

## CSEMM im Feldtest

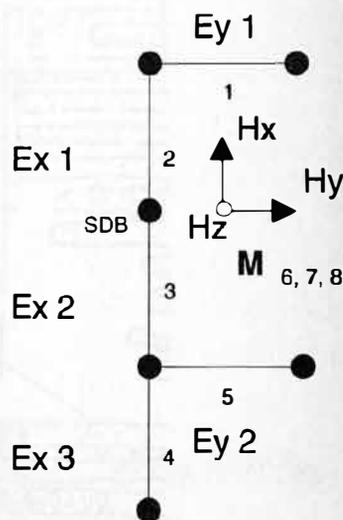
### a) Messaufbau

CSEMM steht für Controlled Source Electromagnetic Mapping: mit Hilfe eines Senders werden elektromagnetische Wellen mit vorgegebenen Frequenzen emittiert, welche im Zielgebiet mit einer MT-Apparatur (Spulen, E-Feldsonden) aufgezeichnet werden.

Die Ursprüngliche Idee des E-Mapping, mit einem Satz Spulen und einem Netz von E-Feldauslagen ein grösseres Gebiet zu untersuchen, wurde hier soweit verändert, dass hier eine MT-Station mit einer dreifachen E-Felauflage verknüpft ist. Bei einer Sondenauslage von 25m werden so 75m in einem Setup erfasst; über das Profil gesehen ergibt sich so ein kontinuierlicher Sondenabstand von 25m für das E-Feld und von 75m für das magnetische Feld.

Der Aufbau des Senders erweist sich als ausserordentlich kritisch. Um mit den Formeln der klassischen MT rechnen zu dürfen, muss der Sender *mindestens* drei Skin-Tiefen entfernt vom Empfänger aufgestellt werden (d.h. erwartet man Eindringtiefen um 2 km bei 20Hz, so muss der Sender mindestens 6km entfernt aufgebaut werden, damit diese Frequenz "klassisch" ausgewertet werden kann). Mit zunehmenden Abstand wird das Signal jedoch schwächer, was jedoch mit grösserer Sendeleistung und langem Elektrodenabstand

(Erhöhung des Dipolmoments) in gewissen Grenzen kompensiert werden kann - soweit die Theorie. Messungen in Spanien zeigten jedoch, dass einzelne Frequenzen nicht empfangen werden konnten; wobei unklar ist, ob die Geologie am Sender selbst oder die zwischen Sender und Empfänger Ursache dafür war. In stark zersiedelten Gebieten wie Irland ist es wiederum kaum möglich, Elektrodenauslagen über 800m zu realisieren, ohne dass man auf Strassen oder andere Hindernisse stösst. Zu guter Letzt sei noch erwähnt, dass selbst bei enormen Sendeleistungen (30 Ampere, 1000 Volt) es vorkommt, dass in etwa 3 km Entfernung nur ein sehr schwaches Signal zu empfangen ist. Könnte man dieses Phänomen untersuchen, wäre eventuell eine interessante geologische Struktur zu entdecken. In der Regel bleibt nur ein Probeaufbau des Senders, bis man im Zielgebiet ein auswertbares Signal empfängt.



### b) Equipment

Der Transmitter stammt von der Firma Zonge und bietet eine Maximalleistung von 30kW; der Receiver ist die GMS05 der Firma Metronix mit den Spulen KIM 879, ebenfalls von Metronix. Es kann hiermit in einem Frequenzbereich von 8000Hz - 3Hz sondiert werden.

Die benutzte Software zur Bestimmung der Impedanzen aus den Zeitreihen stammt von A. Ellinghaus,

das Auswerteprogramm von mir selbst und das 2D-Inversionsprogramm RRI von Smith und Booker. Benutzt wurde weiter GMT von Smith und Wessel zur graphischen Darstellung.

Die Datenqualität der hier vorgestellten Messungen aus Südspanien war gut; schon nach wenigen Sekunden waren Phase und Widerstand bestimmt. Alle 32 Frequenzen konnten so innerhalb von 50 Minuten gemessen werden. Ermöglicht wird das durch das Online-processing der GMS05, welche alle relevanten Daten - auch die Spektralwerte - der laufenden Messung darstellt. Ziel ist es, innerhalb kurzer Zeit, den Erfolg der Messungen zu begutachten und innerhalb weniger Wochen zweidimensionale Modelle angepasst zu haben.

