

Dipl.-Ing. E. K. BLOHM, Hannover

"Tiefenelektrik im Rheingraben"

Dienstag, den 4. 3. 1969

1. Einleitung

Die Tiefenelektrik ist die in ihrer Dimension stark vergrößerte geoelektrische Widerstandsmethode in der Vierpunktanordnung. Bei dieser Methode wird über zwei Erder an der Erdoberfläche dem Boden ein Strom zugeführt und in der Mitte der Elektrodenanordnung an einer vergleichsweise kleinen Sonderstrecke eine durch das Stromfeld hervorgerufene Potentialdifferenz gemessen. Diese Potentialdifferenz ist abhängig von dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ des Untergrundes, vom Strom I und von einem Faktor K , der die Geometrie der Meßanordnung beschreibt.

Werden nun die Elektroden immer weiter auseinander geführt, so bestimmen tieferliegende Schichten die Potentialverteilung an der Oberfläche. Man gewinnt in Abhängigkeit von $L/2$ (L = Elektrodenentfernung) den scheinbaren Widerstand des Untergrundes als Sondierungskurve. Diese Kurve wird in doppeltlogarithmischem Maßstab aufgetragen und nach bekannten Verfahren ausgewertet. Man bestimmt aus der Kurve des scheinbaren Widerstandes $\rho_s(L/2)$ die wahren Widerstände verschiedener Schichten des Untergrundes.

Normalerweise werden diese Tiefensondierungen nur bis zu einer Elektrodenentfernung von einigen hundert Meter durchgeführt. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprogramms wurde das geoelektrische Meßverfahren in der Zeit von 1964 bis 1969 technisch so ausgebaut, daß geoelektrische Tiefensondierungen bei Elektrodenabständen von über 100 km routinemäßig durchgeführt werden können.

2. Zur Meßtechnik

2.1 Tiefengeoelektrische Sondierung 1965 im Raum Hannover

Die erste tiefengeoelektrische Sondierung ist 1965, nach mehreren Vorversuchen, bei Algermissen durchgeführt worden, über die 1965 auf dem Symposium in Goslar berichtet wurde (siehe Protokoll über das Symposium "Erdmagnetische Tiefensondierung" in Goslar, vom 30.9. - 2.10.1965). Längs der Autobahn Hannover-Anderten nach Hildesheim wurde damals eine maximale Elektrodenentfernung von 20 km erreicht. Das zu dieser Messung erforderliche Spezialkabel wurde hierzu auf dem östlichen Randstreifen der Fahrbahn Hildesheim-Hannover ausgelegt und mit Stichleitungen zu den einzelnen Erderpunkten geführt. Die Potentialverteilungskurve für alle Elektrodenentfernungen wurde bei Algermissen mit analogen Registriergeräten aufgenommen.

Die Auswertung der geoelektrischen Tiefensondierungskurve ergab, daß von ca. 10 m bis 2100 m im Raum Algermissen mit einem spezifischen Widerstand von 2 - 5 Ω m gerechnet werden muß. Über den tieferen Teil des Untergrundes konnten damals keine weiteren Angaben gemacht werden, da der hintere Ast der Sondierungskurve durch die Salzstöcke von Sarstedt und Sehnde gestört war.

2.2 Tiefengeoelektrische Sondierung 1966 im Raum Schwetzingen

Im Frühjahr 1966 wurde eine weitere Tiefensondierung im Rheingraben bei Schwetzingen durchgeführt. Für diese Messung stand neben eigenem Kabel erstmalig eine Hochspannungsleitung der 400 kV-Forschungsgemeinschaft in Heidelberg für Meßzwecke zur Verfügung. Diese Hochspannungsleitung war 16 km lang und führte von Rheinau, nordwestlich von Schwetzingen, nach Süden bis Altlußheim. Bei dem Versuch der 400 kV-Forschungsgemeinschaft wurde über diese Leitung ein Gleichstrom von 100 A geschickt, der von Rheinau durch den Erdboden nach Altlußheim zurückfloß. Diese Stromeinspeisung wurde ausgenutzt, um südöstlich von Ketsch einen Tiefensondierungspunkt mit $L/2 = 8$ km zu finden. An der gleichen Meßstelle wurde mit eigenem Kabel eine Tiefensondierung mit $L = 4$ km durchgeführt und so der Anfangsast

der Tiefensondierungskurve gefunden. Der mit der Hochspannungsleitung gewonnene Sondierungspunkt liegt auf dem ansteigenden Ast der Sondierungskurve. Die Tiefensondierungskurve zeigt die Abb. 1. Ihre Auswertung ergab, daß gutleitende Schichten mit ca. 3 Ω m bis zu 3,6 km Tiefe reichen. Darunter folgen schlechtleitende Schichten des Grundgebirges. Weiter wurden umfangreiche Untersuchungen über die Ausbreitung von Gleichstromsignalen vorgenommen und wichtige Kenntnisse über Störeffekte durch Hochspannungsleitungen gewonnen.

2.3 Tiefengeoelektrische Sondierung 1966 im Südschwarzwald

Im Herbst 1966 wurde eine weitere Tiefensondierung am Rande des Südschwarzwaldes durchgeführt. Bei dieser Messung wurde für große Elektrodenentfernungen erstmals eine Hochspannungsleitung der Badenwerke AG, Karlsruhe, benutzt. Die Leitung führt von der neuen Umschaltstation KÜHMOOS bei Säckingern am Oberrhein durch den Südschwarzwald nach Bellingen und von dort durch den Rheingraben über Eichstetten am Kaiserstuhl bis DAXLANDEN bei Karlsruhe. Für die Messung im Südschwarzwald wurde der erste fertiggestellte Teil der Leitung von Kühmoos bis Tannenkirch benutzt. Bis zu einem $L = 8$ km wurde die Sondierungskurve $\rho_s = \rho_a$ mit eigenem Kabel aufgenommen. Die weiteren Meßpunkte bis $L = 32$ km wurden mit Hilfe der Hochspannungsleitung gewonnen. Hierzu mußte die Sondenstrecke bei Maulburg gegenüber der mit eigenem Kabel um 30° gedreht werden. Die Meßdaten wurden digital und analog registriert. Der Elektrodenstrom wurde in Kühmoos mit einer Gleichstrommaschine in die Leitung eingespeist und jeweils über zwei Multierder dem Erdboden zugeführt. Der Strom I betrug für die verschiedenen Elektrodenentfernungen zwischen 45 und 65 A. Die Tiefensondierungskurve TS 03 Schopfheim-Maulburg wurde in "The Rhinegraben Progress Report" 1967, S. 57, veröffentlicht.

