

Geofisica Applicata

Scienze Geologiche

LM

Elettromagnetismo

A bassa ed alta frequenza

AA 2018-2019

Il metodo geoelettromagnetico

parte 02

Il metodo VLF

Il Metodo TDEM o TEM

Il metodo GPR

Tecnica VLF
'Very Low Frequency'
EM a frequenza compresa tra
15 e 30 KHz
a bassa frequenza

Metodi Elettromagnetici: sorgente utilizzata e banda di frequenza

Nome	sorgente	frequenza	parametro	applicazione principale
Very Low Frequency	Lontana (Tx radio)	singola	pendenza angolo 'titlt angle'	strutture lineari
Magnetotellurica MT/CSAMT	Passiva Attiva	Banda larga	E, B E, B, θ	Sondaggi elettrici
FDEM GCM (Ground Conductivity Meter)	Attiva (bobina)	Singola/multipla	B	Struttura sottosuolo superficiale
TEDM/TEM	Attiva (loop di grandi dimensioni)	Dominio tempo	dB/dt	Struttura sottosuolo profondo
E : campo elettrico	B : campo magnetico indotto	θ : fase	MT: magnetotellurica	CS: sorgente controllata

Strati atmosfera - ionosfera

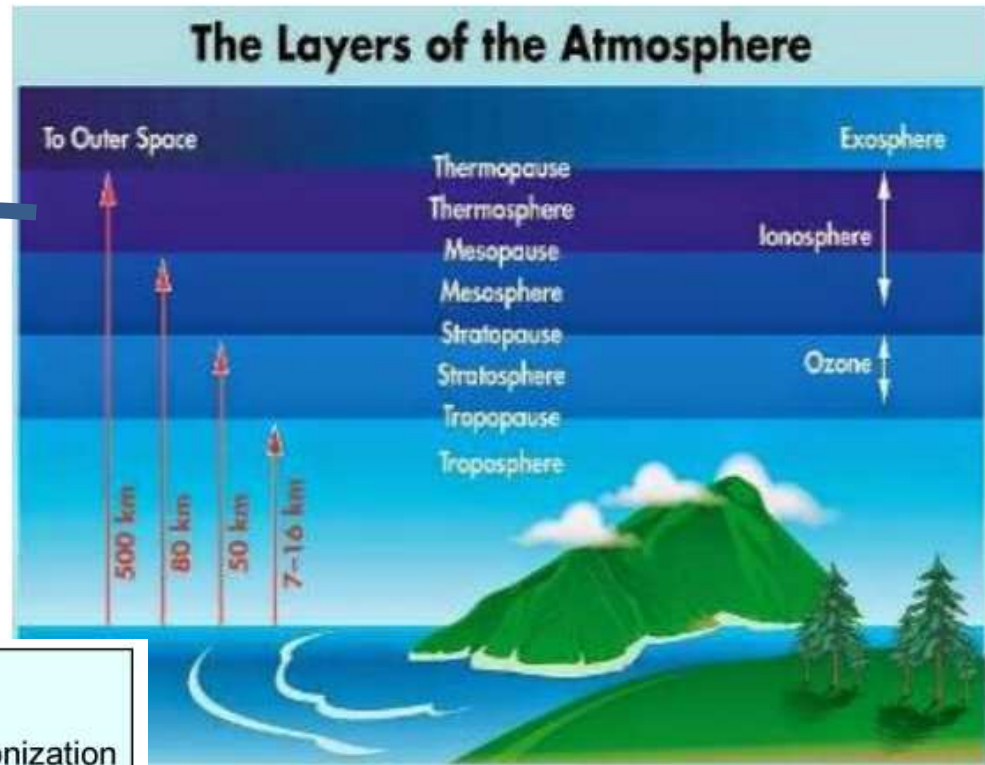


Figure 1.1: The layer of the atmosphere [17]

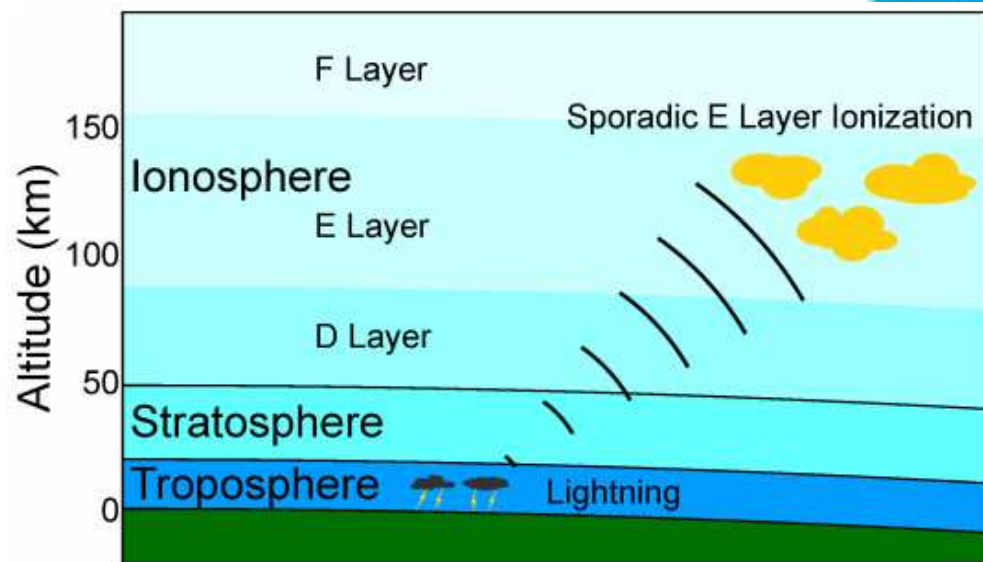
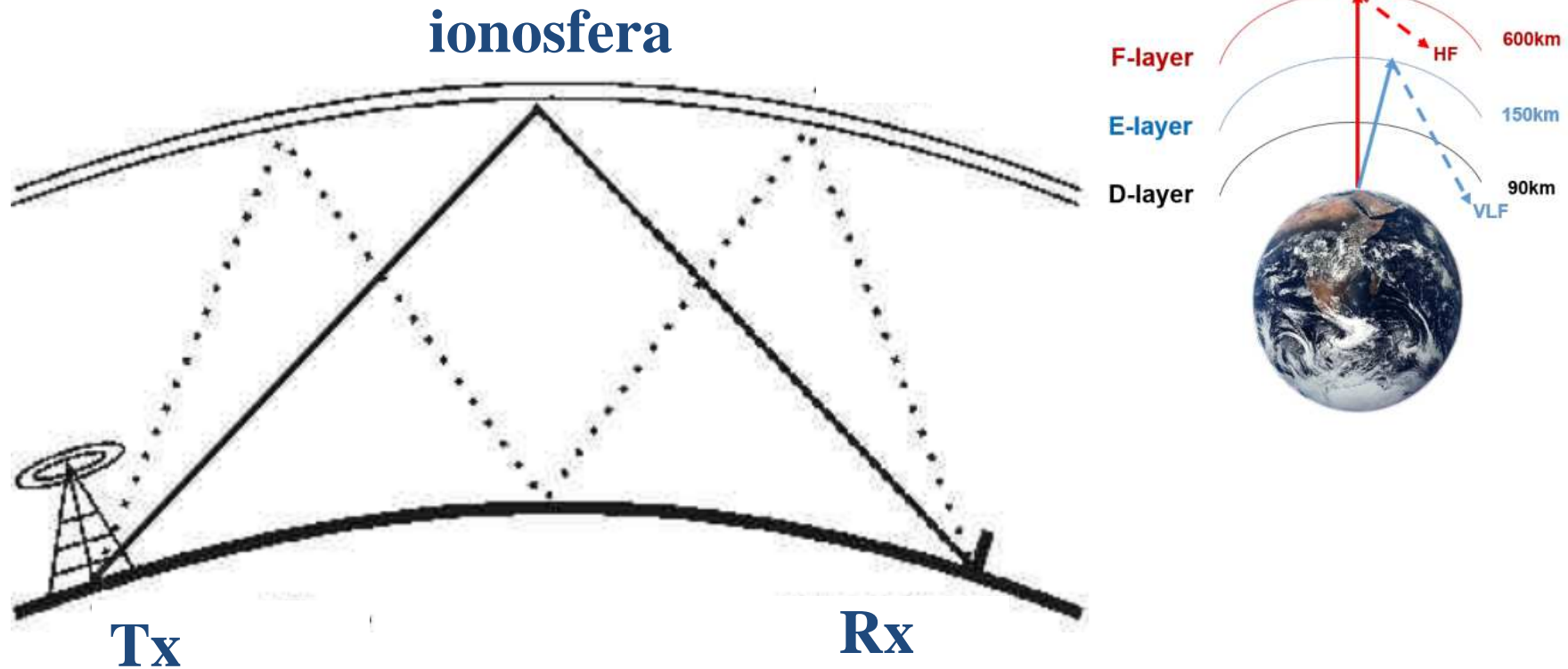
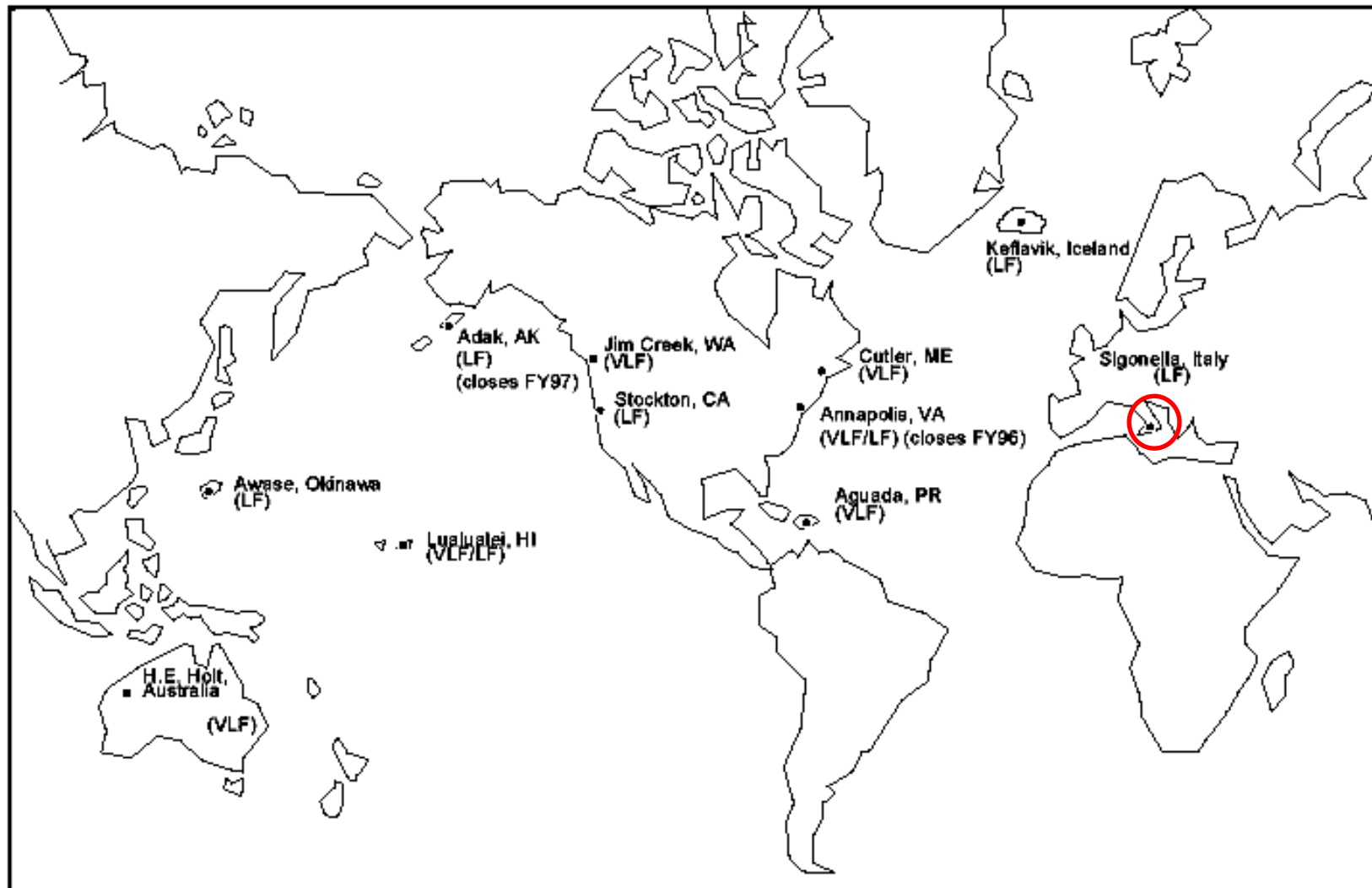


Figure 1.2: Ionosphere sub-regions (type of layers)



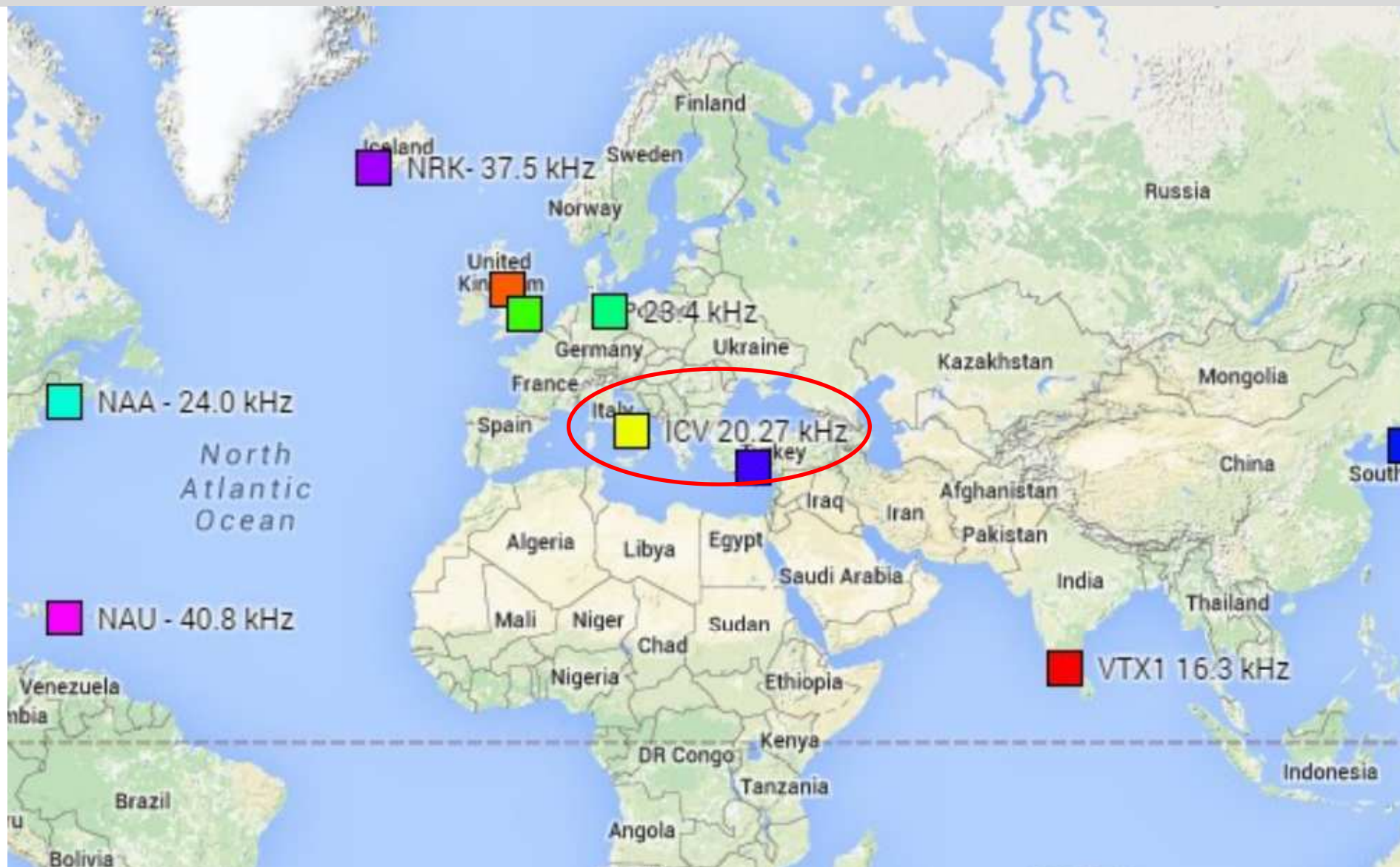
- Sfrutta onde monocromatiche (onde piane ad una frequenza unica) trasmessa da grandi ripetitori dislocati in diverse parti sulla terra,
- **Frequenza: (3) [15-30] KHz**, $\lambda = 10\text{km}-100\text{km}$.
- Si usa un ricevitore di piccole dimensioni per misurare perturbazioni al campo elettrico dovute alla presenza di corpi conduttivi nel sottosuolo

VLF: stazioni trasmettenti



Very Low Frequency/Low Frequency Site Locations

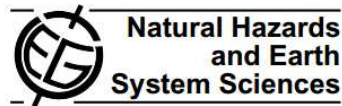
VLF: stazioni trasmettenti (al 2016)



ICV Frequenza: 20.270 KHz, Isola di Tavolara, Italia,
N 40° 55' 23.26" (+40.923127°) E 009° 43' 51.64" (+009.731011°)

VLF: stazioni trasmittenti (EU)

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 333–341, 2011
www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/333/2011/
doi:10.5194/nhess-11-333-2011
© Author(s) 2011. CC Attribution 3.0 License.