#### c) Das Projekt

1977 wurden durch gravimetrische Sondierungen Erzlagerstätten in Neves und Corvo in Portugal entdeckt. Das Erzvorkommen befindet sich in Tiefen von durchschnittlich über 300m - 500m. Das Interessante an der Entdeckung ist, dass im Iberischen Pyritgürtel seit der Römerzeit Erze abgebaut worden sind und diese Lagerstätten solange unerkannt blieben. Zwar ist der Dichtekontrast zwischen dem Ergussgestein ( $2.5 \dots 2.95 \text{ g/cm}^3$ ) und den massiven Pyriten ( $4 \dots 4.5 \text{ g/cm}^3$ ) sehr hoch, aber ebenso auch die Unsicherheit in der Modellierung, da die Erze sehr tief liegen.

Für die meisten geoelektrischen Verfahren wie VLF-R, IP und MaxMin gilt das Gleiche: Für Sondierungen im Tiefenbereich über 300m sind diese zu ungenau, besonders wenn wie in Südspanien, eine gutleitende Deckschicht vorhanden ist. Die AMT und CSAMT (CSEMM) haben jedoch gute Chancen, in der Tiefe von 50 - 2000m aussagekräftige Ergebnisse zu erbringen: der erwartete Leitfähigkeitskontrast liegt im Bereich 1:1000 - 1:10000. Man erhofft auch Aussagen über die Höfigkeit des Gesteins anhand der modellierten Leitfähigkeiten zu gewinnen. Sollten Probebohrungen die Zuverlässigkeit der Modellierungen bestätigen, ist zu erwarten, dass Gravimetrie und CSEMM gemeinsam zur Lagerstätten erkundung eingesetzt werden.

#### d) Daten

Die weiter unten zeigt eine Abbildung einen typischen Verlauf der  $\rho_a$  und Phasen im Messgebiet. Dabei ist deutlich die geringe Modulation der Phasen zu erkennen - etwa  $5^\circ$  - und das anomale Verhalten der Widerstände, die über einen Faktor zehn voneinander differieren, ohne dass dieses in der Phase nachzuvollziehen wäre. Ich glaube nicht, dass es sich hier um static shifts handelt, da im gesamten Messgebiet dieser Effekt auftritt.

Erste Modellrechnungen mit Smith und Bookers Programm RRI ergaben nur eine mangelhafte Anpassung an die Messdaten. Schliesslich wurden die Widerstände und Phasen nach den Eggers'schen Eigenwerten bestimmt und die kleineren Widerstände, die zugehörige Phase und die Phase des grösseren Widerstandes invertiert. Das Ergebnis ist befriedigend.

Trotz der Einschränkung, dass Eggers' prinzipielle Widerstände an die Bedingung geknüpft sind, dass die elektrischen und magnetischen Hauptachsen der Eigenvektorellipsen orthogonal zueinander stehen, hat sich diese Methode in diesem Fall als einfach anwendbar erwiesen.

Probleme gab es noch bei der Wahl des Startmodells für die Inversion. Ich kann nicht die Erfahrung teilen, dass die Wahl eines homogenen Halbraums gute Ergebnisse bringt. Somit wurde zuerst RRI in die Auswertesoftware integriert, mit der Möglichkeit ein Parameterfile zu schreiben, welches rotierte/unrotierte Widerstände oder Eggers' prinzipielle Widerstände oder Widerstände (nach