2.4 Tiefengeoelektrische Sondierung 1967 im Rheingraben

Nach Fertigstellung der Hochspannungsleitung der Badenwerke AG von Kühmoos bis Daxlanden konnte im Herbst 1967 eine weitere Tiefensondierung mit dieser Hochspannungsleitung durchgeführt

werden. Abb. 2 zeigt den Verlauf der Leitung von Kühmoos bis Daxlanden. Auf dieser Karte sind auch die Positionen für die Messung im Südschwarzwald 1966 eingetragen.

Bei der Messung im Rheingraben betrug die maximale Elektrodenentfernung $AB = L = 150$ km. Der südlichste Punkt $L/2 = 75$ km lag bei Bellingen und der nördlichste Punkt $L/2 = 75$ km bei Forchheim, 8 km vor Karlsruhe. Die Erderpunkte sind in Abb. 2 mit ihrer Entfernung zur Mitte bei Lahr eingetragen. Einen vergrößerten Kartenausschnitt dieser Mitte zeigt die Abb. 3. Die Koordinaten der Mitte der einzelnen AB-Entfernungen sind hier als Kreuze eingetragen.

Die einzelnen Erderpunkte sind vor der Messung genau erkundet worden. Jeder Erderpunkt ist vorher geoelektrisch vermessen und so ausgesucht worden, daß ein minimaler Übergangswiderstand für die Erder erreicht werden konnte.

Die Lage der Registrierpunkte wurde ebenfalls vorher erkundet, und zwar nach dem Gesichtspunkt, jeweils einen minimal durch Industrieströme gestörten Punkt zu finden. Für den Rheingraben wurden bei Ottenheim zwei geeignete Meßstellen ermittelt, die ein Minimum an Störungen aufwiesen. Hier wurden dann die digitale und analoge Registrierstation aufgebaut, die die Tiefensondierungskurve für den Rheingraben ermittelten. Weitere Meßstationen waren am Grabenrand eingerichtet (Lahr 1, 2, 2'). Im Schwarzwald, auf dem Grundgebirge, lagen die Stationen Biberach, Fischerbachtal, Hausach, St. Roman und Fohrenbühl. Diese Meßstationen sollten die Potentialverteilung im Schwarzwald registrieren. Weitere Meßstationen waren in Dunningen, Wehingen, Egelheim, Irrendorf, Kreenheinstetten und bei Habsthal am Rand der Molasse aufgebaut. Auch diese Stationen sollten die Potentialverteilung, hervorgerufen von der Elektrodenstrecke im Rheingraben, ausmessen. Am Grabenrand und im Rheingraben bei Lahr waren auch drei magnetische Registrierstationen aufgebaut, um den Einfluß des Magnetfeldes, hervorgerufen durch den in der etwa 75 m hohen Doppelleitung fließenden Gleichstrom, zu erkunden. Bei der Elektrodenentfernung von 100 km wurde ferner mit 8 Stationen im Winkel von 45° zur Elektrodenstrecke die Potentialverteilung von Lahr bis

Neustadt im Schwarzwald vermessen. Die Auswertung dieser Meß-
ergebnisse ist noch nicht abgeschlossen.

2.5 Zur Einspeisung des Elektrodenstromes in die Hochspannungs- leitungen

Abb. 4 zeigt ein Schnittbild eines Hochspannungsmastes. Die auf der linken Seite des Mastes befindlichen Bündelleiter sind für die tiefelektrische Messung 1967 benutzt worden. Hierzu wurden die beiden oberen Bündelleitungen zusammengesaltet, um den Leitungswiderstand zu erniedrigen. Die zusammengesaltete Leitung wurde für die Elektrodenstrecke nach Norden benutzt. Für die Strecke nach Süden stand die untere Bündelleitung zur Verfügung. Jede Bündelleitung besteht aus 4 Kupferdrahtseilen. Der gesamte Leitungswiderstand der Elektrodenstrecke von 150 km betrug weniger als 2Ω . Im Süden bei Bellingen, am Abspannmast Nr. 75, und im Norden bei Forchheim, am Abspannmast 309, war die Elektrodenleitung offen. Von Bellingen bis Eichstetten am Kaiserstuhl lief der Elektrodenleitung (Abb. 4) eine 220 kV-Doppelleitung parallel, die voll in Betrieb war. Diese induzierte auf die Elektrodenleitung durch geometrische Unsymmetrie kapazitiv wie auch induktiv eine Spannung von 4000 V (50 Hz) mit einem Dauerstrom von ca. 6 A. Diese Störspannung wurde an der Stromeinspeisungsstelle in Eichstetten am Mast 1 durch ein 50 Hz-Starkstromfilter abgeleitet. Hier war auch eine gegen direkten und indirekten Blitzschlag und gegen Erdkurzschluß sowie gegen Überschlag der 220 kV-Drehstromdoppelleitung entwickelte Schutzvorrichtung installiert. Die Schutzvorrichtung konnte Kurzschlußströme bis zu 100 000 A ableiten (Abb. 5).

Die Stromeinspeisung erfolgte mit Gleichstromgeneratoren, die von Benzinmotoren angetrieben wurden. Dabei diente ein Gleichstromgenerator als Steuermaschine. Eingespeist wurde ein Gleichstrom mit einer trapezförmigen Frequenz von $8,3 \cdot 10^{-3}$ Hz. Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt der Stromregistrierung für $AB = L = 100$ km in Eichstetten.

Die Nulldurchgänge des Stromes und seine Polarität wurden von Eichstetten über UKW-Richtfunk den Registrierstationen im Rheingraben und am Schwarzwaldrand direkt übermittelt. Für die weiter entfernten Registrierstationen im Schwarzwald und in der Schwäbischen Alb wurden von der Steuerzentrale in Lahr diese Werte simultan über Grenzwellen mit 2454 kHz weiter übertragen. Durch diese Maßnahme war es möglich, die Registrierungen an den einzelnen Stationen zeitgleich mit den Stromregistrierungen und den Registrierungen im Rheingraben durchzuführen.

Von der analogen Registrierstation im Rheingraben "Ottenheim 1" ist in Abb. 7 ein Ausschnitt der Registrierung von $AB = L = 100$ km dargestellt. Die starken Schwingungsspitzen sind durch das Umschalten des Stroms hervorgerufen worden. Sie sind Effekte des Feldaufbaues im Untergrund. Für die Berechnung der ρ_s -Werte der Sondierungskurve wurden nur die eingeschwungenen Kurventeile der Registrierung herangezogen.

Die Digital-Registrierung "Ottenheim 2" registrierte jeweils über 8 Sekunden im eingeschwungenen Zustand des Potentialfeldes die Spannung an den Sondenstrecken. Sie summierte automatisch über die Anzahl der Umpolungen. Diese Registrierung steht in Form direkter Meßwerte zur Verfügung.

Die digitale Registrierung im Schwarzwald bei Föhrenbühl (Abb. 8) dagegen ermittelte Einzelwerte mit je einer Sekunde Dauer. Die 120 Einzelwerte pro Polung des Stromes wurden gemittelt und aus 80 Polungen anschließend der Mittelwert gebildet, der dann einen einzigen Meßwert darstellt.