The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors: setting up and natural/man-made disturbances

P. F. Biagi^{1,2}, T. Maggipinto¹, F. Righetti¹, D. Loiacono¹, L. Schiavulli¹, T. Ligonzo¹, A. Ermini³, I. A. Moldovan⁴, A. S. Moldovan⁵, A. Buyuksarac⁶, H. G. Silva⁷, M. Bezzeghoud⁷, and M. E. Contadakis⁸

¹Department of Physics, University of Bari, Bari, Italy

²Inter-Department Centre for the Evaluation and Mitigation of the Volcanic and Seismic Risk, University of Bari, Italy

³Department of Mechanical Engineering, University of Tor Vergata, Rome, Italy

⁴National Institute of Earth's Physics, Seismological Dept., Bucharest, Magurele, Romania

⁵AZEL-Designing Group S.R.L., Bucharest, Magurele, Romania

⁶Canakkale Onsekiz Mart University, Dept. of Geophysics, Canakkale, Turkey

⁷Geophysical Centre of Évora and Physics Department, ECT, University of Évora, Portugal

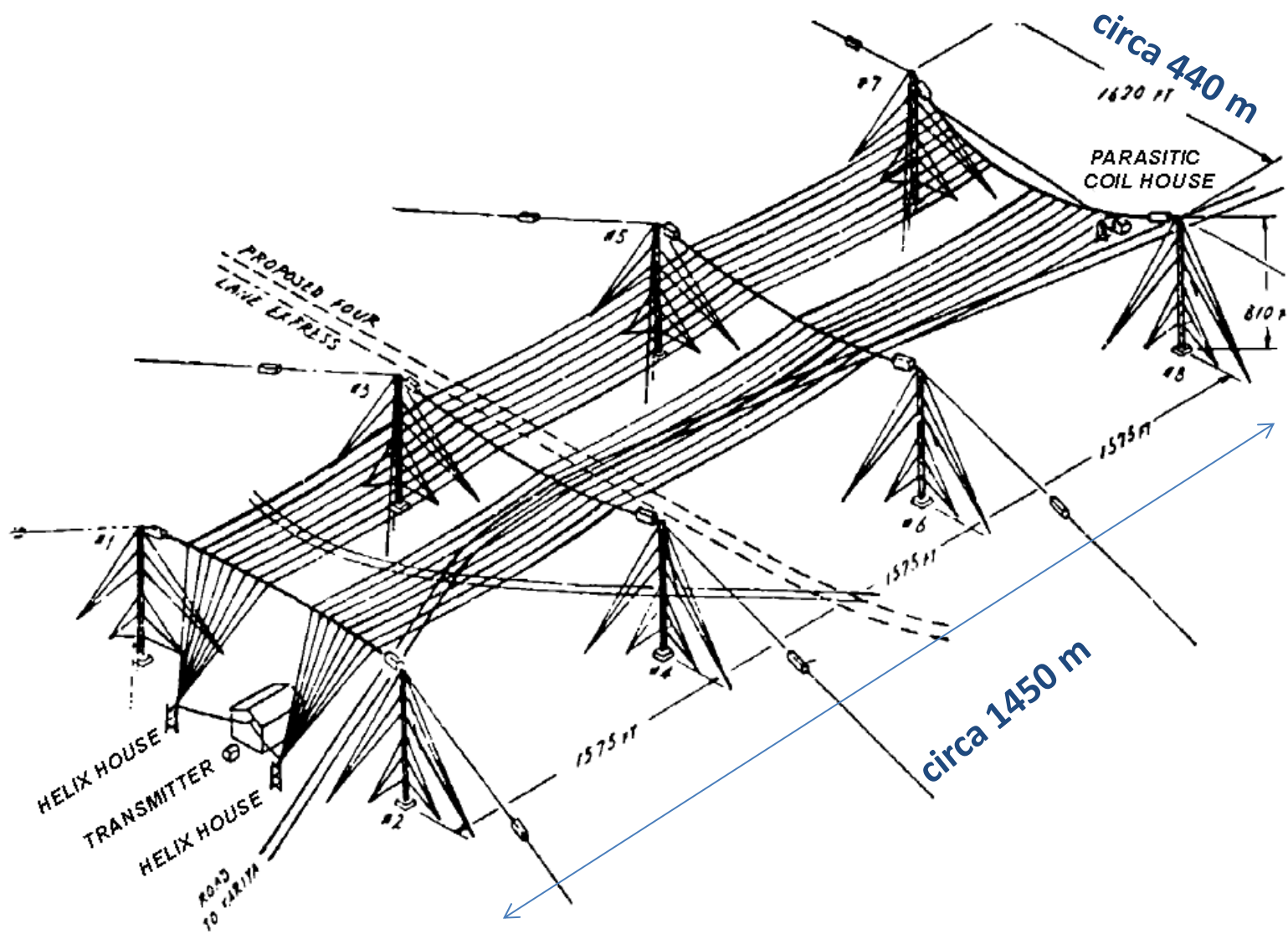
⁸University of Thessaloniki, Department of Surveying & Geodesy, Thessaloniki, Greece

Received: 12 October 2010 – Revised: 16 December 2010 – Accepted: 25 December 2010 – Published: 7 February 2011

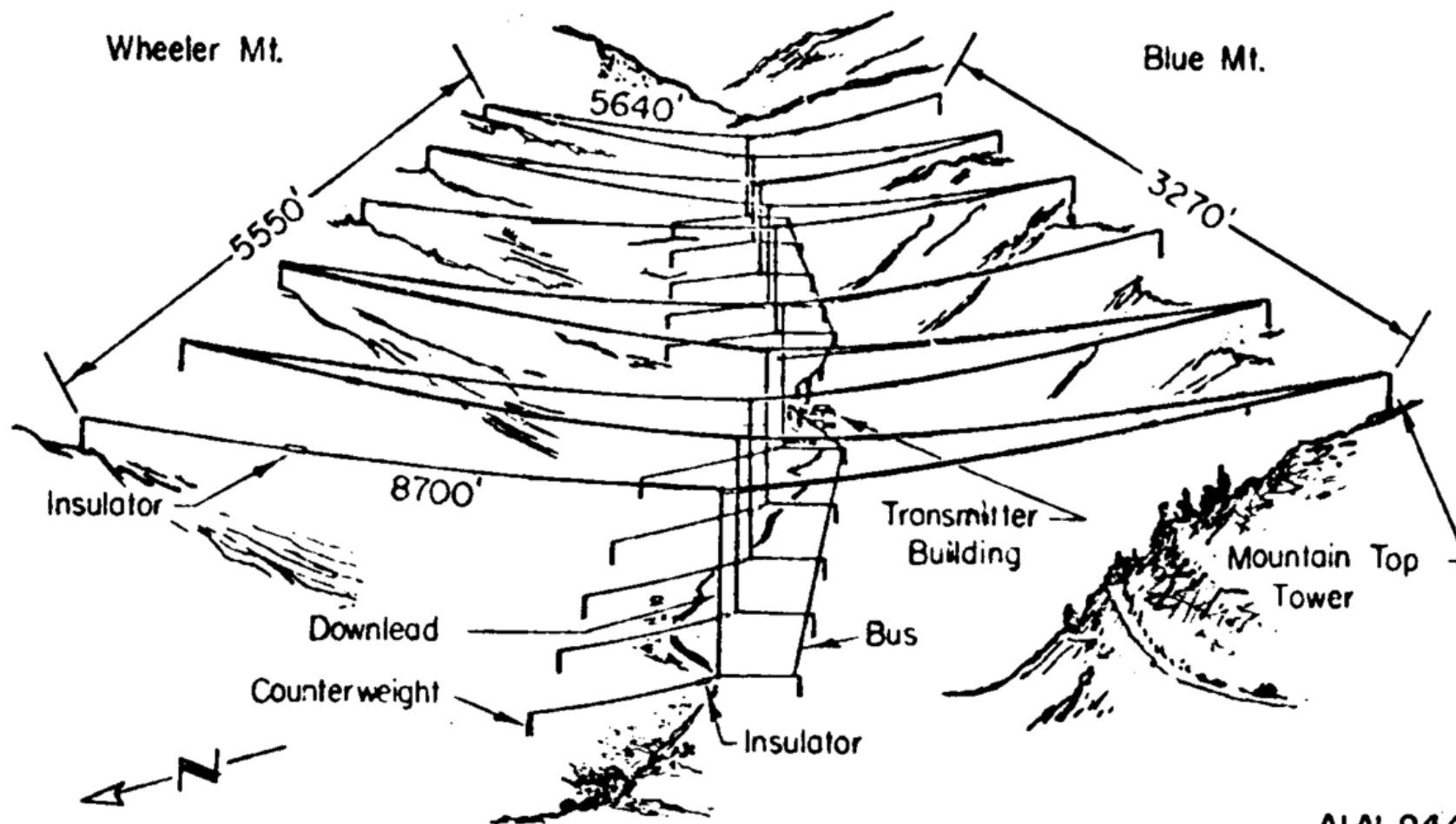
Table 2. Peculiarities of the VLF/LF transmitters of the European network.

Label	Country	Power (kW)	Frequency (kHz)
GBZ	Great Britain		19.58–22.10
ICV	Sardinia (Italy)		20.27
HWU	France		21.75
DHO	Germany		23.4
NRK	Iceland		37.5
ITS	Sicily (Italy)		45.9
RRO	Romania	1200	153
FRI	France	2000	162
TRT	Turkey	1200	180
EU1	Germany	2000	183
CHI	Algeria	2000	198
MCO	France	1200	216
RRU	Russia	2500	261
CZE	Czech Republic	500	270

VLF: stazioni trasmittenti (Giappone)



VLF: stazioni trasmettenti (USA – 24.8 KHz)



Metodo EM: tecnica VLF 'Very Low Frequency' – propagazione onde piane

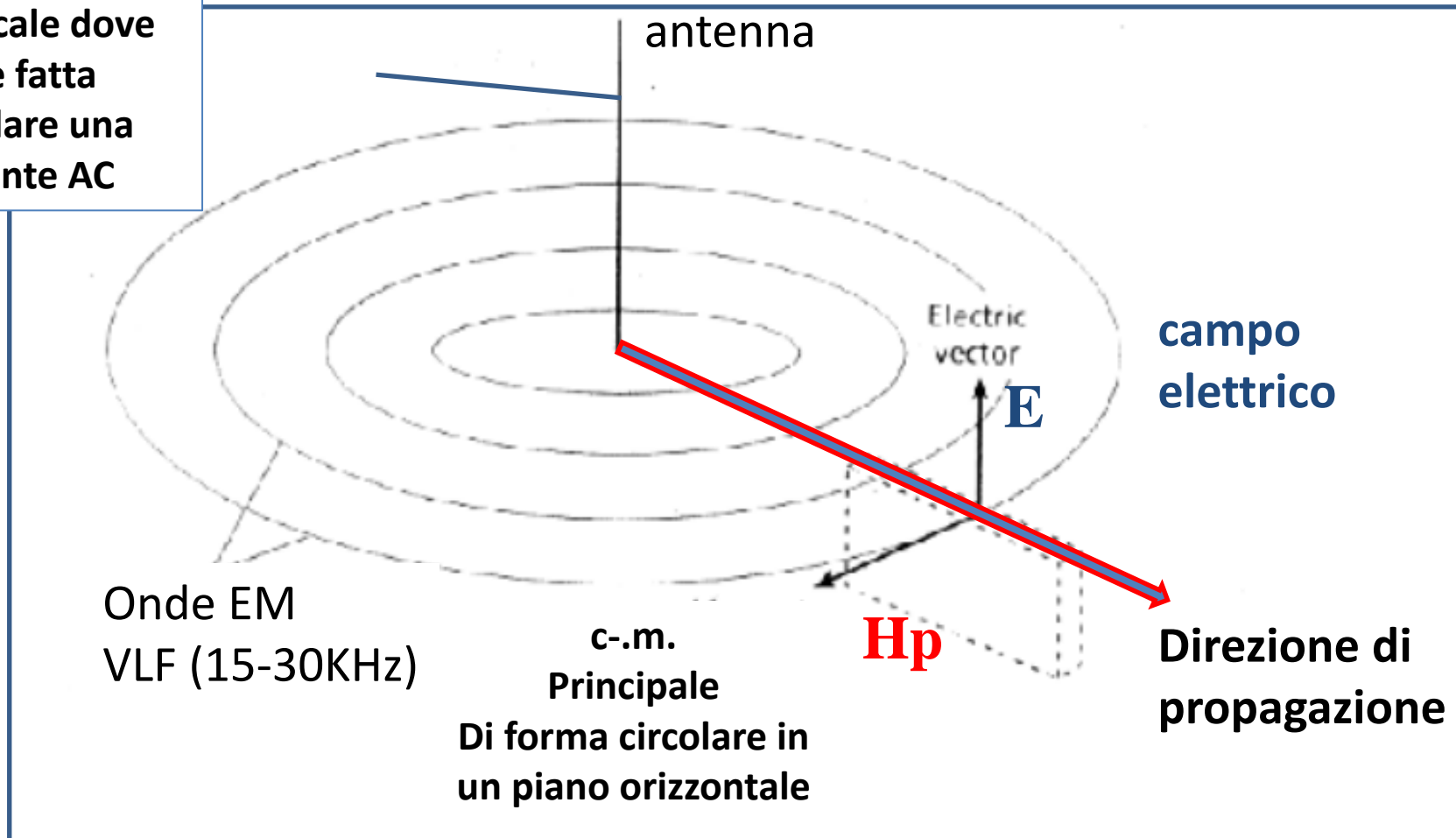
Concetto fisico:

campo **E** è contenuto in un piano verticale

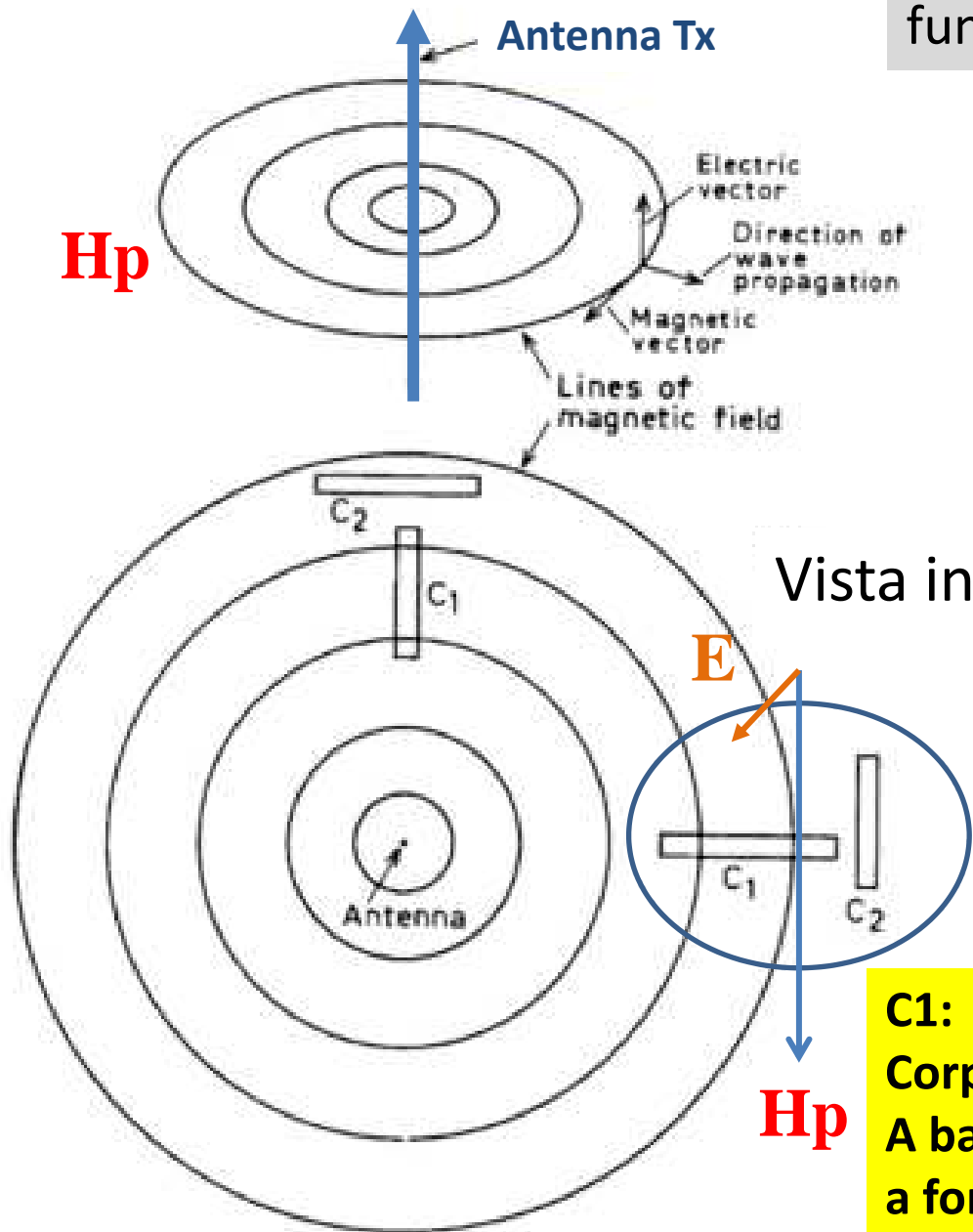
Campo **H** è normale a quello elettrico

Il campo **H** è normale anche al corpo anomalo quindi induce correnti nel corpo che a loro volta producono un **Hs** che investe la bobina ricevente.

Filo conduttore verticale dove viene fatta circolare una corrente AC



Metodo EM: tecnica VLF 'Very Low Frequency' – principio di funzionamento



Vista verticale

Vista in pianta

C2:
Corpo orientato parallelamente al vettore del c.m.p. → non è possibile rilevarlo xchè non induce c.m. secundario

C1:
Corpi target
A bassa resistività cioè conduttivi a forma di lamina verticale

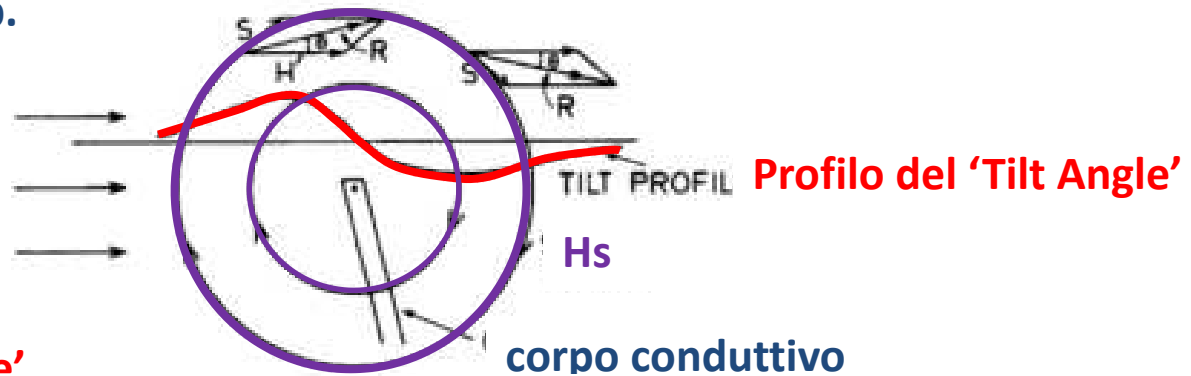
Metodo EM: tecnica VLF 'Very Low Frequency'
Strumentazione: esempio modello WADI (ABEM, Svezia)



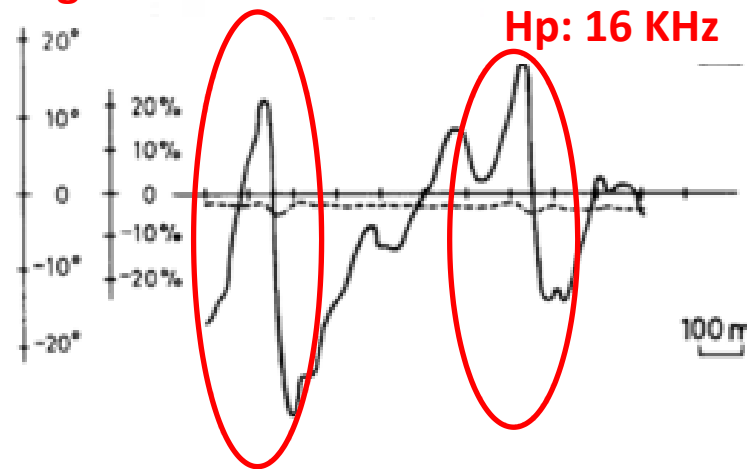
Metodo EM: tecnica VLF 'Very Low Frequency'

Applicazione: ricerca mineraria, Amliden, Nord di Svezia (Parasins, 1973). Significato del 'Tilt Angle'

Direzione vettore del c.m.p.
 $H_p=16$ KHz



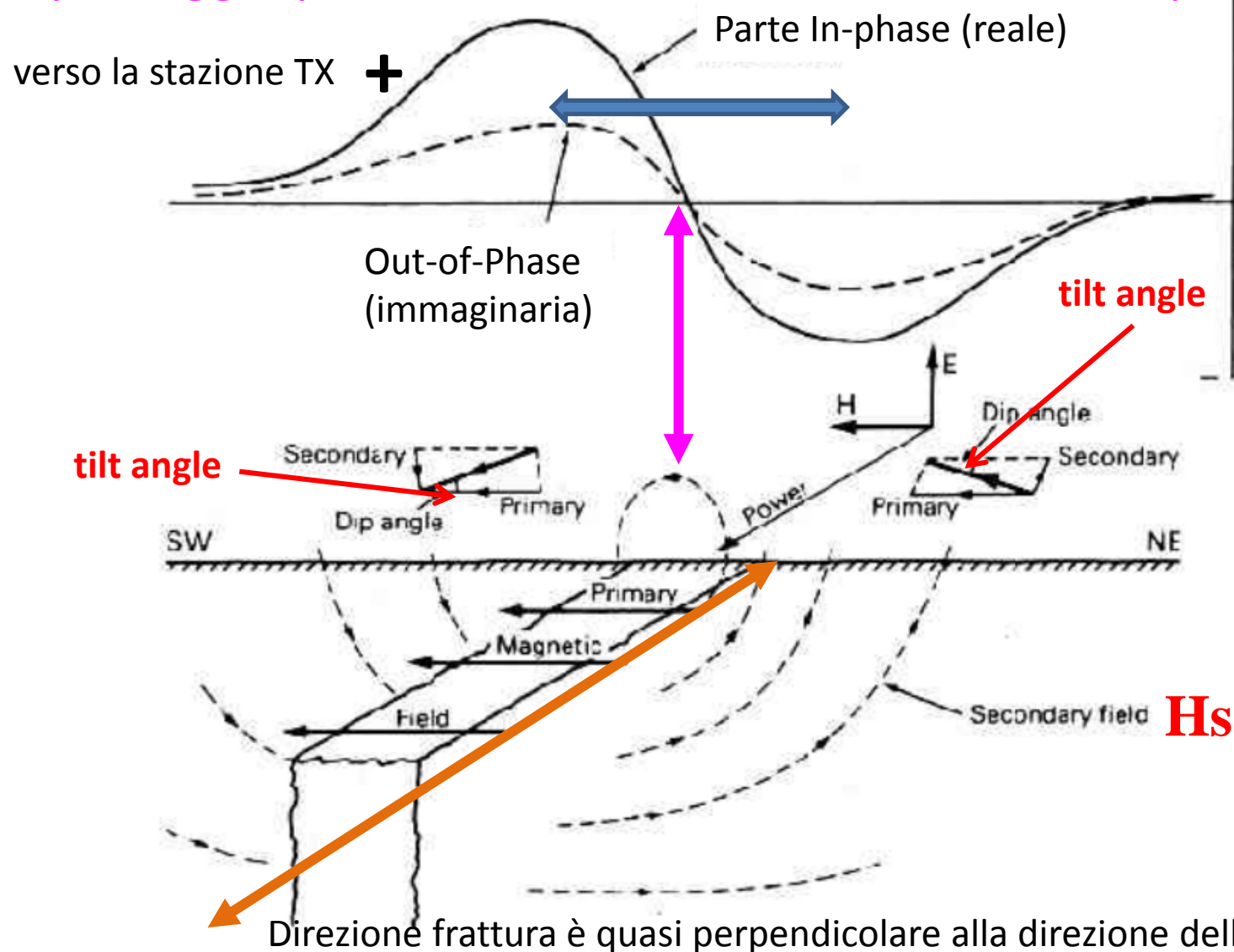
'Tilt Angle'



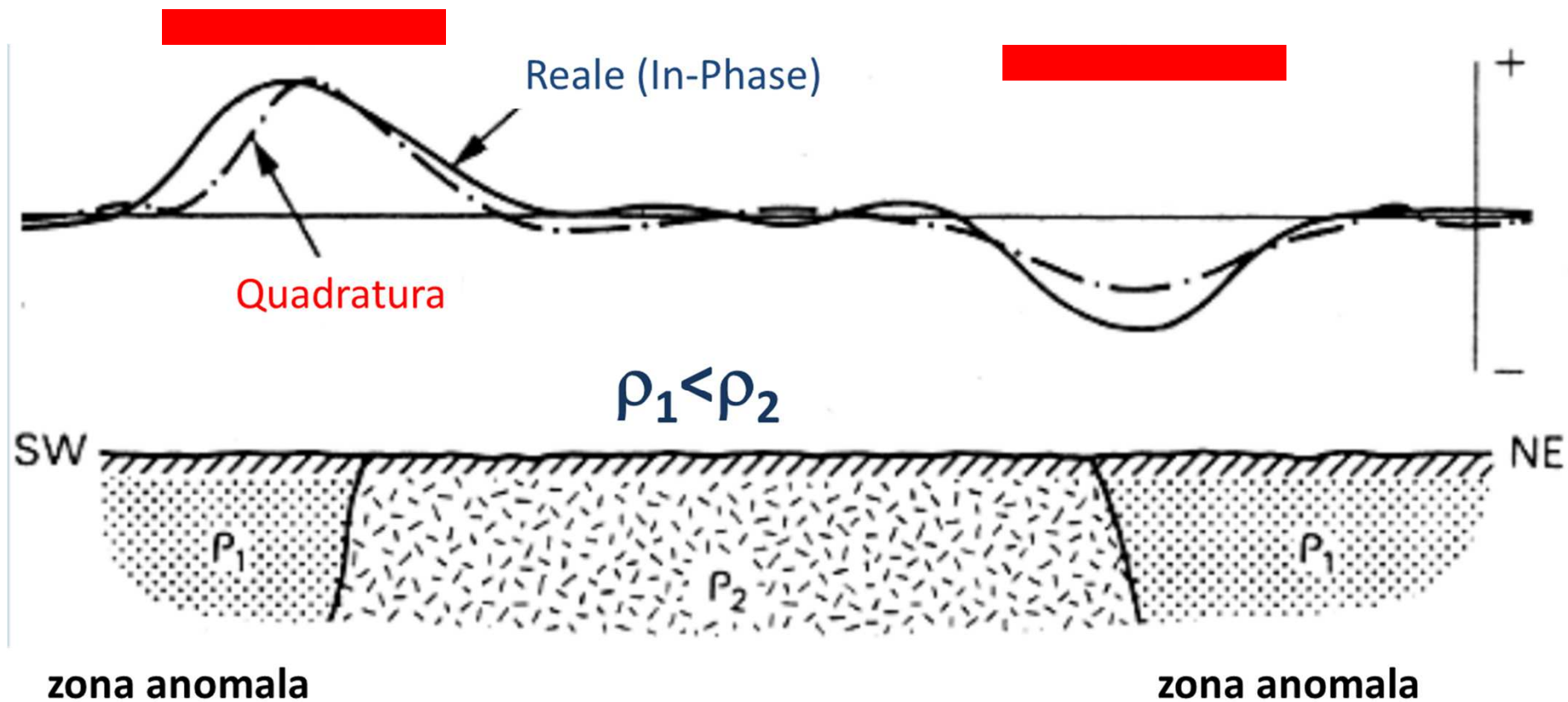
posizione delle anomalie= fratture a bassa resistività

COSA MISURARE:

- Misura l'angolo (**tilt angle**) tra il vettore del c.m. principale e quello secondario,
- Il passaggio per lo zero indica la posizione del corpo