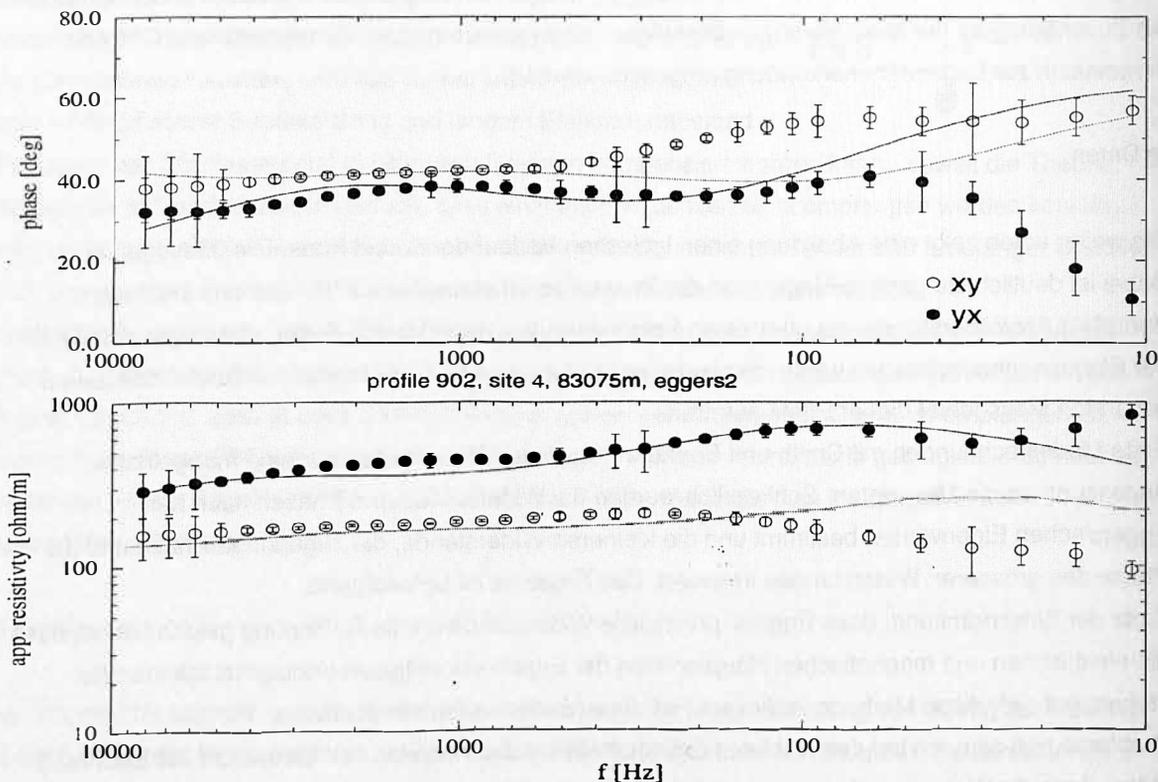
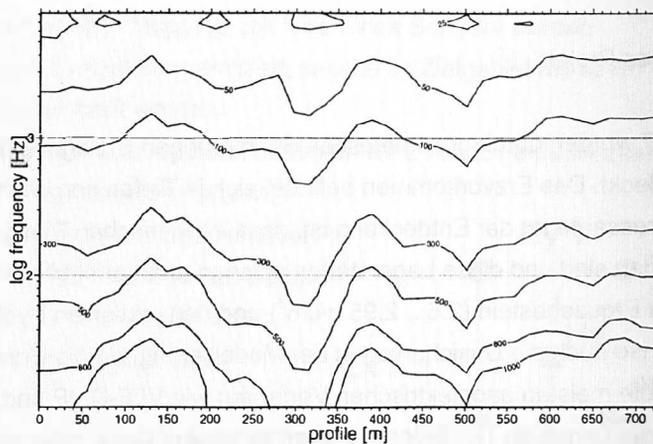
Schmucker) enthält, für die die Hauptachsen des tellurischen Feldes senkrecht zum magnetischen sind oder für die das tellurische Feld linear polarisiert ist (sofern dafür eine Lösung besteht; alle Größen können nach Polarisierungen, Wertebereichen und Fehlerlimits getrennt selektiert werden). Nach dem Schreiben des Parameterfiles, welches ein Modellgitter enthält, wird dieses wieder eingelesen,  $\rho^*$  - Werte werden für die einzelnen Gitterpunkte berechnet und in einem Startmodell für RRI gespeichert.