3. Auswertung und Ergebnisse

Die nach den vorher beschriebenen Verfahren gewonnenen Einzelmeßwerte wurden für die Berechnung der folgenden Tiefensondierungskurven benutzt. Abb. 9 zeigt die Tiefensondierungskurve Ottenheim. Bis $AB = L = 16$ km wurde diese Kurve mit eigenem Kabel ausgemessen. Von $AB = L = 16$ km bis $AB = L = 150$ km sind die Meßpunkte der analogen und digitalen Registrierungen

aufgetragen. Dargestellt ist ρ_a über $AB/2 = L/2$ in doppelt logarithmischer Skala.

Alle Kurvenpunkte sind dann auf eine für alle Meßpunkte ideale "Schlumbergermitte" zurückgerechnet worden. Dies mußte vorgenommen werden, da die einzelnen "Mitten" der verschiedenen Elektrodenentfernungen gegeneinander Koordinatenabweichungen hatten. Die zurückgerechnete Kurve ist in Abb. 10 dargestellt. Sie repräsentiert die Meßkurve Rheingraben Ottenheim 2.

Für diese Sondierungskurve ist nach einem von K. DEPPERMAN entwickelten Rechenverfahren auf einem Elektronenrechner eine theoretische 8-Schichtenkurve für ρ_a berechnet worden, die Abb. 11 zeigt. In der theoretischen Kurve dient die $L/2$ ($AB/2$)-Skala gleichzeitig als Tiefenskala. Für die einzelnen Schichtmächtigkeiten sind im oberen Teil der Abbildung die wahren Schichtwiderstände angegeben, mit denen die theoretische Kurve ρ_a berechnet wurde.

Abb. 12 zeigt die gemessene Sondierungskurve Ottenheim 2 und die theoretisch berechnete Kurve. Beide Kurven sind in sehr guter Übereinstimmung, so daß mit den oben angegebenen Schichtwiderständen und Schichtmächtigkeiten bis ca. 10 km Tiefe gerechnet werden kann. Der übersteile Anstieg der Kurve von ca. 60° zum Kristallin wird durch den "Graben-effekt" hervorgerufen. HUBER hat ihn für einen gutleitenden Halbzylinder in einem schlechtleitenden Medium nachgewiesen. MUNDRY (persönliche Mitteilung) stellte Berechnungen über einen halbelliptischen Zylinder guter Leitfähigkeit in einem schlechtleitenden Halbraum an, wobei die Einspeisung des Stromes in einem der Brennpunkte erfolgt. Er fand für Widerstandsverhältnisse von 1 : 100 von Grabenfüllung zu Grabenumbettung, wie sie im Rheingraben etwa vorliegen, einen übersteilen Anstieg von 62° , wie ihn etwa die Kurve Ottenheim 2 zeigt. Dieser übersteile Anstieg hat die Tendenz, über den wahren Endwiderstand der Kurve auszuschwingen.

In Abb. 13 sind in die Rheingrabenkurve "Ottenheim 2" die Tiefensondierungskurven von Fischerbach und Fohrenbühl eingetragen. Die beiden vorderen Kurvenäste dieser Sondierungen wur-

den wieder mit eigenem Kabel an den Registrierpunkten vermessen. Interessant sind nun für diese beiden Stationen die Sondierungspunkte für große Elektrodenentfernungen $AB = 80$ km bis $AB = 150$ km. Für diese großen Elektrodenentfernungen wurden die Schlumbergermitteln auf Fischerbachtal und Föhrenbühl umgerechnet, so daß die Meßwerte dieser Elektrodenentfernungen die ρ_a -Werte in Fischerbachtal und Föhrenbühl wiedergeben. Sie zeigen bei beiden Stationen einen fast waagerechten Verlauf (um $500 \Omega m$).

Zur Sondierungskurve Föhrenbühl kann folgende Interpretation gegeben werden: Sieht man von den ersten 10 m der Deckschichten ab, bei denen es sich sicherlich um Verwitterungszonen handelt, so ermittelt man bis 1000 m Tiefe einen einheitlichen spezifischen elektrischen Widerstand von $1500 \Omega m$. Das Zwischenstück der Kurve bis $L/2 = 40$ km ist nicht bekannt. Der Kurvenast von $L/2 = 40$ km bis $L/2 = 75$ km zeigt einen leicht abfallenden Verlauf bei einem Widerstand um $500 \Omega m$. Dies läßt den Schluß zu, daß das fehlende Zwischenstück ρ_a der Sondierungskurve von $L/2 = 1$ km bis $L/2 = 40$ km einen Verlauf haben kann, wie er in Abb. 14 ersichtlich ist. Das fehlende Zwischenstück wurde nach dem DEPPERMANNSchen Verfahren berechnet. Zwei theoretische Kurvenstücke wurden herangezogen: Einmal ein Zweischichtenabfall von $1500 \Omega m$ bei einer Schichtgrenze von 5 km auf $400 \Omega m$; zum anderen ein Dreischichtenabfall von $1500 \Omega m$ auf $1000 \Omega m$ und dann auf $400 \Omega m$. Die zugehörigen Schichtgrenzen liegen bei 3,6 km und 6,4 km.

Die Abweichung der beiden theoretischen Kurvenstücke voneinander ist gering und liegt fast in der Zeichengenauigkeit. Die 6 Endwerte (im $\sqrt{2}$ -Abstand) der theoretischen "Zwischenkurve" sind aber fast deckungsgleich mit den ermittelten Sondierungspunkten Föhrenbühl von $L/2 = 40$ km bis $L/2 = 75$ km.

Einen theoretischen Dreischichtenabfall einzufügen, bei dem ρ_2 wesentlich kleiner als ρ_3 ist, ist kaum möglich. Eine niederohmige Zwischenschicht, unter der Voraussetzung, daß sich Anfangs- und Endwerte eines solchen theoretischen Dreischichtenabfalls in die gemessenen Sondierungspunkte einschmiegen müssen, hätte bei geringer Mächtigkeit eine Tiefe von etwa 3 - 4 km.

Dies ist nach geologischen Vorstellungen über den Schwarzwald kaum wahrscheinlich.

Aufgrund der Meßkurve Fohrenbühl (Abb. 13, 14) kann danach beim gegenwärtigen Untersuchungsstand festgestellt werden, daß ab ca. 6 km Tiefe mit einem mittleren Widerstand von 500 Ω m bis zu einer Tiefe von 40 - 50 km gerechnet werden kann.

Besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle den Badenwerken AG und Herrn Direktor LEIBFRIED sagen für die Überlassung der 150 km langen Hochspannungsleitung und die großzügige Unterstützung mit Fachkräften und Steigern, der Deutschen Bundespost für die Unterstützung mit Fernmeldeanlagen und der Bundesanstalt für Bodenforschung für die Förderung dieser Arbeiten. Ferner danke ich den Herren Professoren RÖTKE, KERTZ, SIEBERT, ANGENHEISTER für die Unterstützung mit Meßwagen und Registrierstationen. Mein Dank gilt besonders Herrn Professor FLATHE und den Herren Dr. DEPPERMAN und Dr. MUNDY für die vielen Anregungen bei der Auswertung der Meßergebnisse.

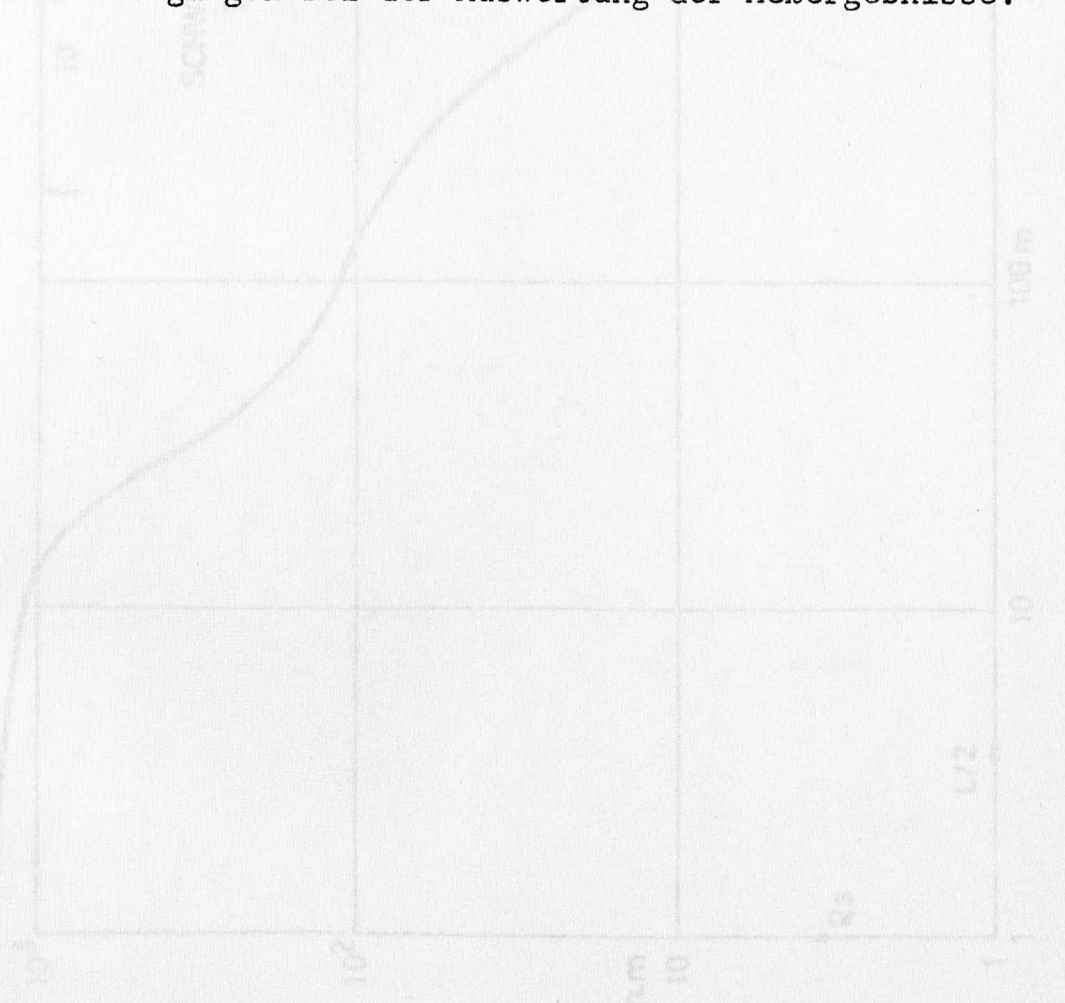


Abb. 1

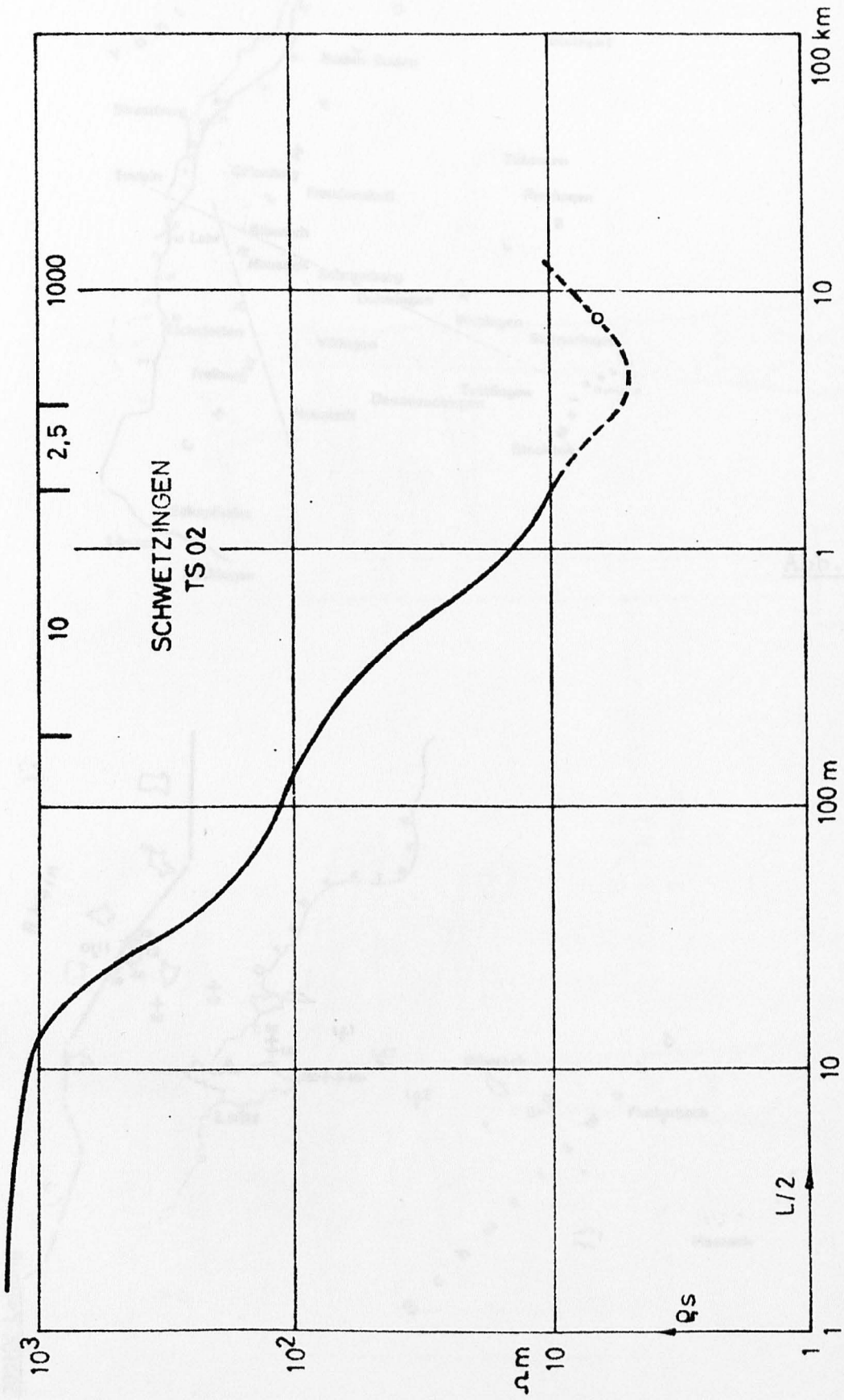


Abb. 1



Abb. 2

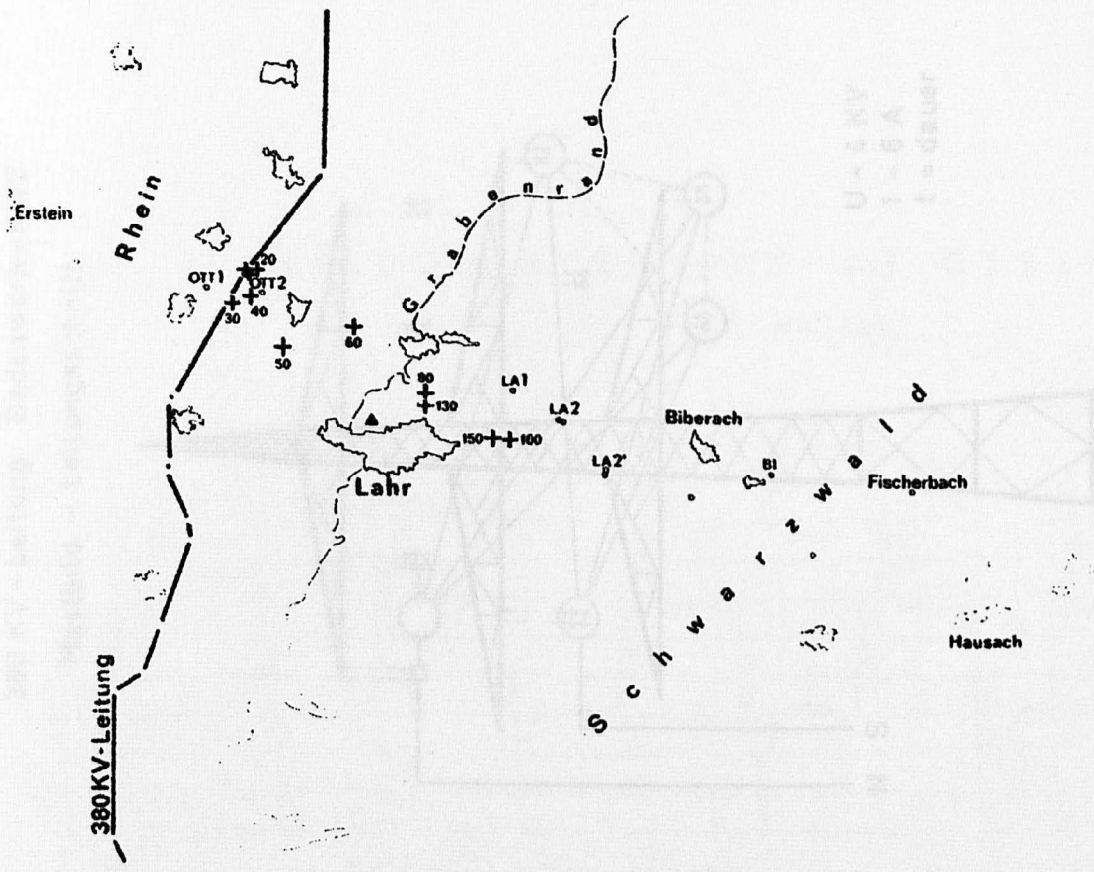
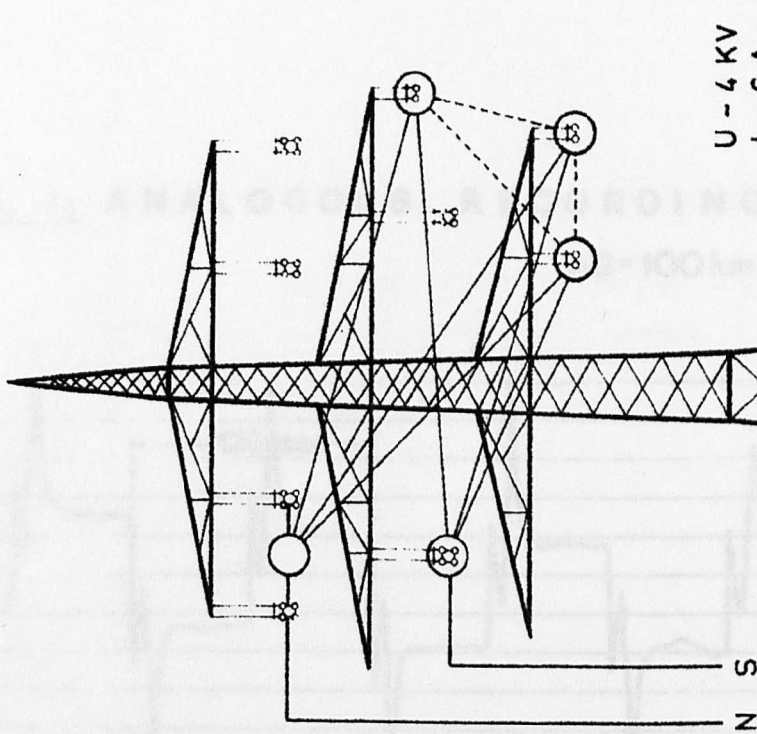


