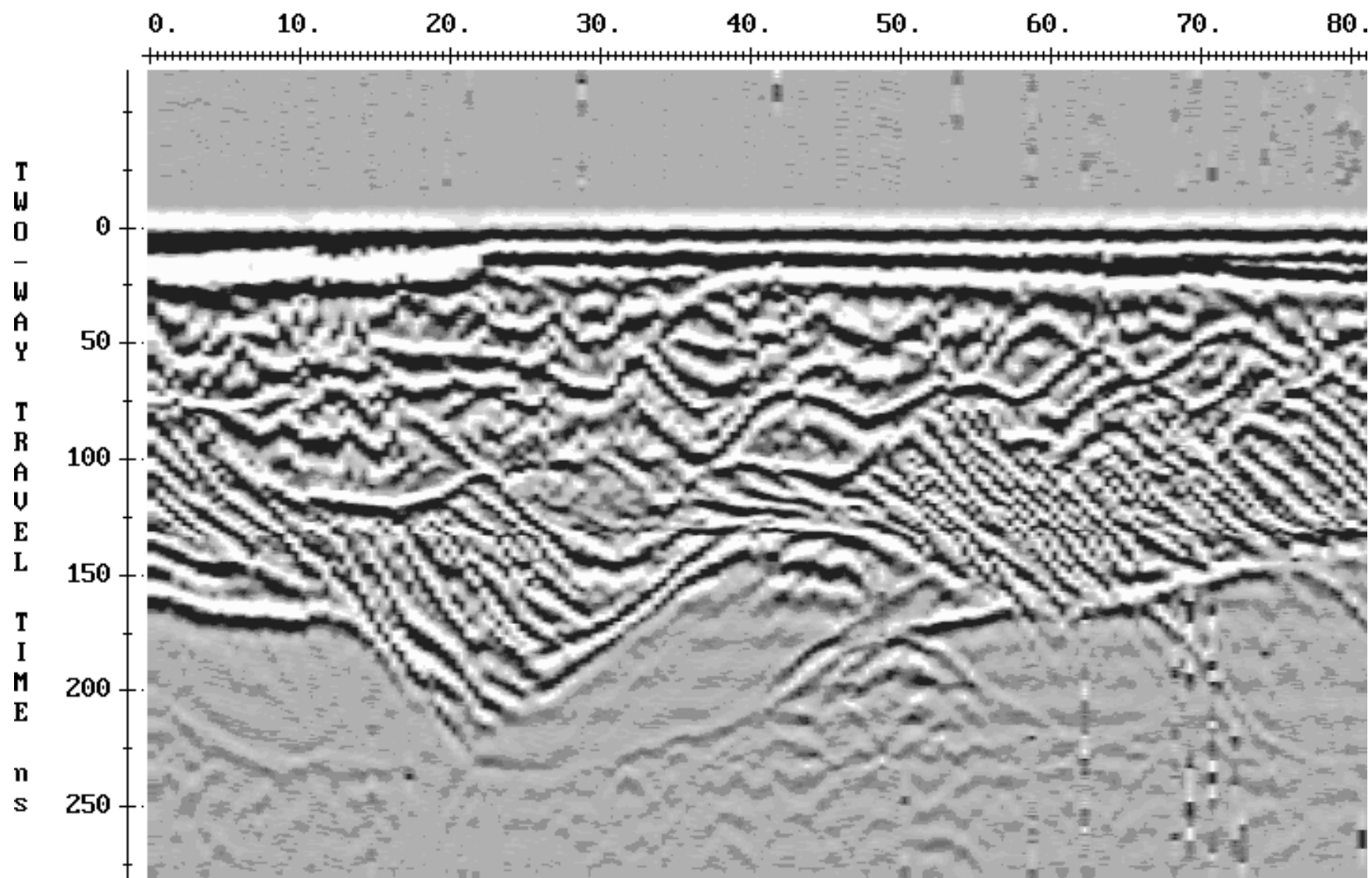
Obr. 1b Radarový systém EKO III s anténami pro frekvenci 100 MHz.







**GPR Zond-12c s anténami pro frekvenci 75 MHz**



## **Parametry horninového prostředí ovlivňující měření**

(Tab. 1):

dielektrická konstanta (permitivita)  $K$  - rozmezí 1 až 80

měrná vodivost  $\gamma$  - rozmezí 0,01 až 30 000 mS/m

rychlost šíření  $v$  - rozmezí 0,01 až 0,30 m/ns

Tyto parametry také závisí na frekvenci  
elektromagnetického záření.