Zurück zu den Daten. Die folgende Abbildung zeigt die  $z^*$  Werte nach Schmucker:

abgesehen von ein paar oberflächennahen Artefakten ergeben sich insgesamt konsistente Werte über das Profil.

### e) Modellanpassung

Mit der oben beschriebenen Selektion der Eggers' schen Widerstände und Phasen wurden Modellrechnungen durchgeführt, deren Ergebnis für eine Station unten zu sehen ist. Die Anpassung für  $yx$  ist sehr gut gelungen - für den Widerstand sowie für die Phase, obwohl hier nur die Phase invertiert worden ist. Für die andere Polarisation können die niedrigeren Frequenzen (kleiner 300 Hz) nicht so gut interpretiert werden.



Insgesamt wurden so 110 Stationen angepasst und zu Profilschnitten sowie zu Schnitten in der Ebene für diskrete Tiefen zusammengestellt.

#### f) Modelle

Das Profil 908: Zu sehen sind die Modellwiderstände aufgetragen über das Profil und die Tiefe. Eingezeichnet als schwarze Linien sind die vermuteten, nur teilweise durch Bohrungen bestätigten geologischen Schichtgrenzen. Der vermutete Erzkörper ist als flachliegendes Dreieck mit einer Maximaltiefe von 450m eingezeichnet. Im Bereich der grössten Mächtigkeit ist auch im Modell ein guter Leiter zu erkennen, der sich allerdings in der darüberliegenden Schicht befindet. Insgesamt ergibt sich ein leichtes Einfallen dieser Struktur mit sich anschliessenden gutleitfähigen Zonen unterhalb, aus welchen der Erzkörper aufgestiegen sein könnte ( feeder zone) - es gibt allerdings keine Bohrungen bis in diese Tiefe.

Sehr gut wird auch die grosse Verwerfung bei  $\geq 83400\text{m}$  reproduziert, die einhergeht mit hohen Widerständen. Ebenfalls gut bestätigt sind die oberflächennahen "Linsen" guter Leitfähigkeit, zB. bei 83200m, 83300m in 50 - 100m Tiefe, bei denen es sich um alte, teils ausgebeutete Erzkörper handelt. Zonen erhöhter Leitfähigkeit gibt es bei allen Profilen auch im Bereich 81300m in 300- 400m Tiefe. Dort sind bis jetzt kaum Bohrungen abgeteuft worden - aber es gibt noch andere Hinweise aus der TEM auf erhöhte Leitfähigkeiten in diesem Bereich.

Aus allen Profilen habe ich dann einen Schnitt durch die Modelle in diversen Tiefen gelegt; hier dargestellt für 317m Tiefe (gleiche Skalierungen wie im Schnitt). Nochmal im Norden die Zone der hohen Widerstände, die exakt mit dem geologischen Streichen übereinstimmt, dann bei 90800, 83400m die grösste Mächtigkeit des Erzkörpers - auch in etwa die Vorhersage treffend und Zonen erhöhter Leitfähigkeit über 83200m nach Süden hinaus.