Abb. 3

380 KV - Leitung Badenwerk - RWE
Mastbild - Leitungsschnitt



380 KV - Leitung Badenwerk - RWE
Mastbild - Leitungsschnitt

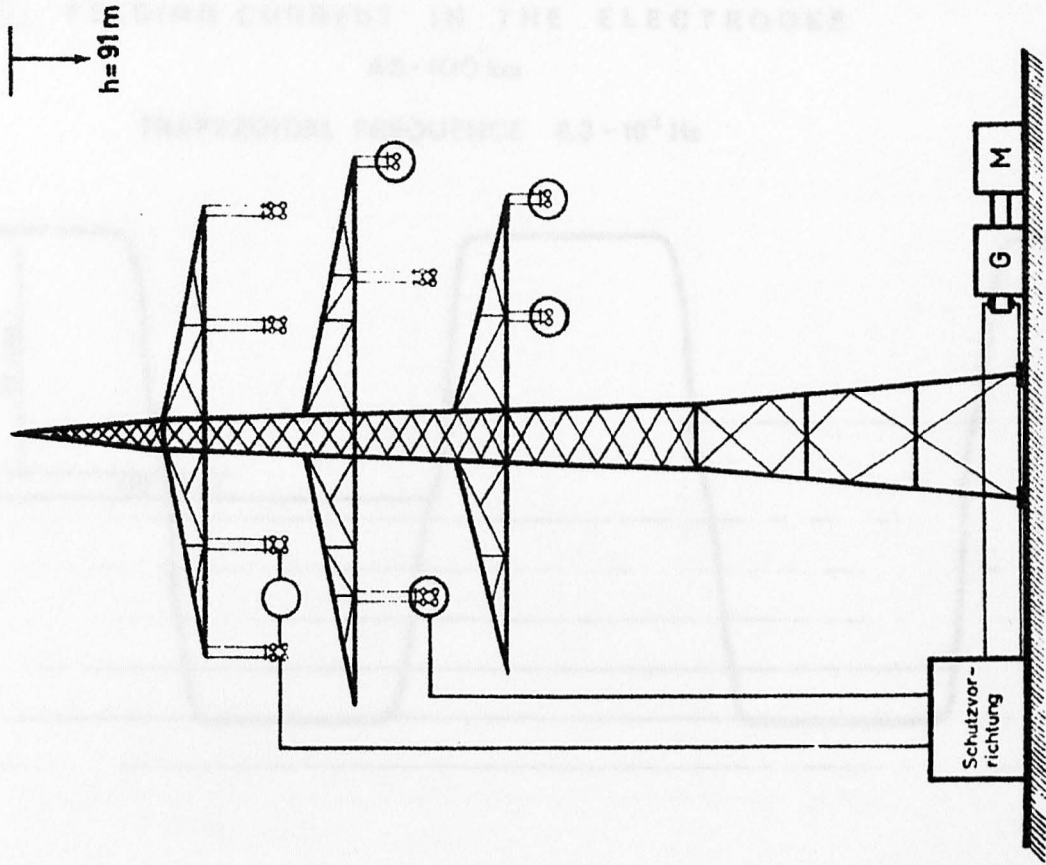


Abb. 4: Beeinflussung durch 220 KV Leitung

Abb. 5: Stromeinspeisung in Eichstetten

Abb. 6: FEEDING CURRENT IN THE ELECTRODES

AB-100 km

TRAPEZOIDAL FREQUENCY $8.3 \cdot 10^{-3}$ Hz

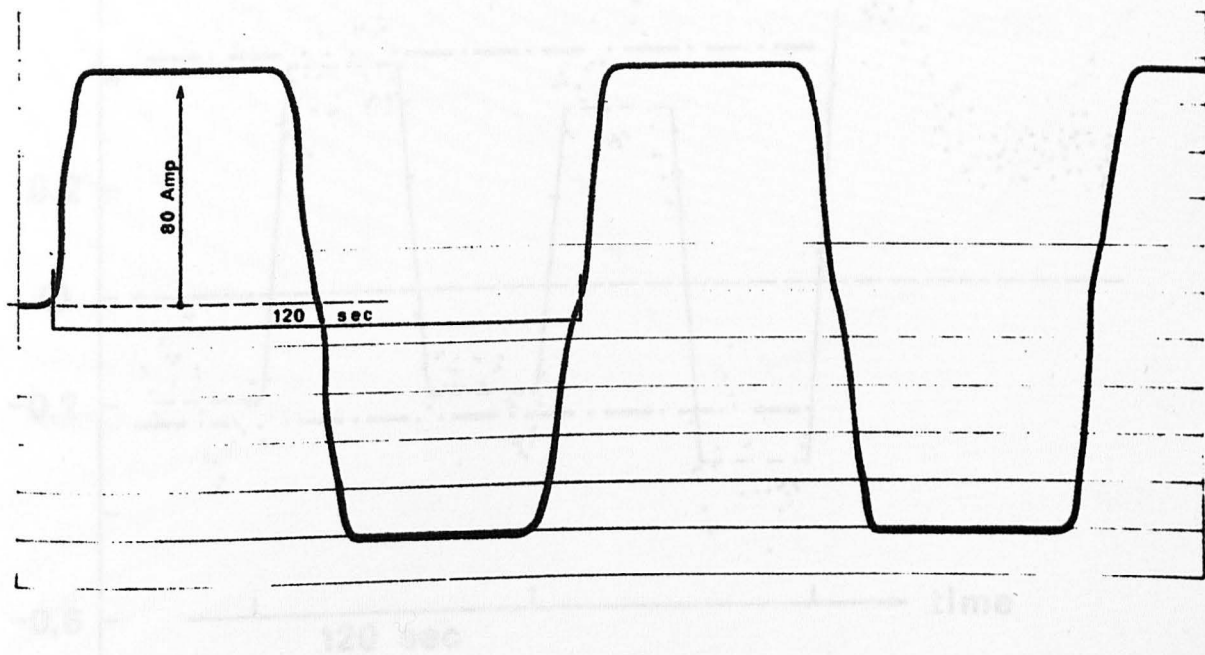
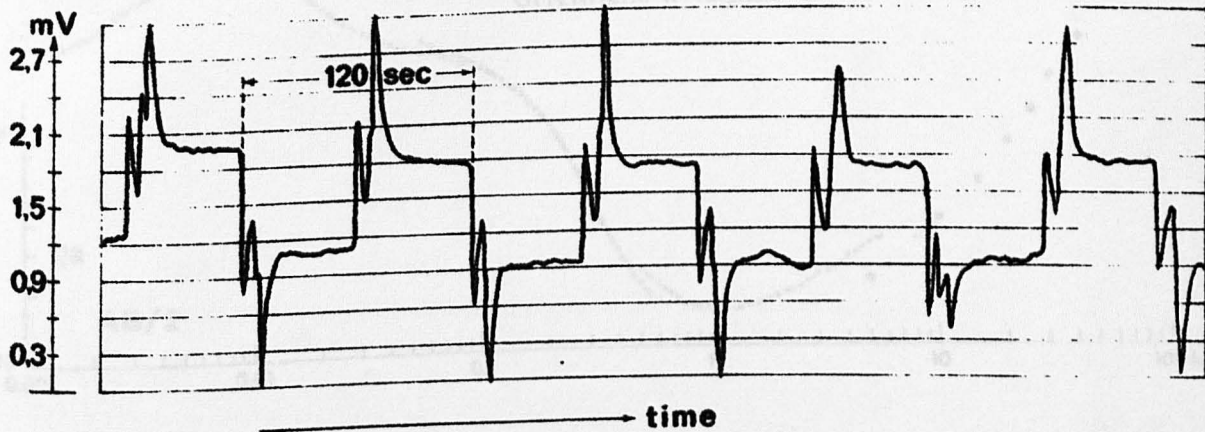