Esempio: geologia - localizzazione corpi conduttivi



Tecnica TDEM

Time Domain Electromagnetic Method

Dominio del tempo

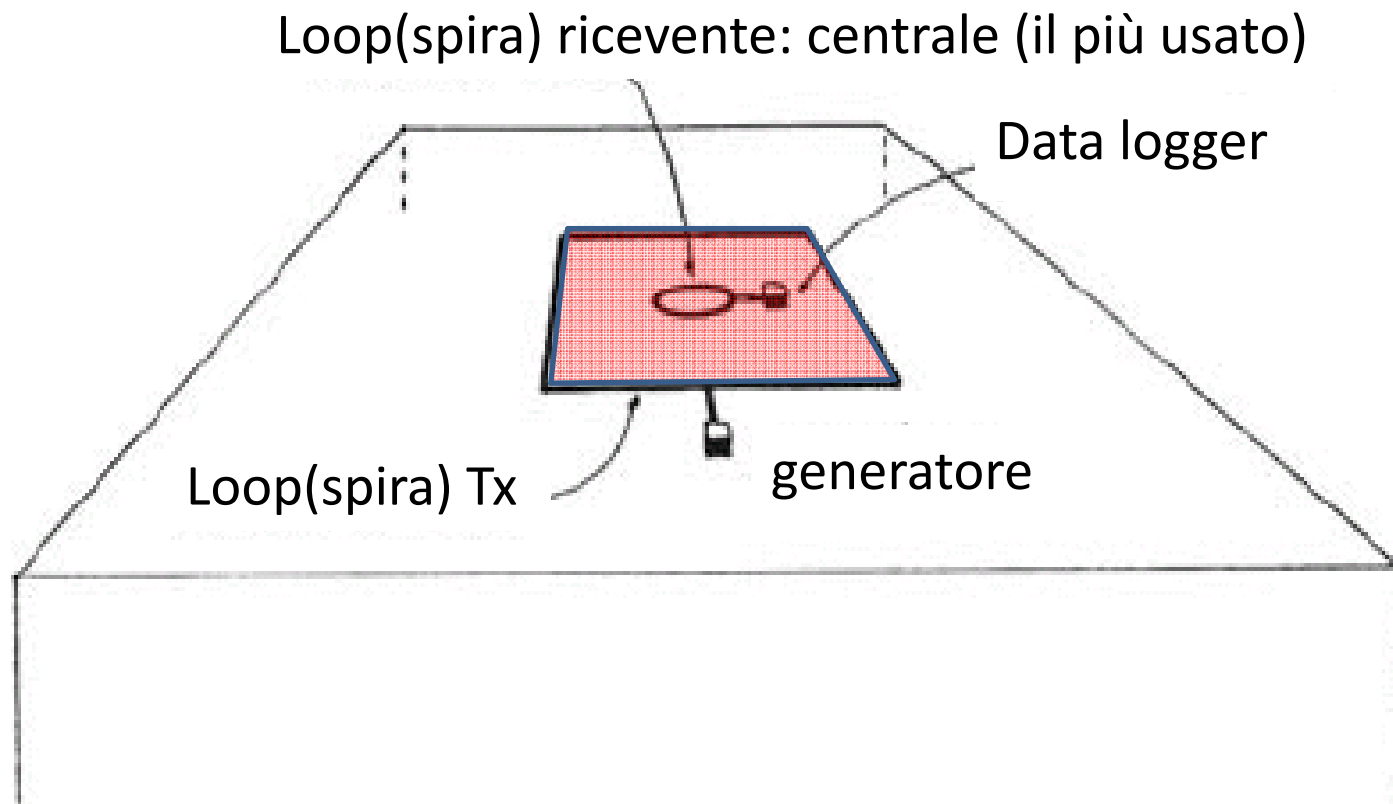
Metodi Elettromagnetici: sorgente utilizzata e banda di frequenza

Nome	sorgente	frequenza	parametro	applicazione principale
Very Low Frequency	Lontana (Tx radio)	singola	pendenza angolo 'titlt angle'	strutture lineari
Magnetotellurica MT/CSAMT	Passiva Attiva	Banda larga	E, B E, B, θ	Sondaggi elettrici
FDEM GCM (Ground Conductivity Meter)	Attiva (bobina)	Singola/multipla	B	Struttura sottosuolo superficiale
TEDM/TEM	Attiva (loop di grandi dimensioni)	Dominio tempo	dB/dt	Struttura sottosuolo profondo
E: campo elettrico	B: campo magnetico indotto	θ : fase	MT: magnetotellurica	CS: sorgente controllata

TDEM o TEM - Sounding (Transient Electromagnetic Method)

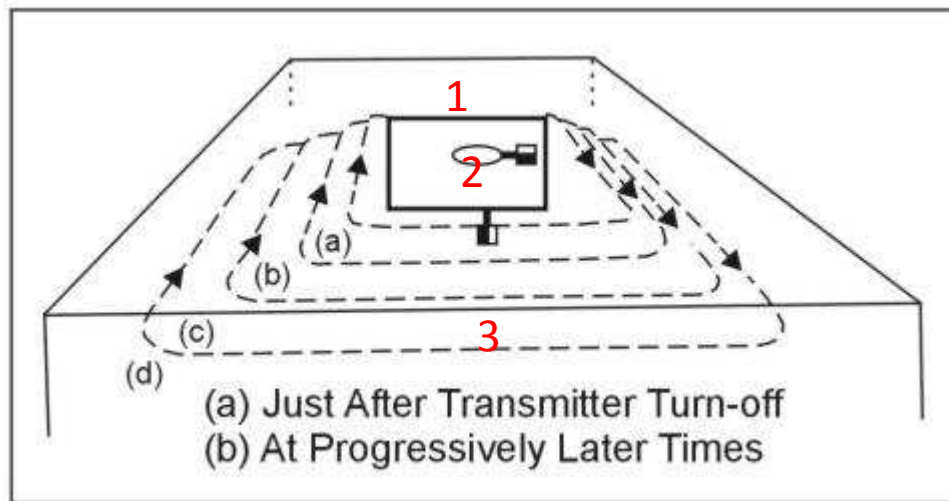
La spira ricevente:

- loop centrale (come in figura)
- lo stesso loop trasmittente funge anche da ricevente



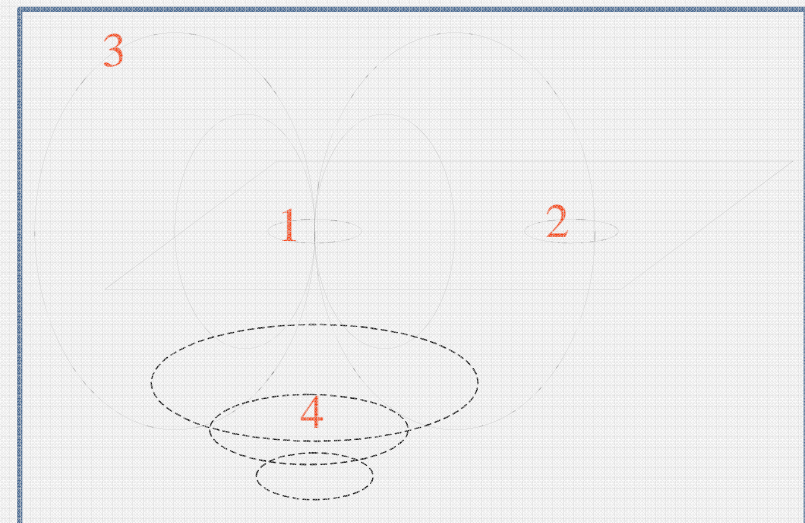
Metodi basati sull'induzione elettromagnetica misurano l'intensità del campo magnetico indotto nel sottosuolo da un campo magnetico sorgente variabile nel tempo

Il metodo «TDEM» (Time-Domain Electromagnetic Method)



1. Spira trasmittente
2. Bobina ricevente
3. Linee di flusso delle correnti indotte

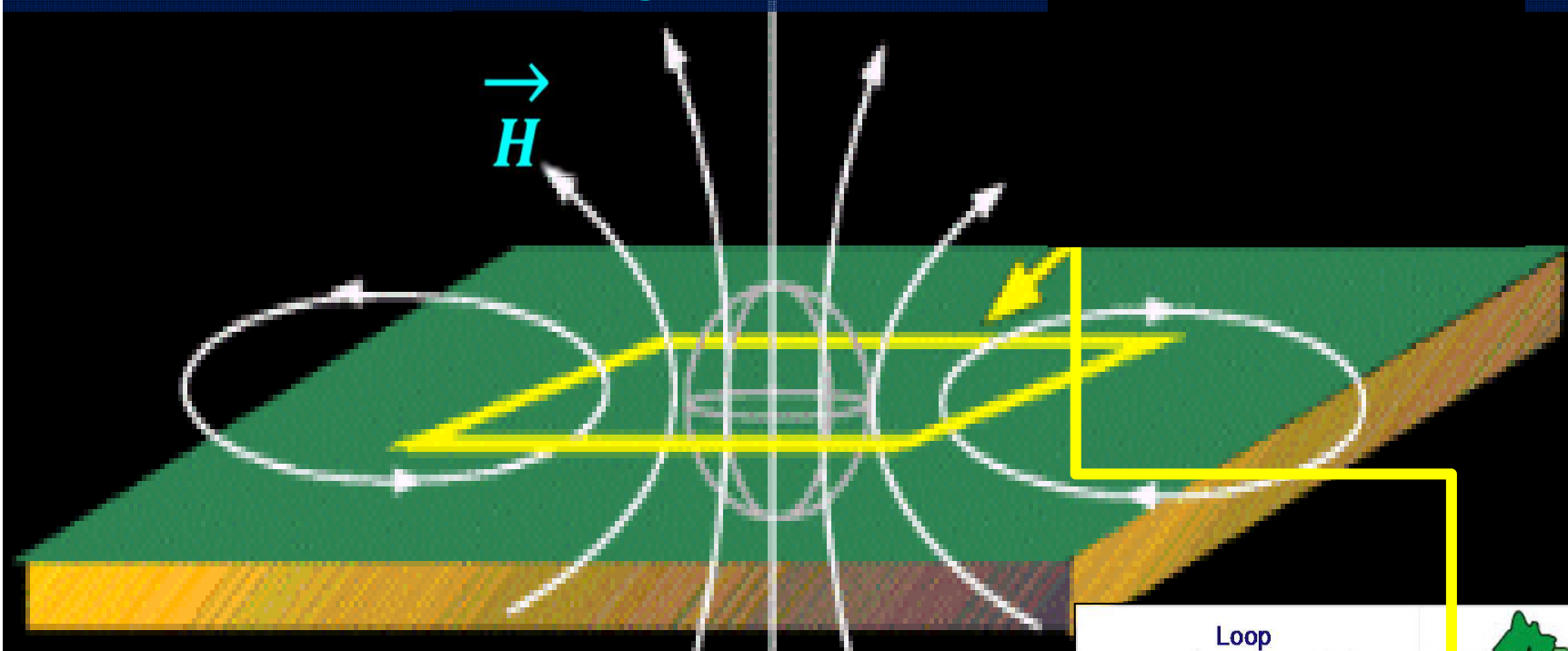
Il metodo «FDEM» (Frequency-Domain Electromagnetic Method)



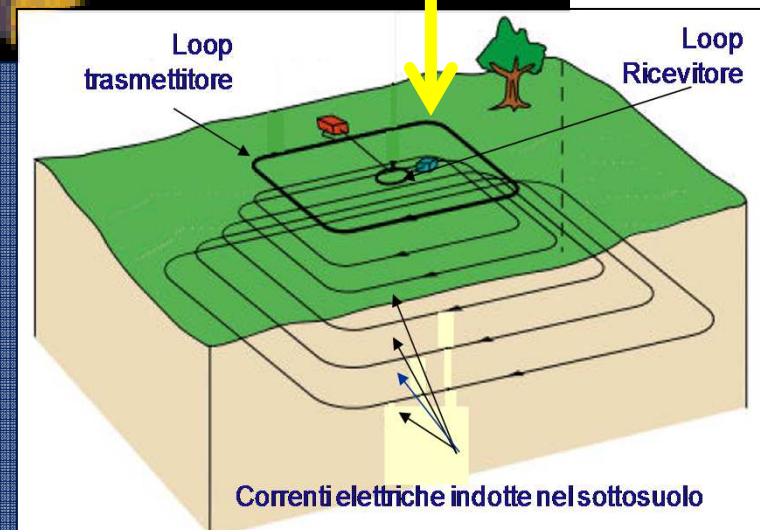
1. Bobina trasmittente
2. Bobina ricevente
3. Linee di forza del campo primario
4. Linee di flusso delle correnti indotte

Profili discontinui (composti dall'assemblaggio di singoli sondaggi TDEM)

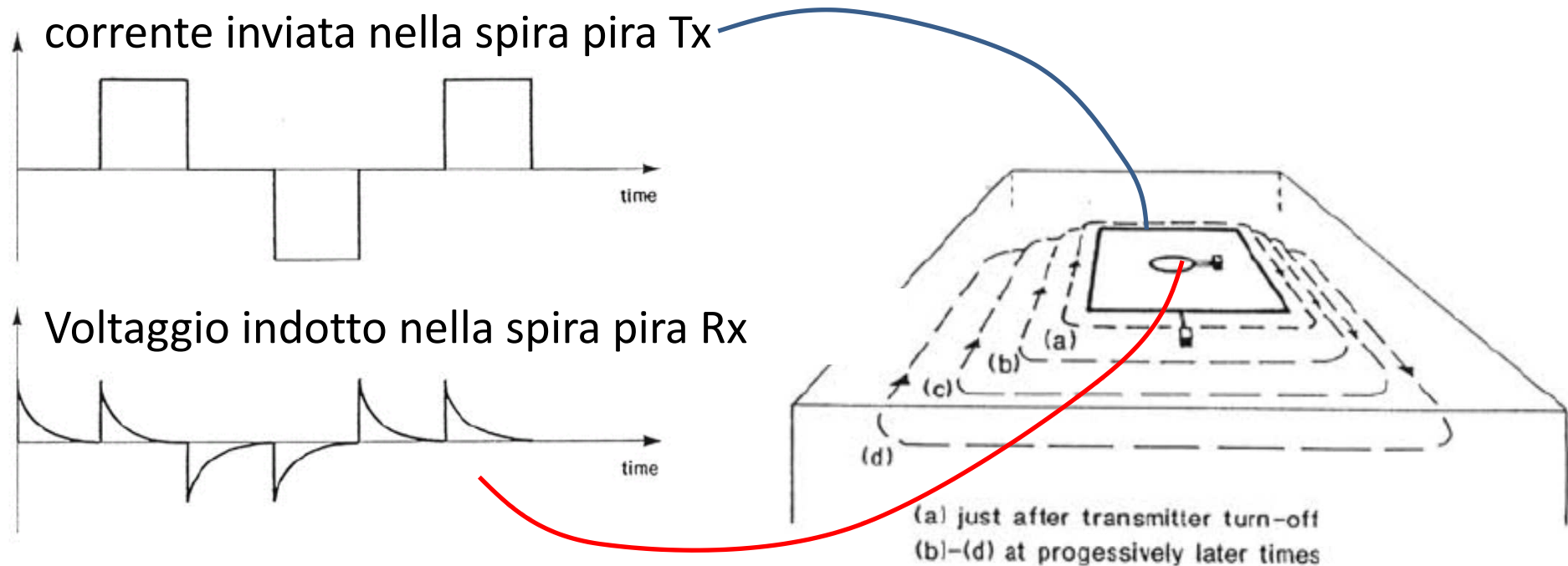
Time Domain Electromagnetic Methods, TDEM



Il metodo TDEM misura l'entità del campo magnetico secondario prodotto dalle correnti parassite «eddy currents» a causa della propagazione di un campo magnetico artificiale e variabile nel tempo. Permette di determinare variazioni verticali della resistività elettrica.