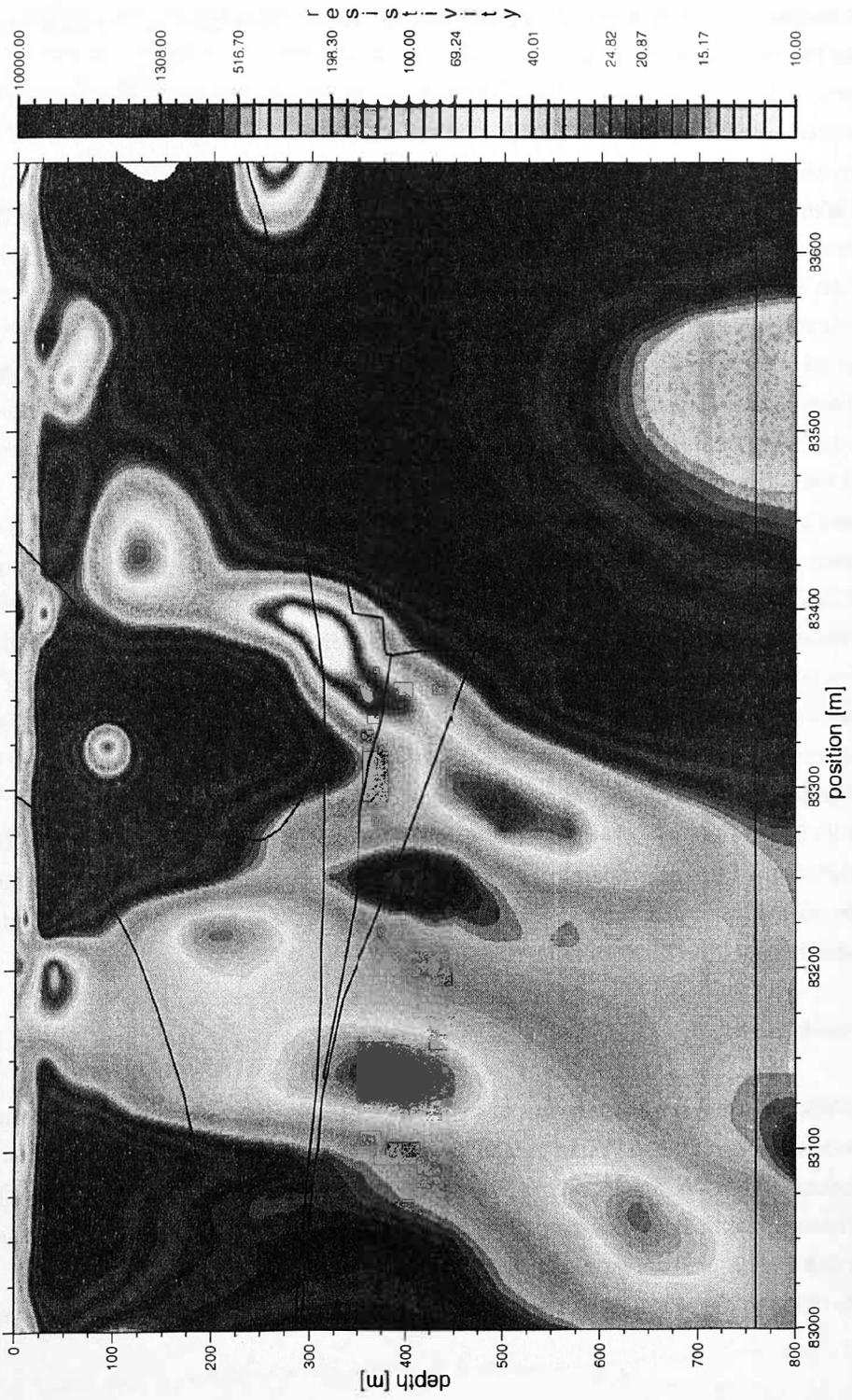
#### g) Zusammenfassung

In nur vier Wochen (reiner) Messzeit sind 110 CSEMM Stationen vermessen worden. Damit konnte gezeigt werden, dass auf diese Weise grossflächig bis in 800m Tiefe sondiert werden kann. Die geringe Modulation der Widerstands- und Phasenkurven erzwingt hochgenaues Arbeiten (Kalibrierung vor dem Messen), damit die Anpassung nicht im Messfehler untergeht. Auf der anderen Seite ermöglicht das Online-processing einen schnellen Fortschritt bei der Messung.