Abb. 7: ANALOGOUS RECORDING OTTENHEIM

AB-100 km



DIGITAL RECORDING FOHRENBÜHL AB = 100 km

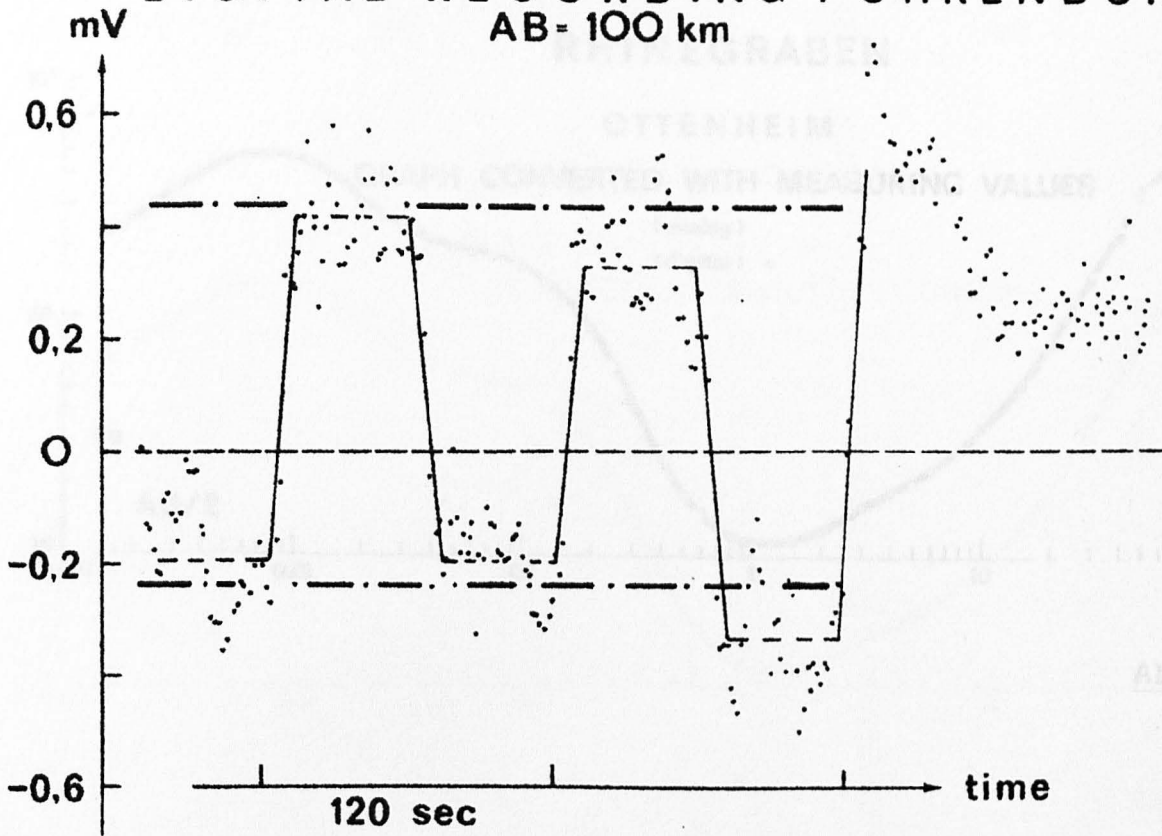


Abb. 10

Abb. 8

RHINEGRABEN

GRAPH OTTENHEIM (OWN CABEL)

OTTENHEIM I (analog)

OTTENHEIM II (digital)