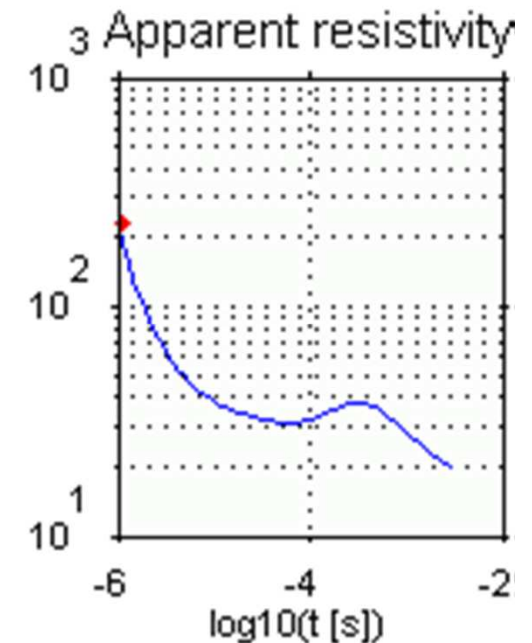
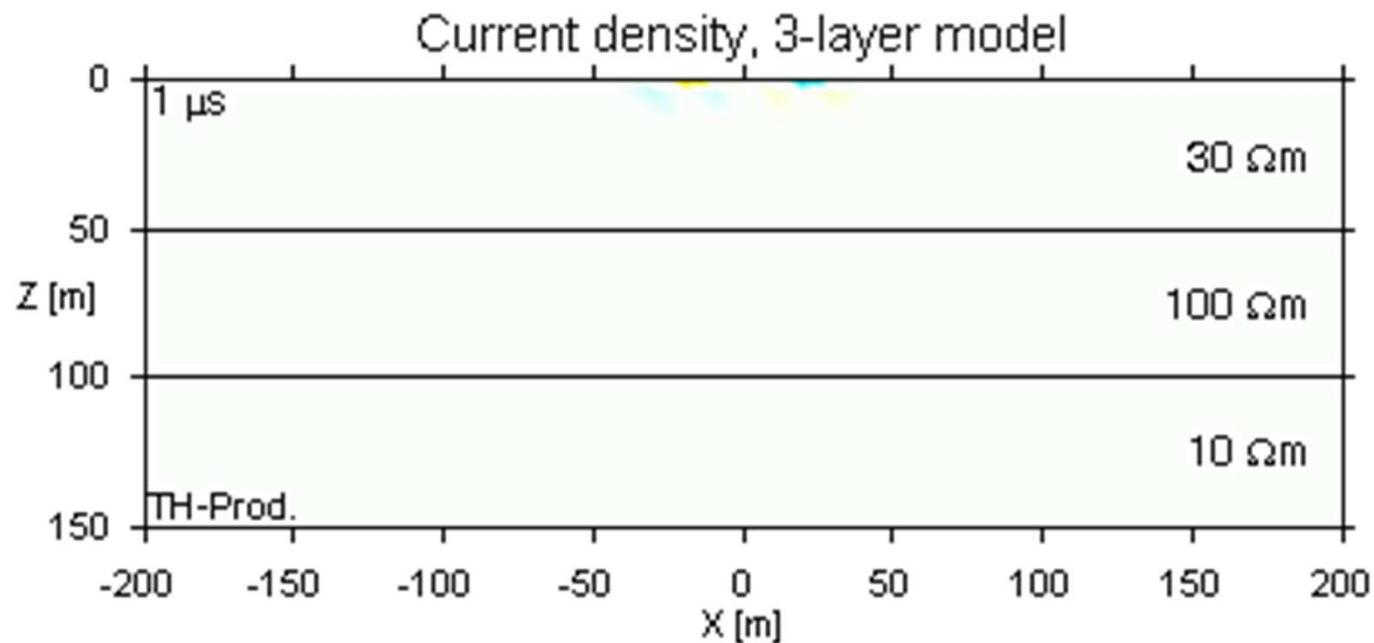
TDEM o TEM - Sounding (**Transient** Electromagnetic Method)



Al momento dell'apertura del circuito, viene prodotto un c.m.p. variabile che induce corrente nel terreno. La diffusione della corrente rispecchia la forma geometrica del loop TX

TDEM: diffusione corrente nel sottosuolo Animazioni-1 (fornito da: SkyTEM (A. Viezzoli))

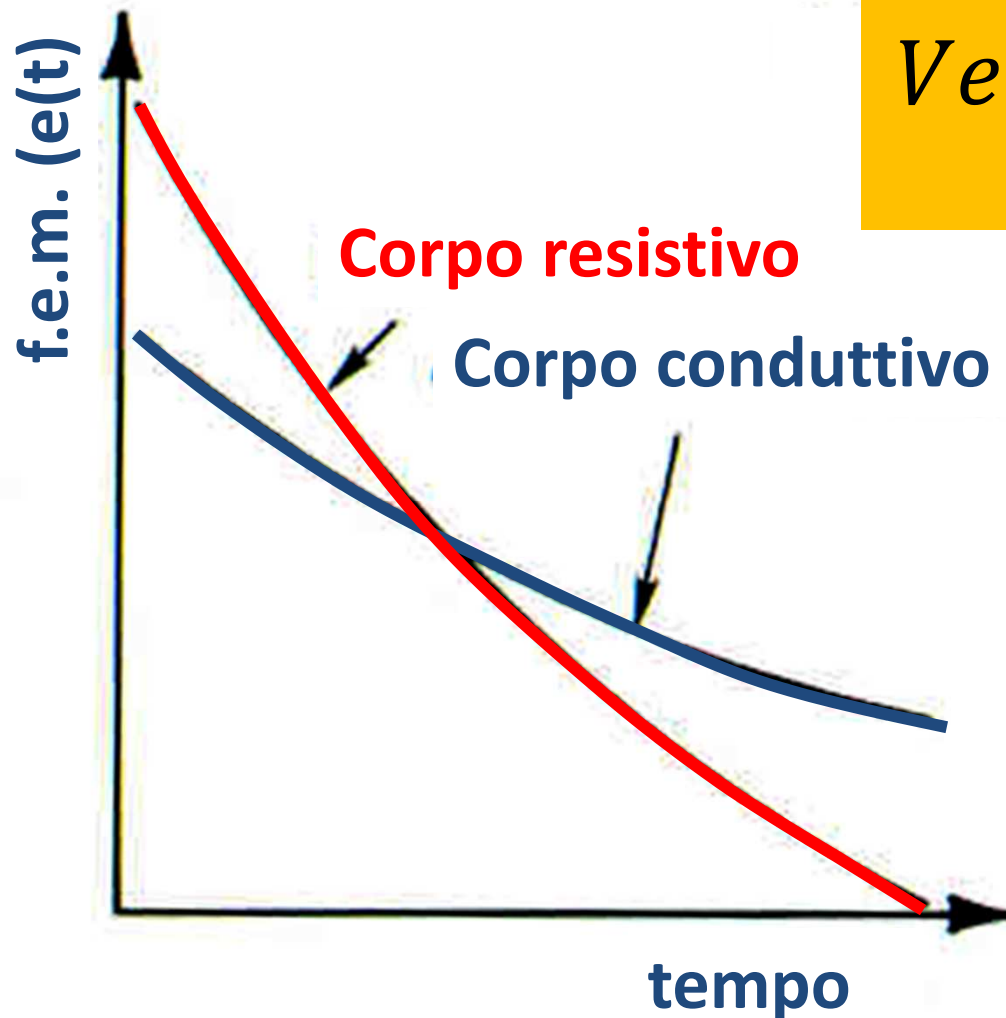
NB: Il elettrostrato conduttivo tra due elettrostrati resistivi –
tipo curva SEV: K



Velocità di diffusione è espressa da: $V=(2\sigma\mu t)^{-1/2}$

TDEM

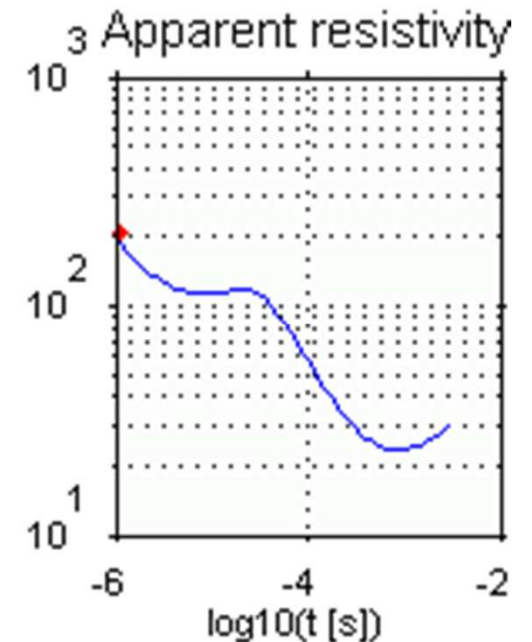
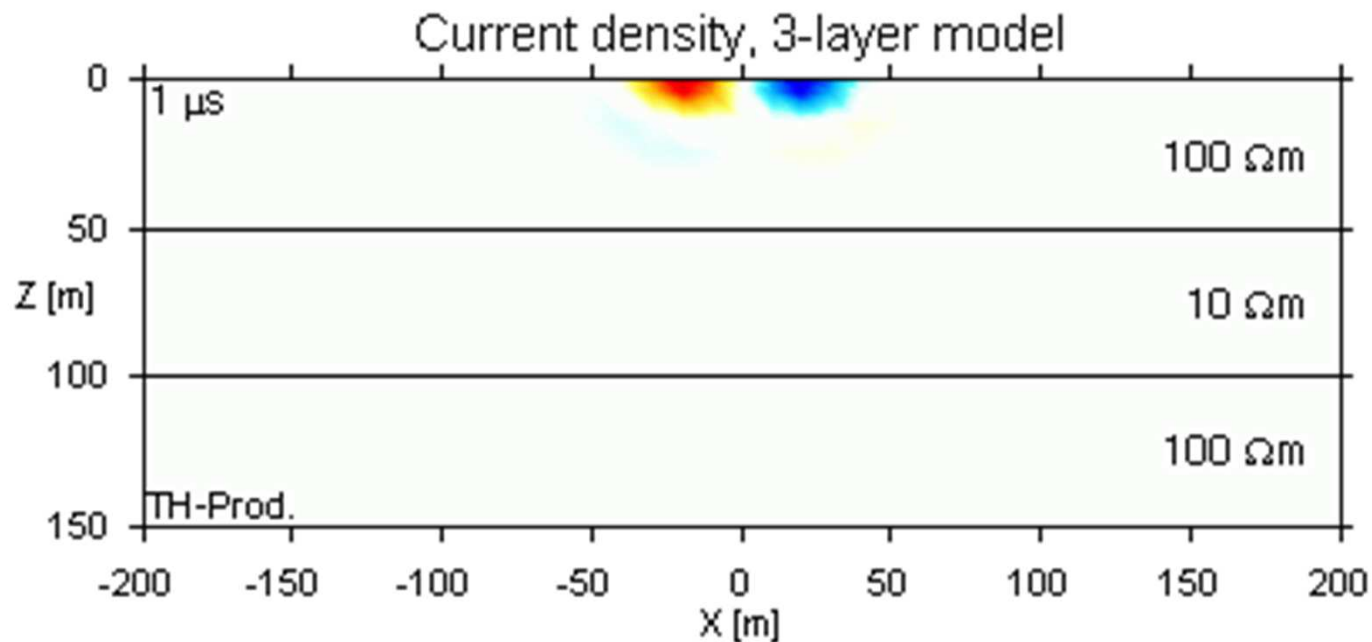
Velocità di diffusione in profondità dipende da (1) conduttività
(2) Tempo



$$Velocità = \frac{1}{\sqrt{2\sigma\mu t}}$$

TDEM: diffusione corrente nel sottosuolo Animazioni-1 (fornito da: SkyTEM (A. Viezzoli))

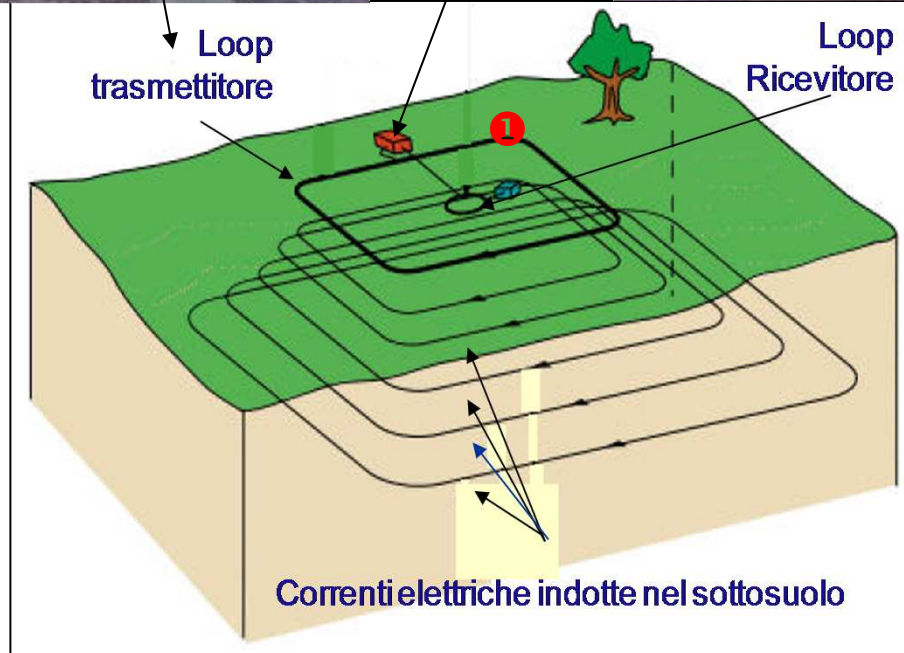
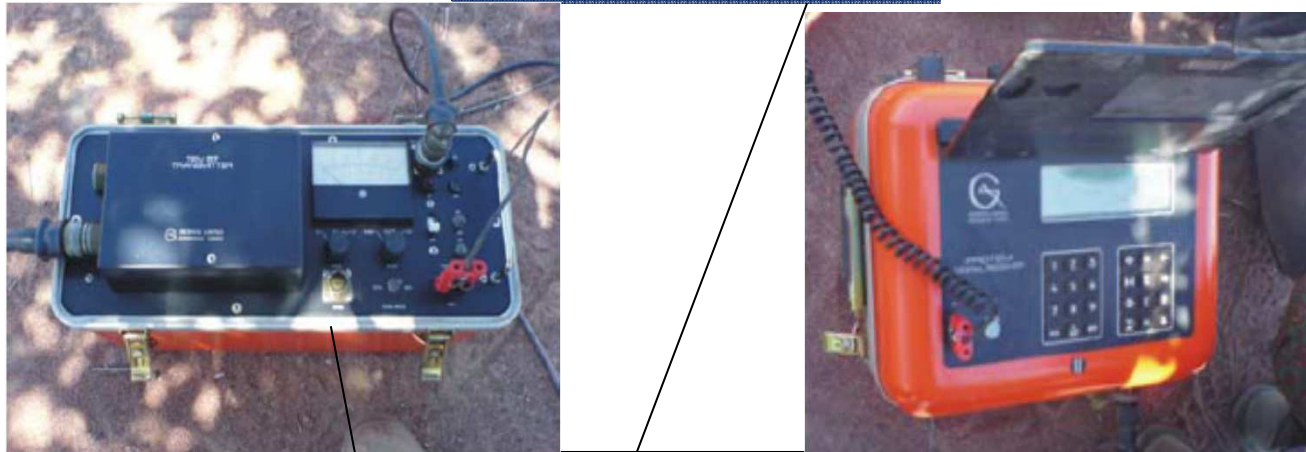
NB: Il elettrostrato conduttivo tra due elettrostrati resistivi –
tipo curva SEV: H