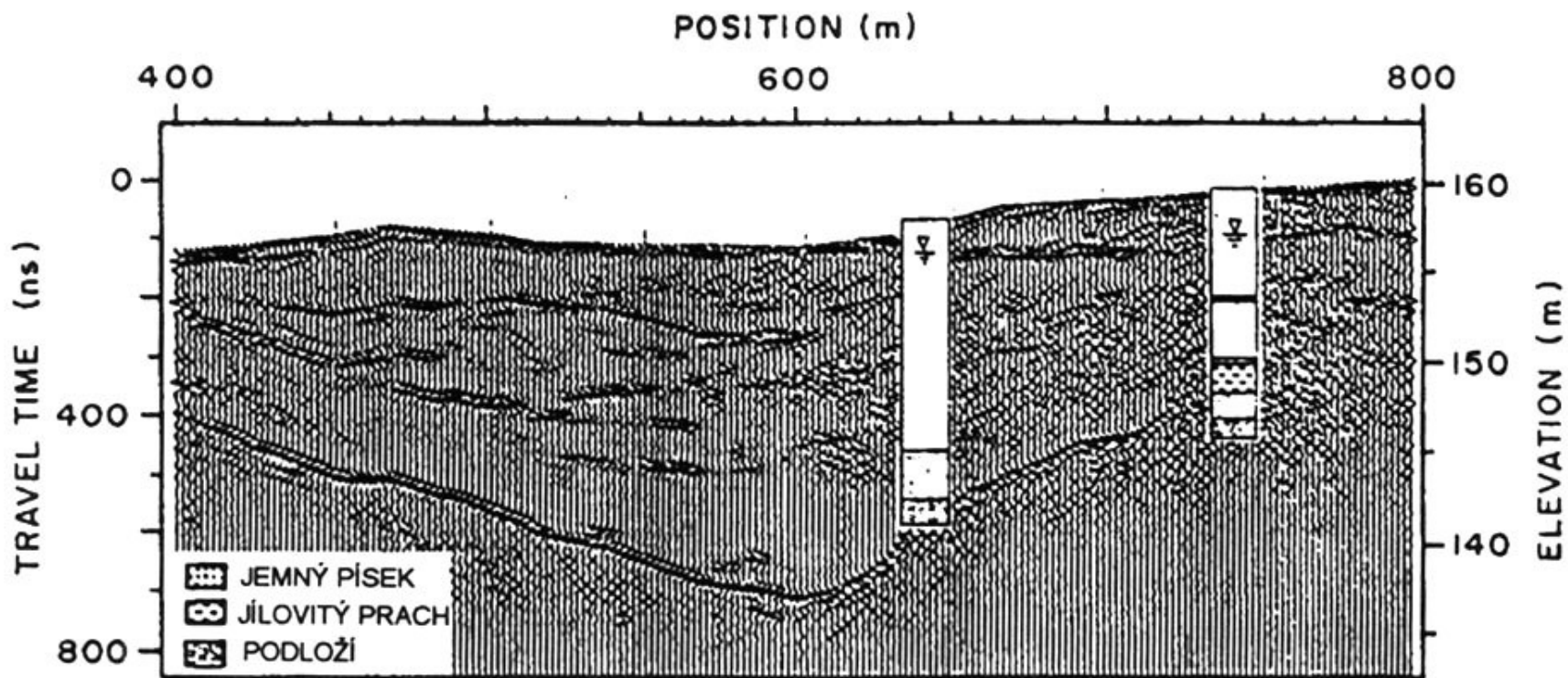
**Hlubkový dosah:** V závislosti na elektrických  
parametrech prostředí (hlavně vodivosti) jednotky až první  
desítky metrů.