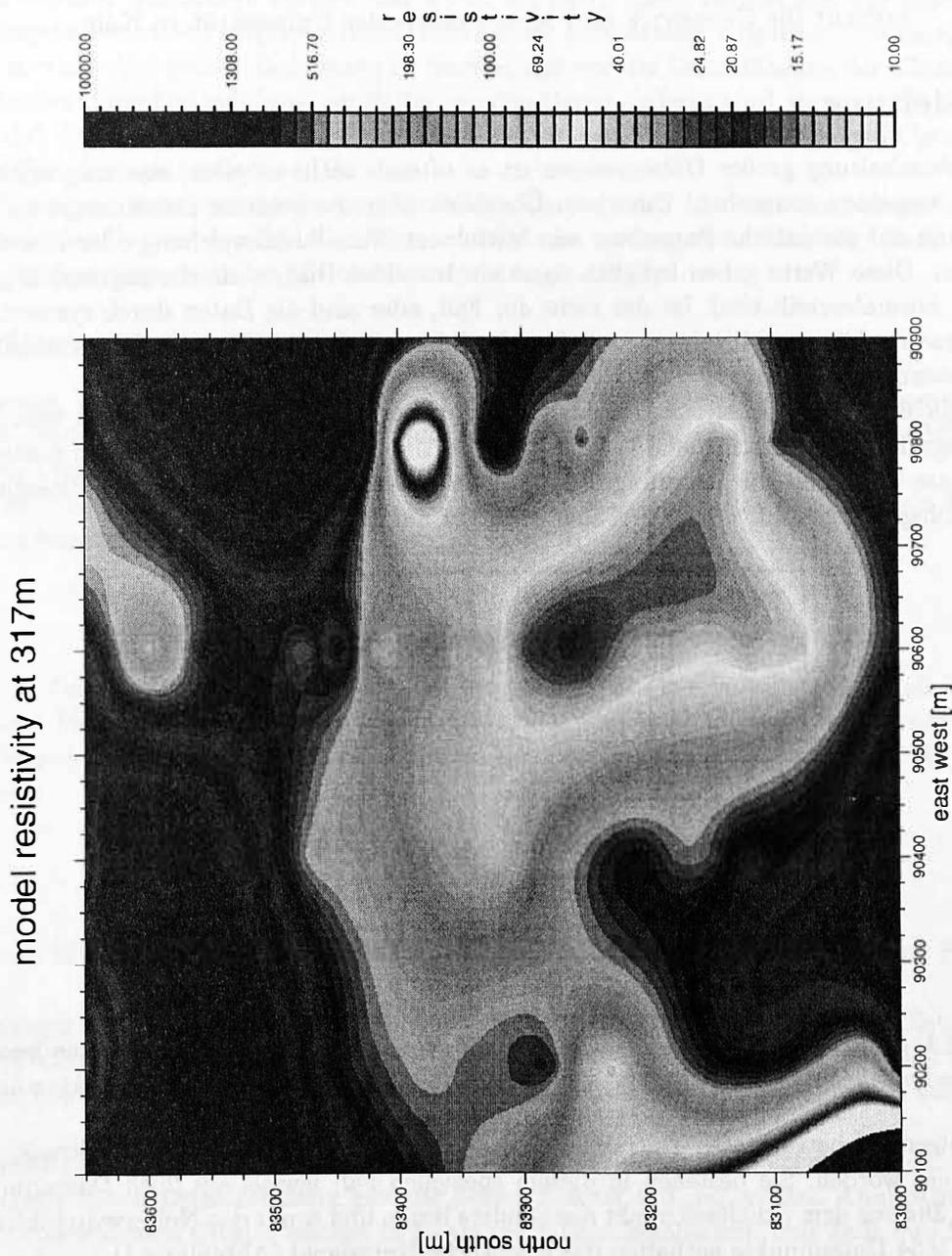
Die Modelle belegen die Möglichkeit, mit CSEMM in der Erzexploration grosse Erfolge zu erzielen.

\* Für die Abfassung des Artikels scheint sich der Autor nur vier Minuten genommen zu haben. (Anm. der Herausgeber)

profile 908 eggers 2



Modell: Profil 908



ebener Schnitt durch 2D Modelle in 317 Meter Tiefe

Hopgood, J.D., Hungerford, N.: Geophysical Case History of the Discovery of the Aguas Tenidas East Massive Sulphide Deposit, SW Spain; *Exploration Geophysics* (1994), 25, p. 1-17

Eggers, D.E.: An Eigenstate Formulation of the Magnetotelluric Impedance Tensor; *Geophysics*, 47, 1982, p. 1204-1214.

Schmucker, Ulrich: Analyse und Interpretation von EM Sondierungsdaten - neue Fassung älterer Programme, Kolloquiumsband Elektromagnetische Tiefensondierung, 1988