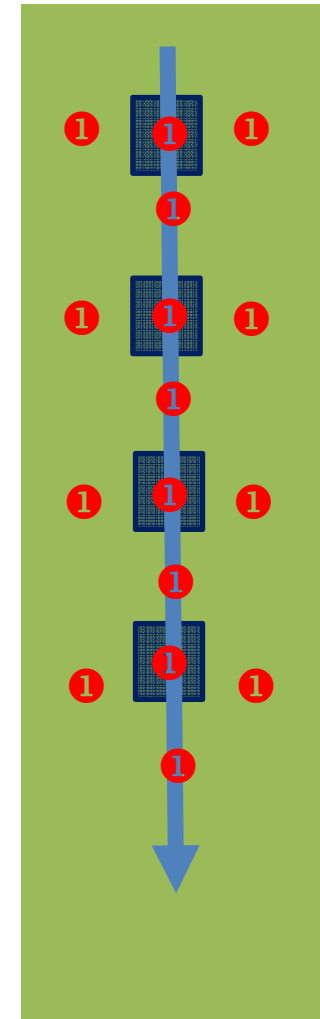
Velocità di diffusione è espressa da: $V=(2\sigma\mu t)^{-1/2}$

Profili discontinui (composti dall'assemblaggio di singoli sondaggi TDEM (1))

strumentazione



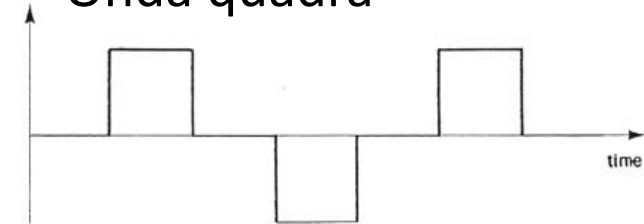
Modalità
acquisizione dati



Il metodo «TDEM» (Time-Domain Electromagnetic Method: concetto della misura

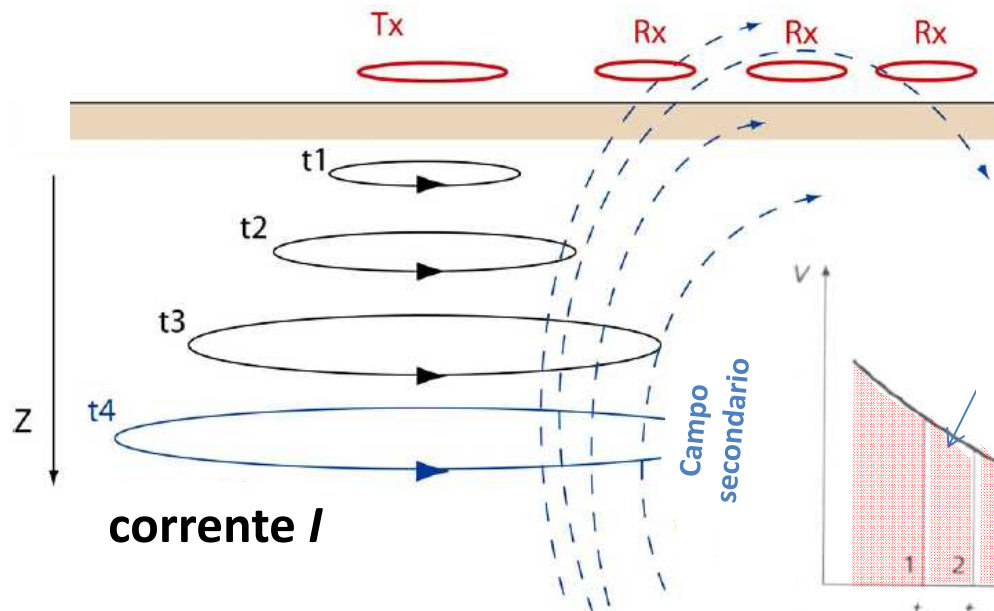
corrente inviata nella spira Tx

Onda quadra

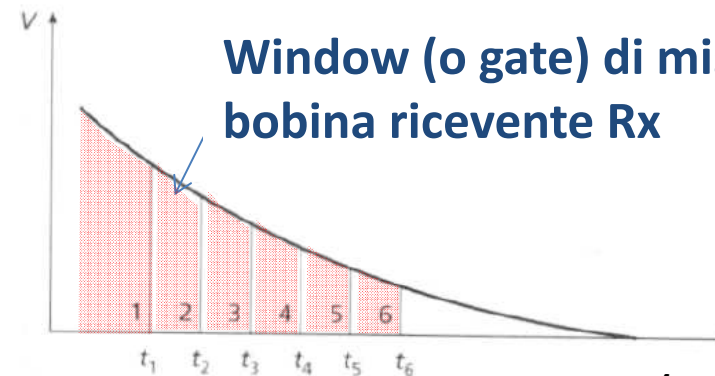


Voltaggio indotto nella spira Rx

$$\frac{d(\nabla \times \mathbf{H}_s)}{dt} = \frac{d\mathbf{I}_s}{dt}$$



Window (o gate) di misura nella bobina ricevente Rx



Tempo (ms.. qualche secondo)

TDEM:

Cosa si misura? f.e.m. indotta nella bobina ricevente

finestre (gate) di registrazione della f.e.m.)

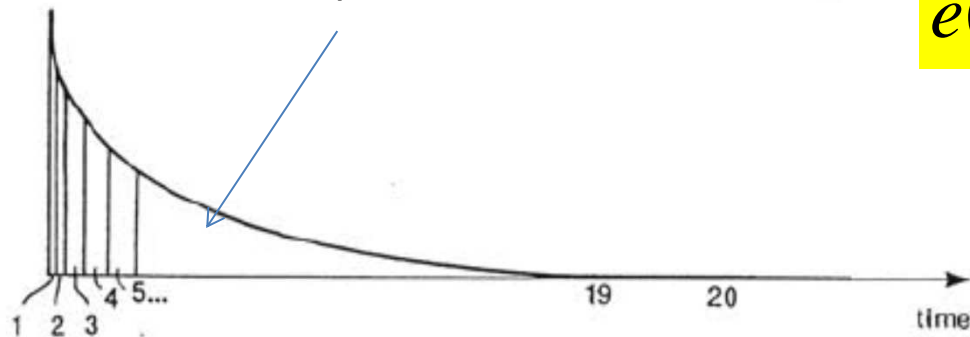


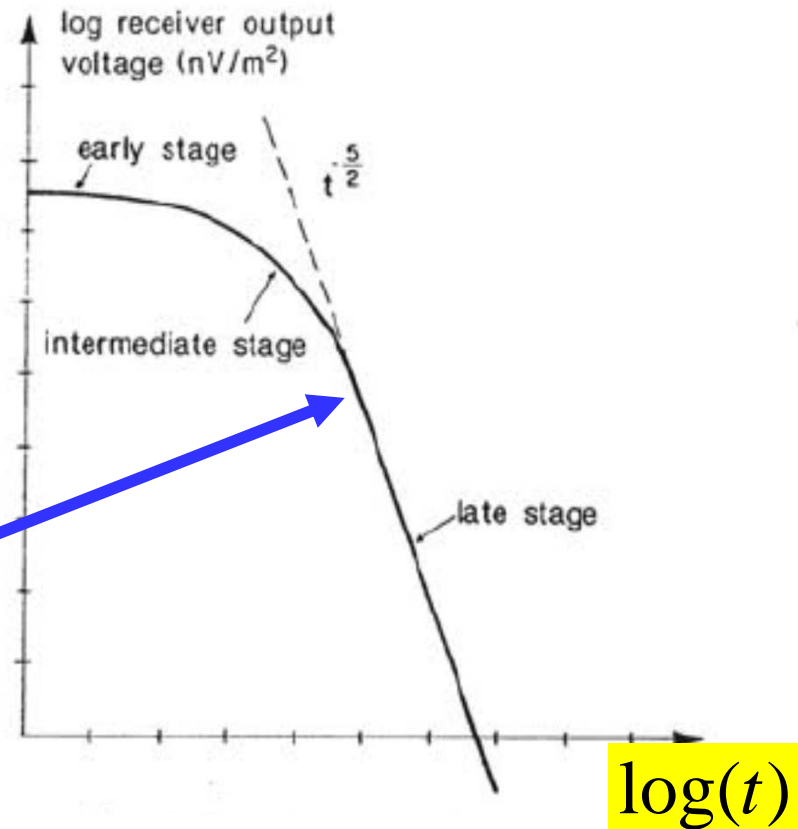
Fig. 5 Receiver gate locations

$$e(t) = \frac{k_1 M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}}$$

nV/m²

K1: costante dipendente dalla geometria del loop
M: momento (Area del Loop * Intensità corrente)

$e(t)$

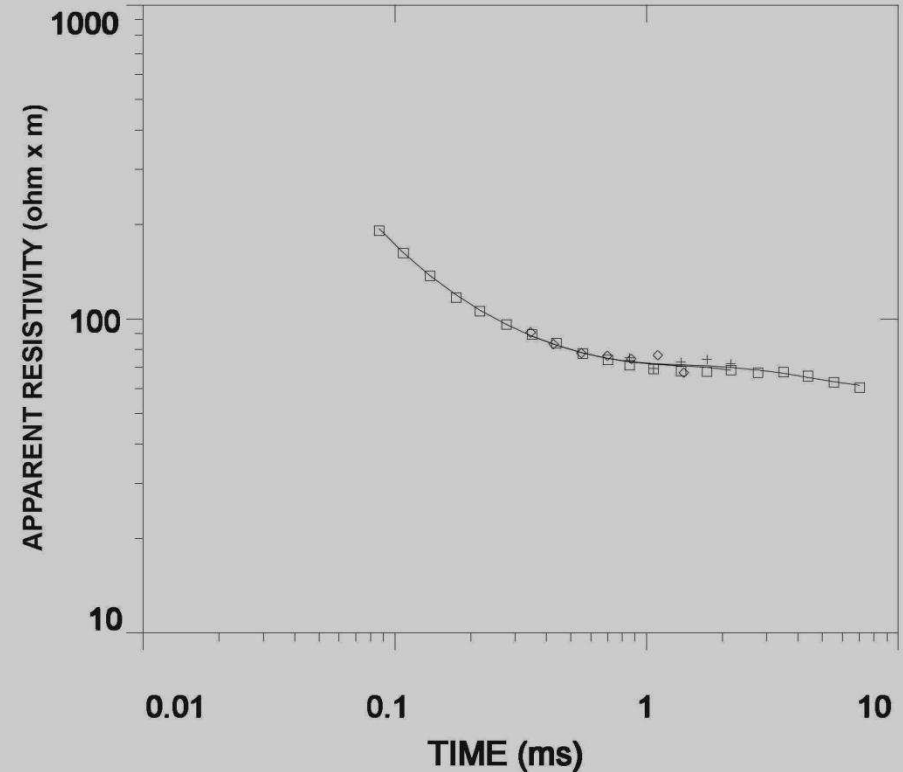
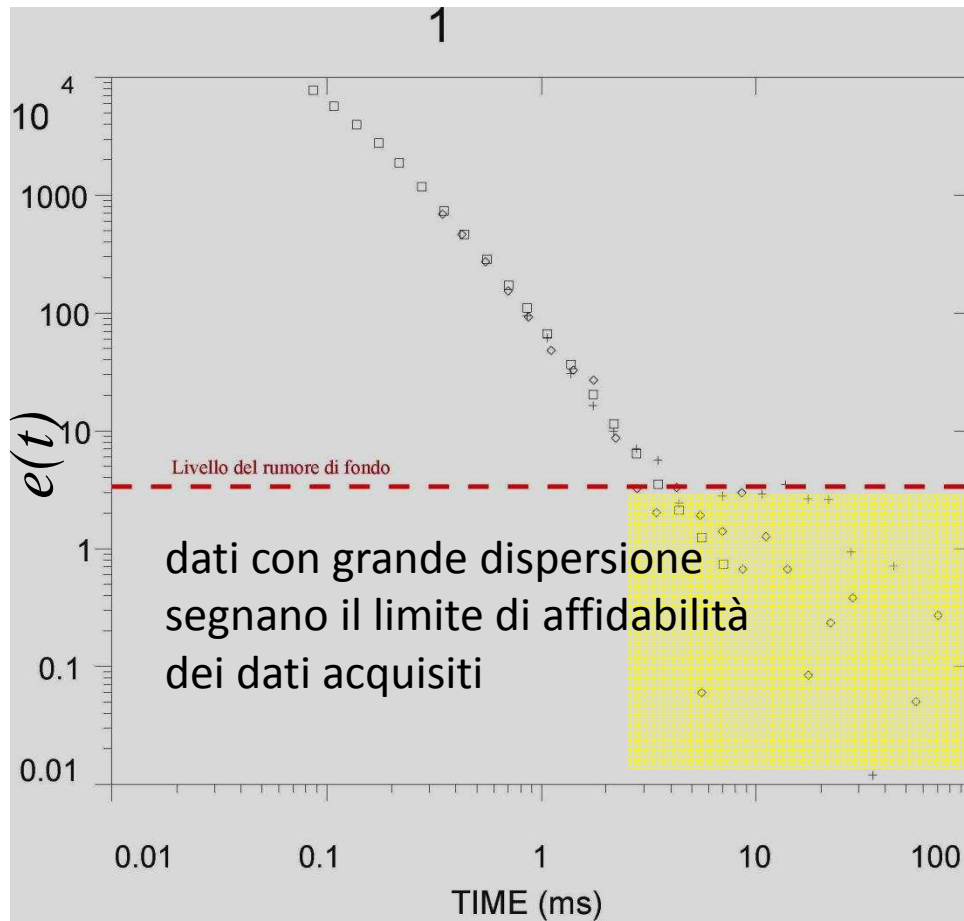


curva sperimentale di un sondaggio TEM (variazione di f.e.m. nel tempo)

TDEM:

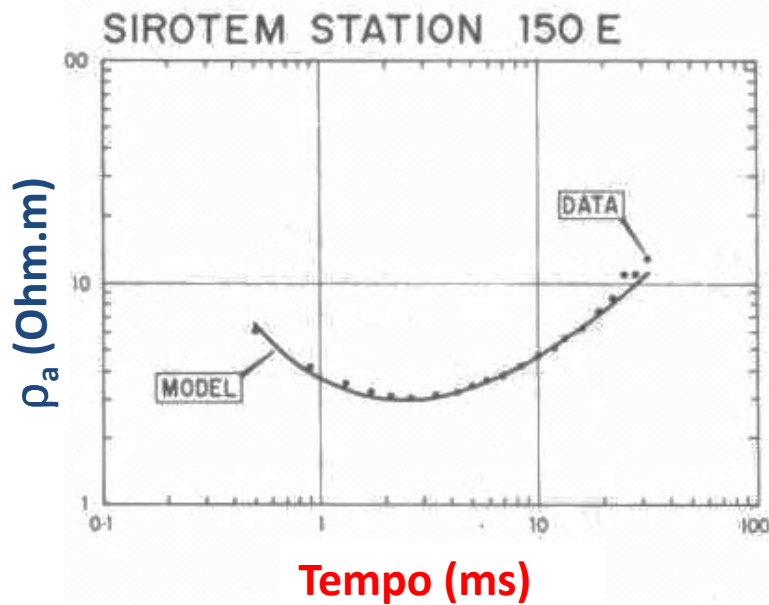
Dal tranistorio (f.e.m.) si ottengono i dati della resistività apparente

$$\rho_a(t) = \frac{k_2 M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}}$$