### **Použití:**

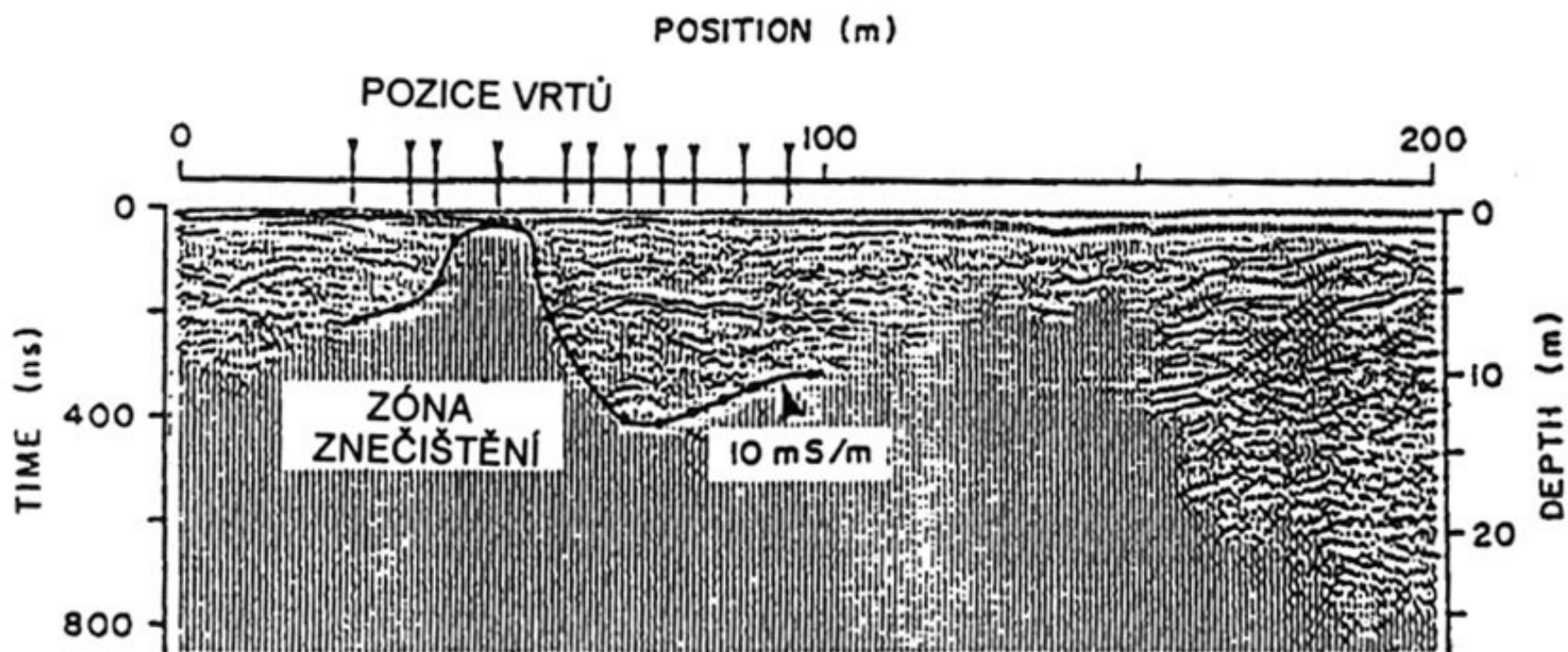
- průzkum podpovrchové struktury
- vyhledávání znečištěných zón
- vyhledávání dutin

Tab. 1 Typická dielektrická konstanta, elektrická vodivost, rychlost a útlum pozorované v běžných geologických materiálech pro frekvenci 100 Mhz

Material	$K$	$\sigma$ (mS/m)	$V$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Vzduch	1	0	0.30	0
Destil. voda	80	0.01	0.033	$2 \times 10^{-3}$
Sladká voda	80	0.5	0.033	0.1
Mořská voda	80	$3 \times 10^4$	0.01	$10^3$
Suchý písek	3-5	0.01	0.15	0.01
Mokrý písek	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Vápenec	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Břidlice	5-15	1-100	0.09	1-100
Prachovce	5-30	1-100	0.07	1-100
Jíly	5-40	2-1000	0.06	1-300
Žula	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Suchá sůl	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Led	3-4	0.01	0.16	0.01



Obr. 2 Ukázka profilu měřeného radarem. Zřetelně je vidět reliéf podloží, reflexy v horní části profilu jsou od jílovitých poloh v nadloží tvořeném převážně jemným pískem.



Obr. 3 Ukázka profilu měřeného radarem. Oblast pod linií vodivosti 10 mS/m je interpretována jako zóna znečištění.

***Geofyzikální časopisy:***

**GEOPHYSICS** (odborné články)

**The Leading Edge** (více populárně a komerčně zaměřený)

Vydává **Society of Exploration Geophysicists (SEG)**, Tulsa, Oklahoma, USA

**<http://www.seg.org>**

**GEOPHYSICAL PROSPECTING** (odborné články)

**FIRST BREAK** (více populárně a komerčně zaměřený)

**NEAR SURFACE GEOPHYSICS** (specializace na mělkou geofyziku)

Vydává **European Association of Geoscientists & Engineers**

(**<http://www.eage.org>**), Geophysical Division, v nakladatelství Blackwell Science Ltd, Oxford, London (**[www.blackwellpublishing.com](http://www.blackwellpublishing.com)**)