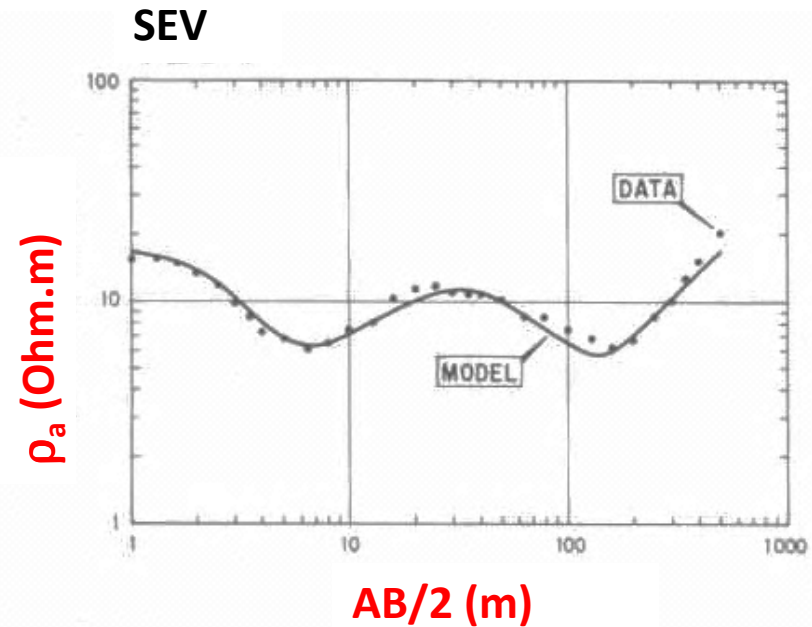
Dati raccolti da S.Te.G.A. (VT) per conto dell'Università di Ferrara, 2007/2008

Il metodo «TDEM» (Time-Domain Electromagnetic Method:
 Confronto curve di resistività apparente ottenute da sondaggi 1D/TEM e
 da SEV



LAYER	THICKNESS (meters)	RESISTIVITY (ohm-meters)
1	1.5*	17*
2	3.0*	3.1*
3	24**	21
4	36**	1.4**
5		380

- * Fixed parameter
- ** Influential parameter

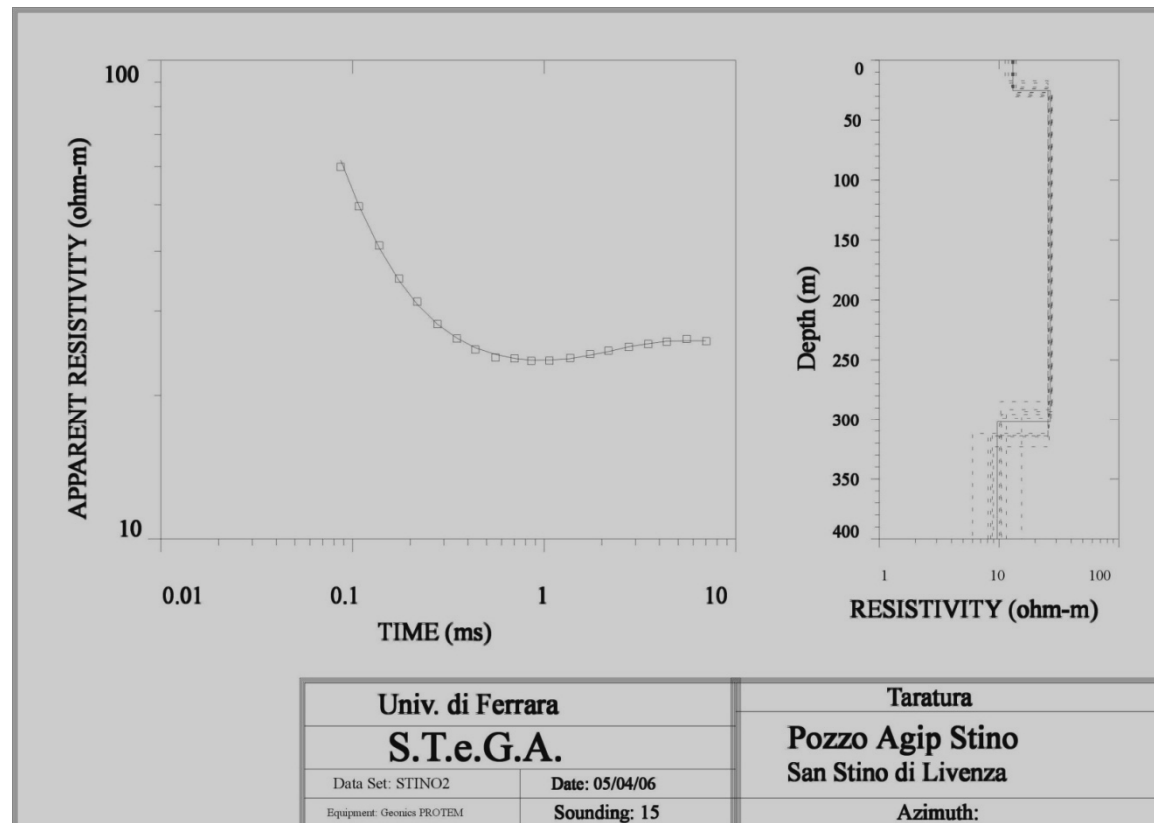


LAYER	THICKNESS (meters)	RESISTIVITY (ohm-meters)
1	1.5	17
2	3.0	3.1
3	20.0	22.0
4	43.0	1.6
5		250.0

TDEM

L'inversione: dalla curva della resistività apparente al modello 1D a numero di strati predeterminato

L'inversione, o regressione, è quel procedimento matematico-statistico col quale si stimano i parametri di un "modello interpretativo", **minimizzando la "distanza"**, opportunamente definita, tra la funzione sperimentale, nota per punti (es. la resistività apparente) e la stessa funzione, calcolata dal modello.



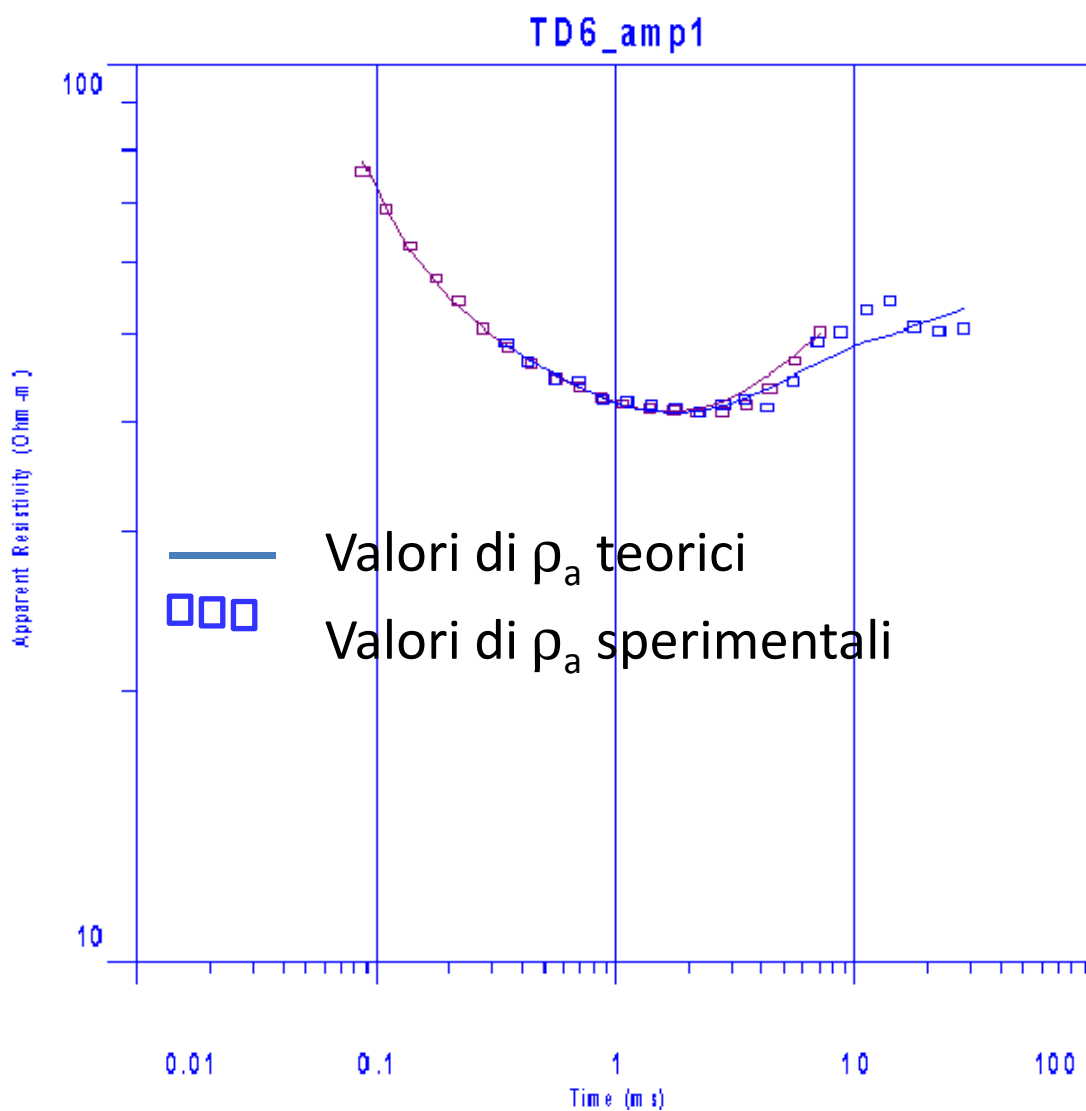
TDEM

L'inversione: lo schema di Occam

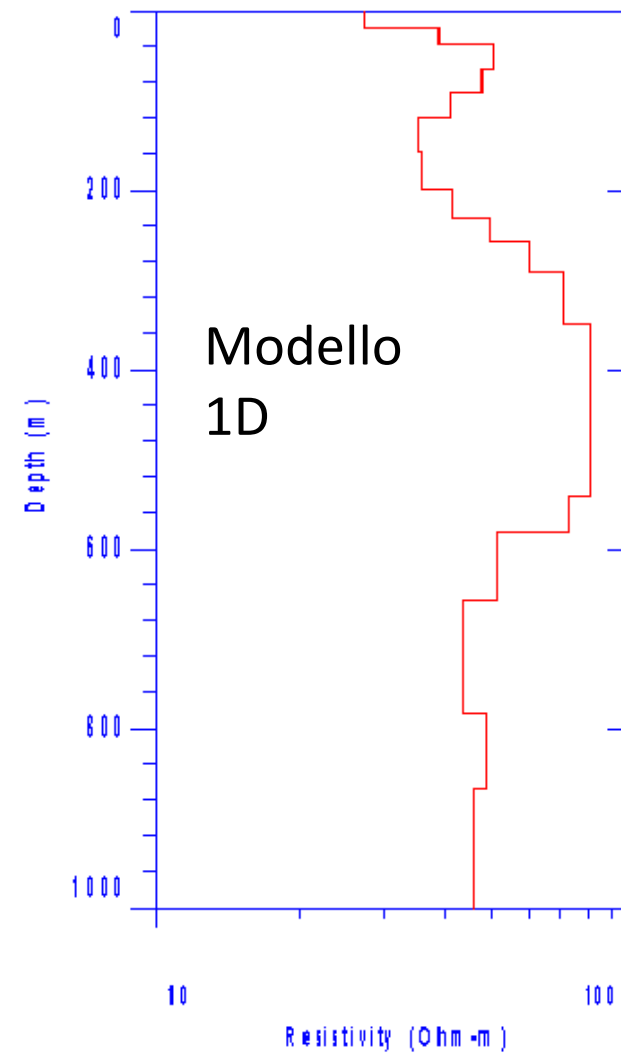
- il modello è una sequenza di strati piano-paralleli, il cui numero è prefissato dall'interprete,
- questo schema risulta insoddisfacente perché introduce una scelta esterna "arbitraria",
- Lo schema precedente è stato affiancato lo schema detto "di Occam",
- ovvero, l'inversione: **il processo di minimizzazione della distanza tra i dati reali e quelli calcolati da un modello**, viene condizionata da una "ragionevole" condizione stabilizzatrice, e cioè, tra varie scelte possibili, la condizione di "**minima rugosità**",
- Questo, nell'inversione 1D dei dati TEM, significa che le resistività di due elettrostrati contigui non possono assumere valori arbitrariamente diversi.
- Il numero di "**strati**" può uguagliare il numero di dati di resistività apparente -1 (cioè il numero dei "**time gates utilizzati per la misura dell'intensità della f.e.m. nella bobina ricevente**"),
- ne risulta un modello "**smooth**", dove però l'informazione geofisica è legata solo alla struttura dei dati.

TDEM

L'inversione smooth con lo schema di Occam - esempio



Modello di resistività 1D

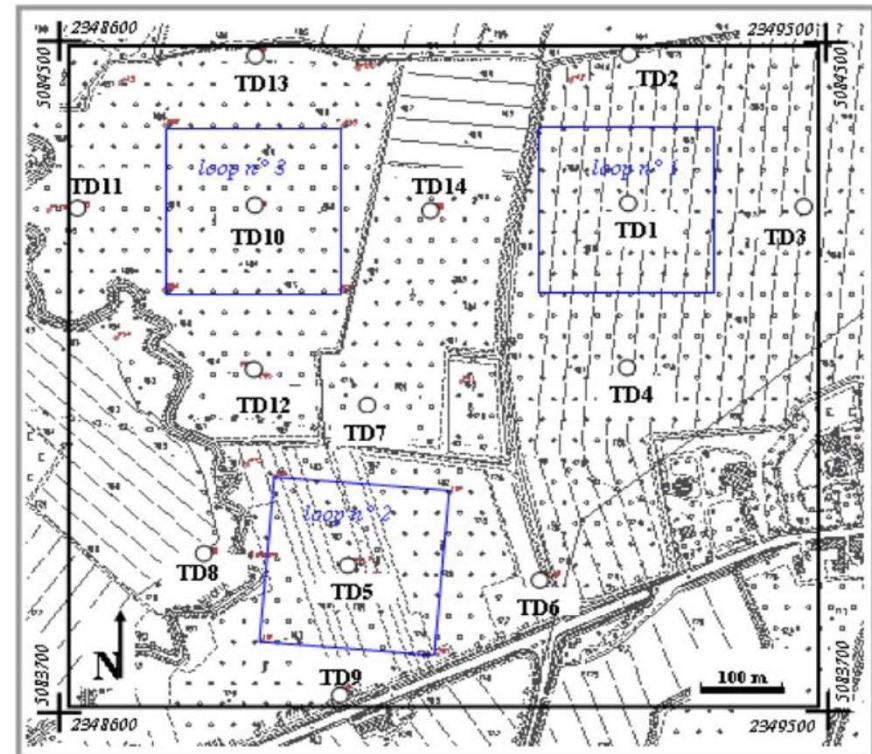
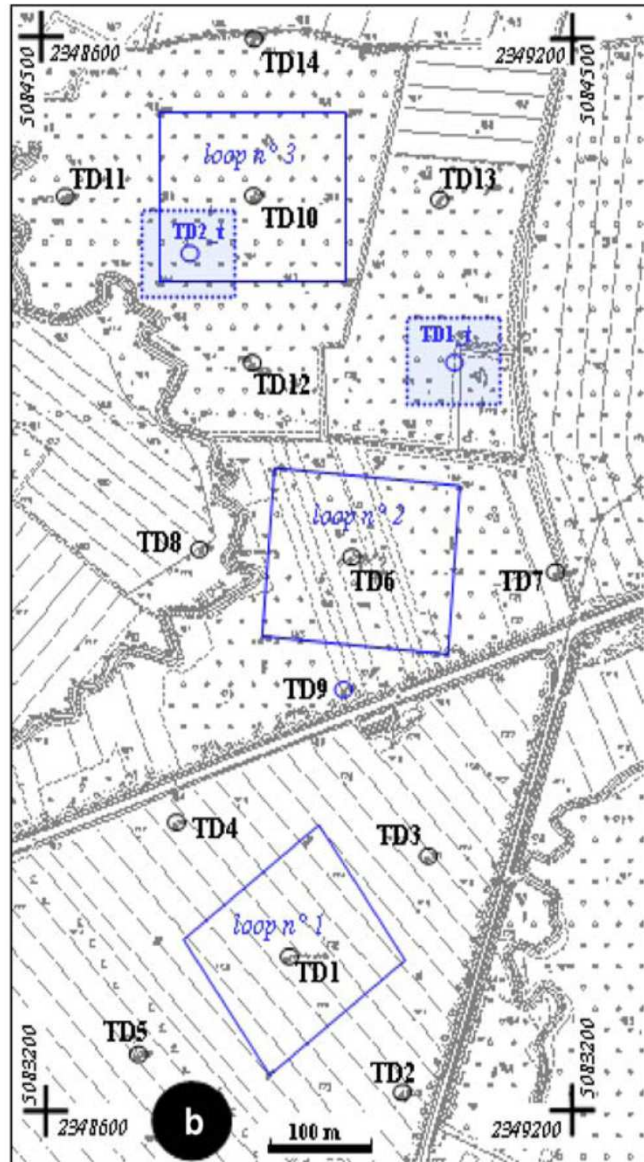


Strumentazione GEONICS TEM57/PROTEM;

Ottobre 2005

loops 200x200 m

Aprile 2006

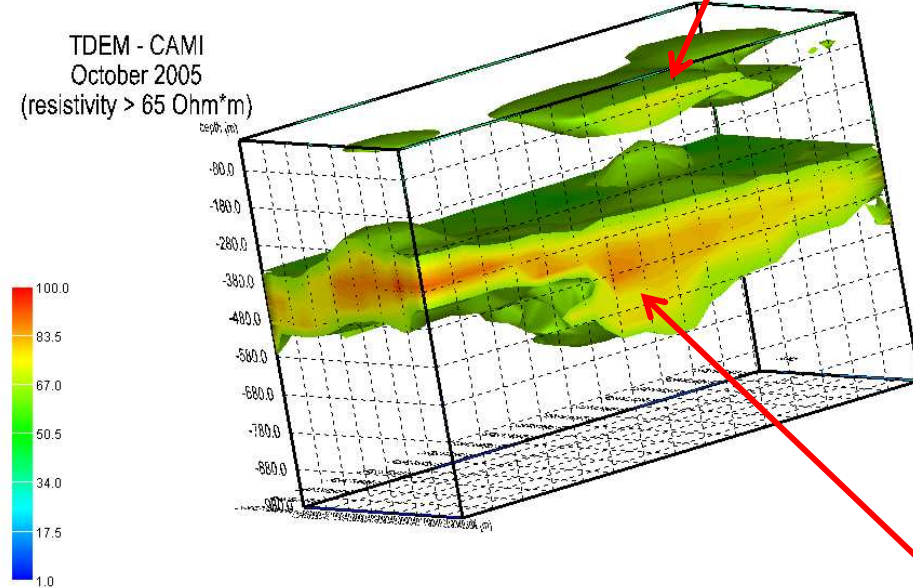


D. Rapti-Caputo, A. Bratus, G. Santarato, 2009: Geophysical exploration integrated with hydrogeological data of a deep multiaquifer system: results from a pilot site. Hydrogeology Journal, 17, ISSN 1431-2174, 1393-1409

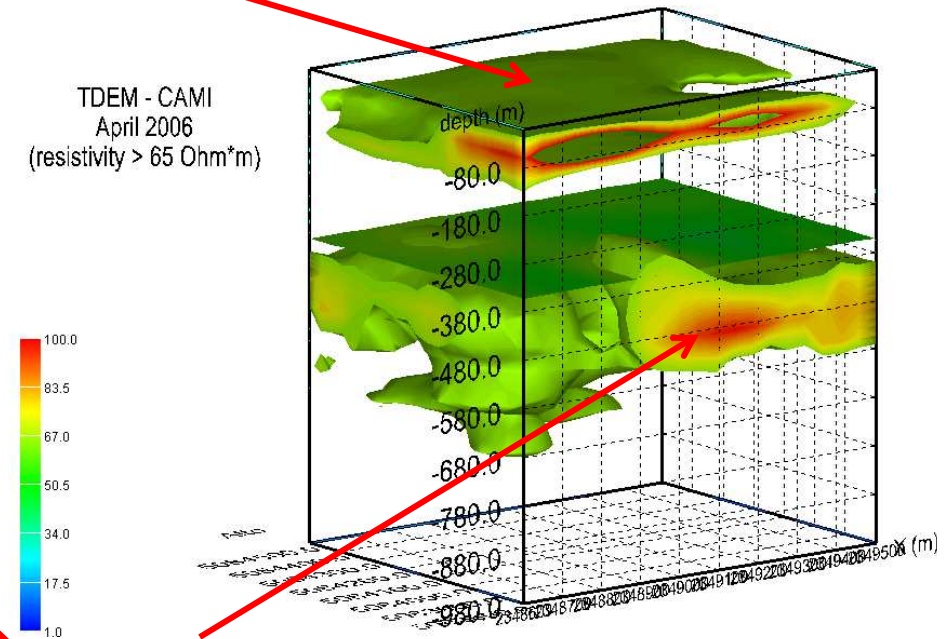
Modelli di resistività in pseudo3D ottenuti da indagini tipo TDEM

Primo acquifero confinato (A1)

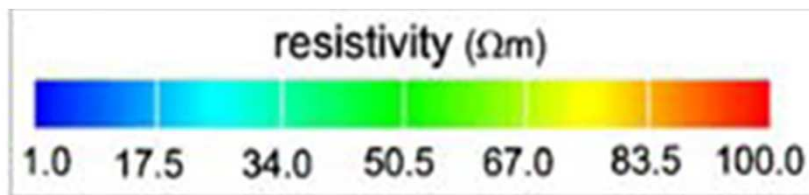
TDEM - CAMI
October 2005
(resistivity > 65 Ohm*m)



TDEM - CAMI
April 2006
(resistivity > 65 Ohm*m)

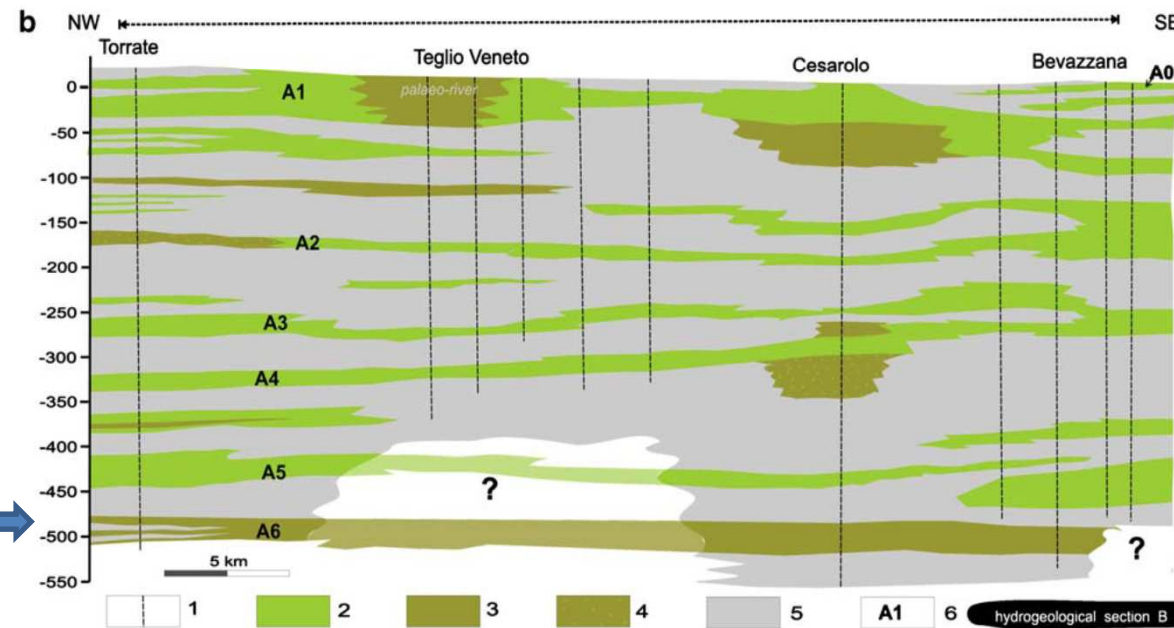
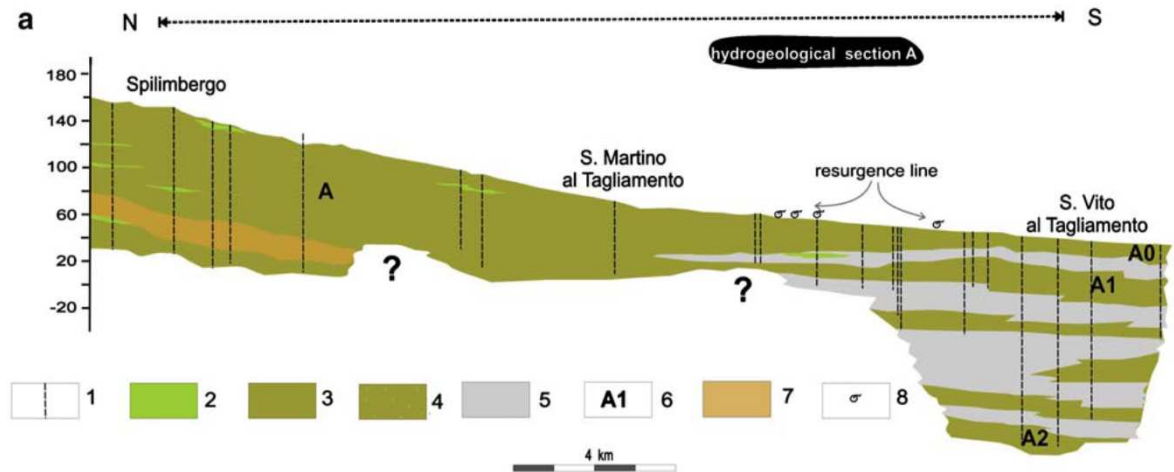


Acquifero profondo A6



D. Rapti-Caputo, A. Bratus, G. Santarato, 2009: Geophysical exploration integrated with hydrogeological data of a deep multiaquifer system: results from a pilot site. Hydrogeology Journal, 17, ISSN 1431-2174, 1393-1409

Il modello idrogeologico regionale



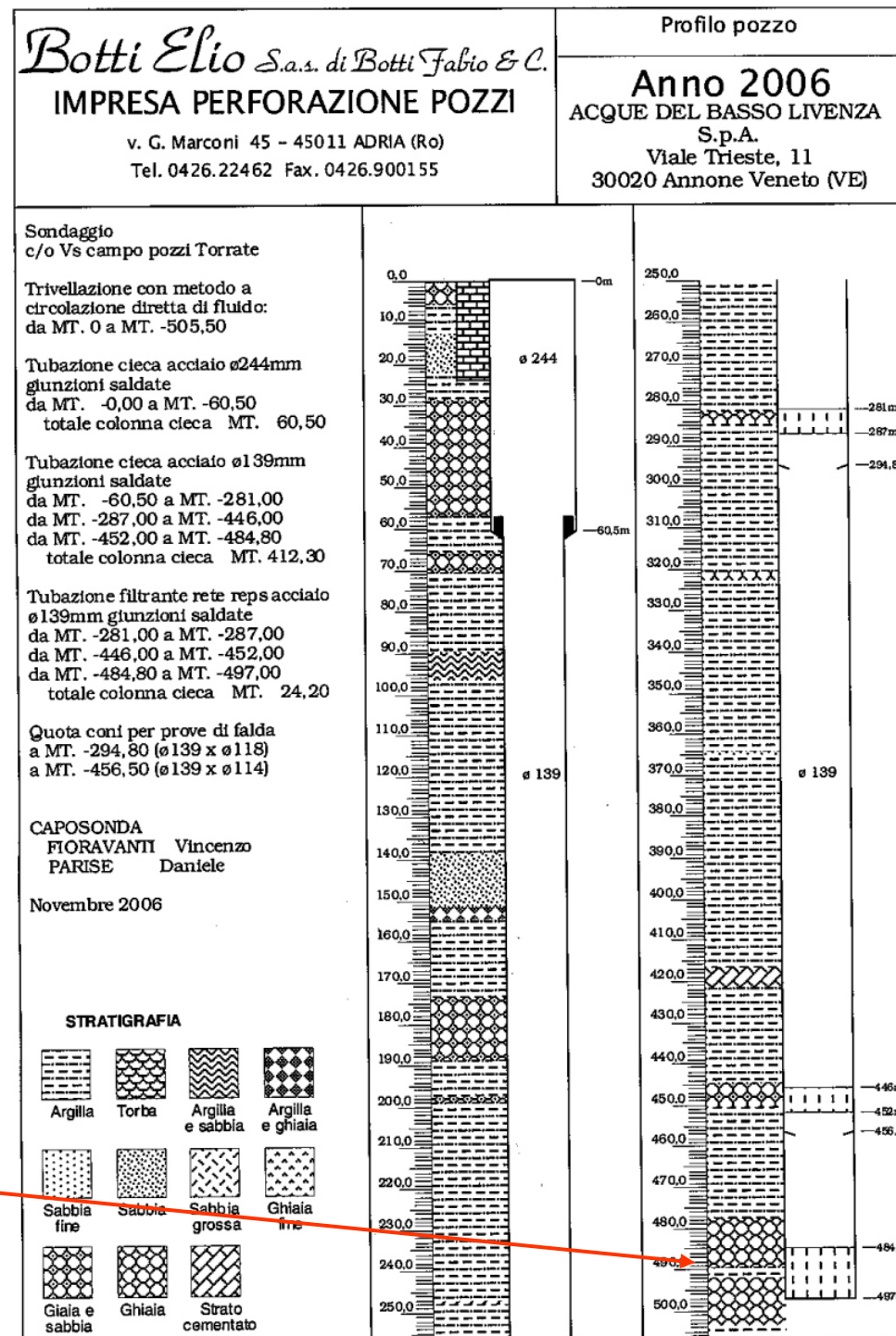
A6:
Prima
dell'indagine
non si
sapeva
dell'esistenza
di questo
acquifero



D. Rapti-Caputo, A. Bratus, G. Santarato, 2009: Geophysical exploration integrated with hydrogeological data of a deep multiaquifer system: results from a pilot site. Hydrogeology Journal, 17, ISSN 1431-2174, 1393-1409

Il pozzo esplorativo profondo

Acquifero A6,
precedentemente
sconosciuto



Il metodo «TDEM» (Time-Domain Electromagnetic Method oppure TEM: Transient EM)

- Il metodo sfrutta un campo magnetico principale composto da serie di impulsi discontinui separati nel tempo,
- Il campo magnetico principale e quello secondario sono separate
- Profondità d'indagine 10/15 m fino a qualche km

TEM: Transient EM): vantaggi

- L'indagine è facile da effettuare sul campo
- Non richiede tempi lunghi
- Costi ragionevoli
- Produzione elevata
- Valutazione qualità dati quasi immediata
- **Non richiede il contatto diretto con il terreno**
- Il problema dell'equivalenza c'è ma meno rispetto al metodo galvanico

Lab. Di Geofisica 21/11/2018

Aula: F31

Mercoledì: dalle 9.30 alle 11.30

Calcolo diretto della risposta di resistività/caricabilità apparente utilizzando il codice Res2dMod

Simulazione onde EM riflesse:

- scaricare il codice GPRsim dalla pagine del docente
- ambiente windowsx64

Se riusciamo vedremo un esempio di elaborazione dei dati GPR acquisiti a fine ottobre 2018 a Ferrara sotto le mura del baluardo di San Tommaso