380 kV Bundle conductor

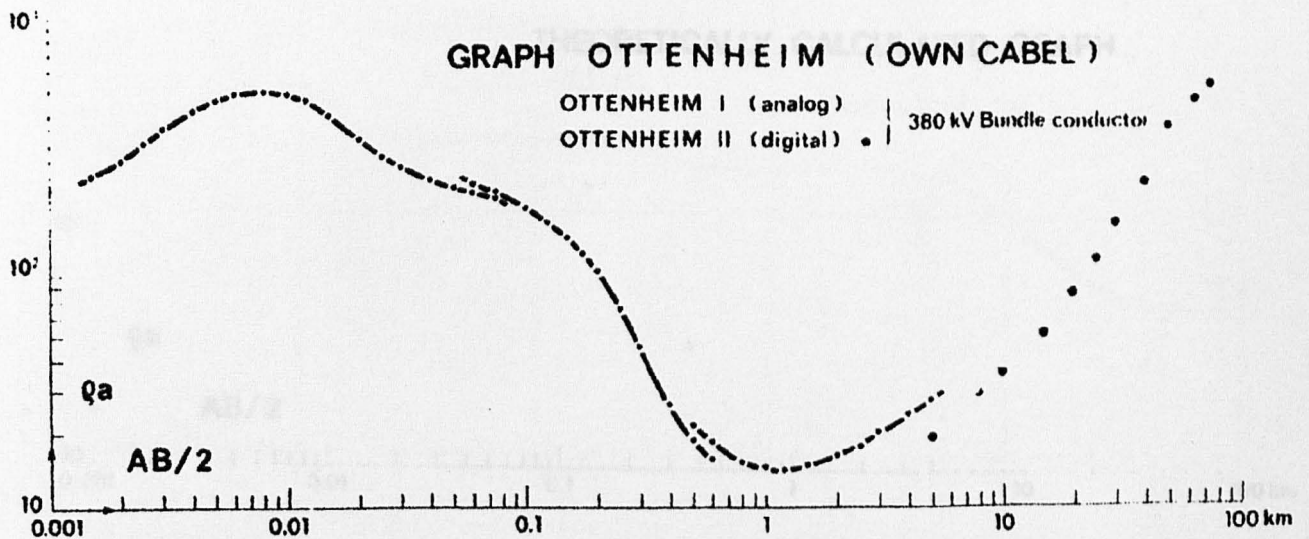


Abb. 9

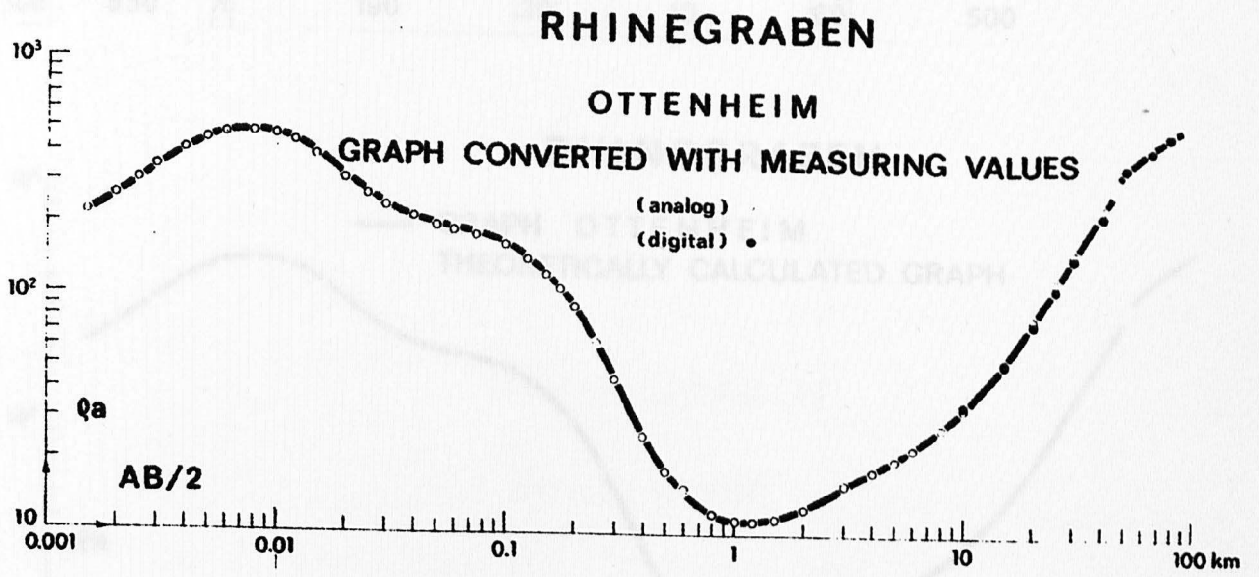


Abb. 10

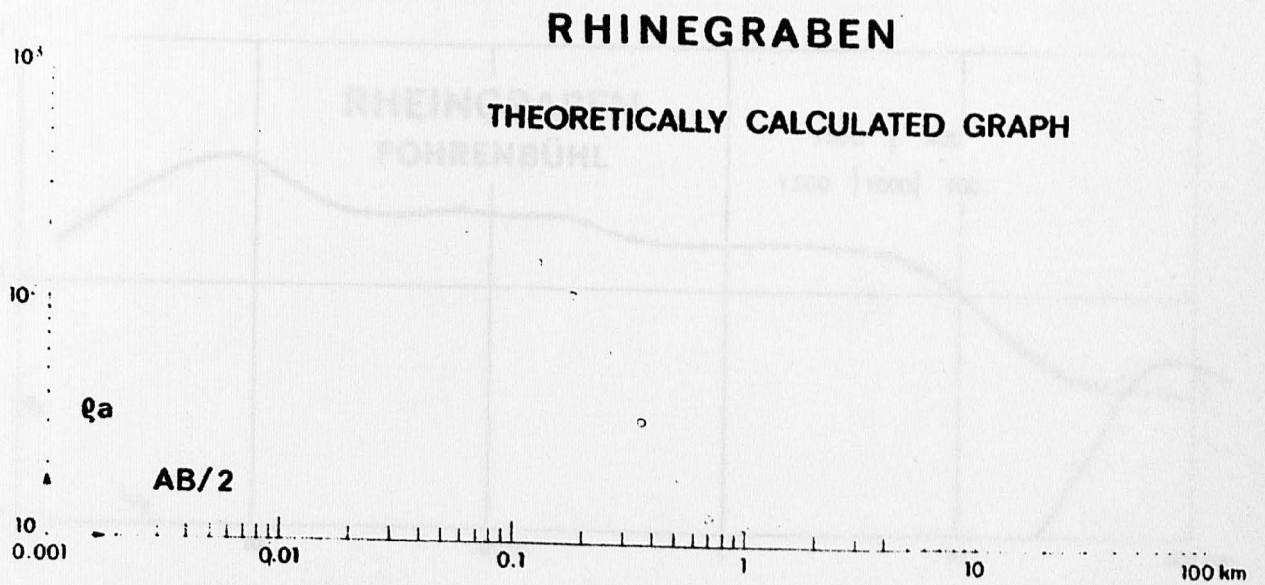
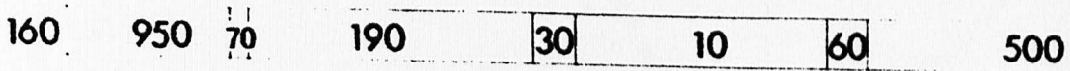


Abb. 11

160 | 950 | 70 | 190 | 30 | 10 | 60 | 500

RHINEGRABEN

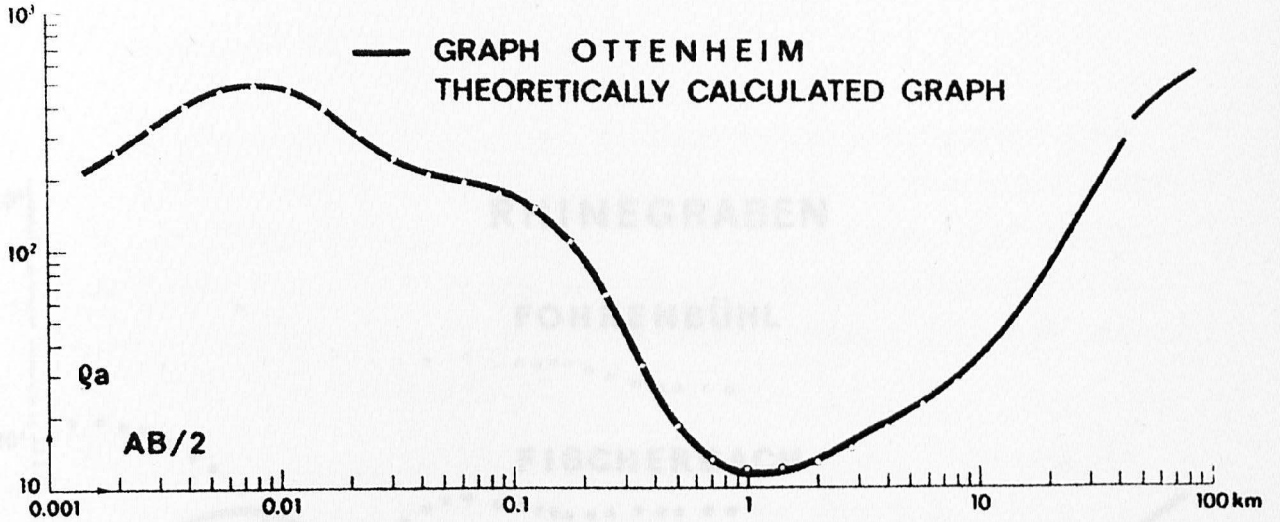


Abb. 12

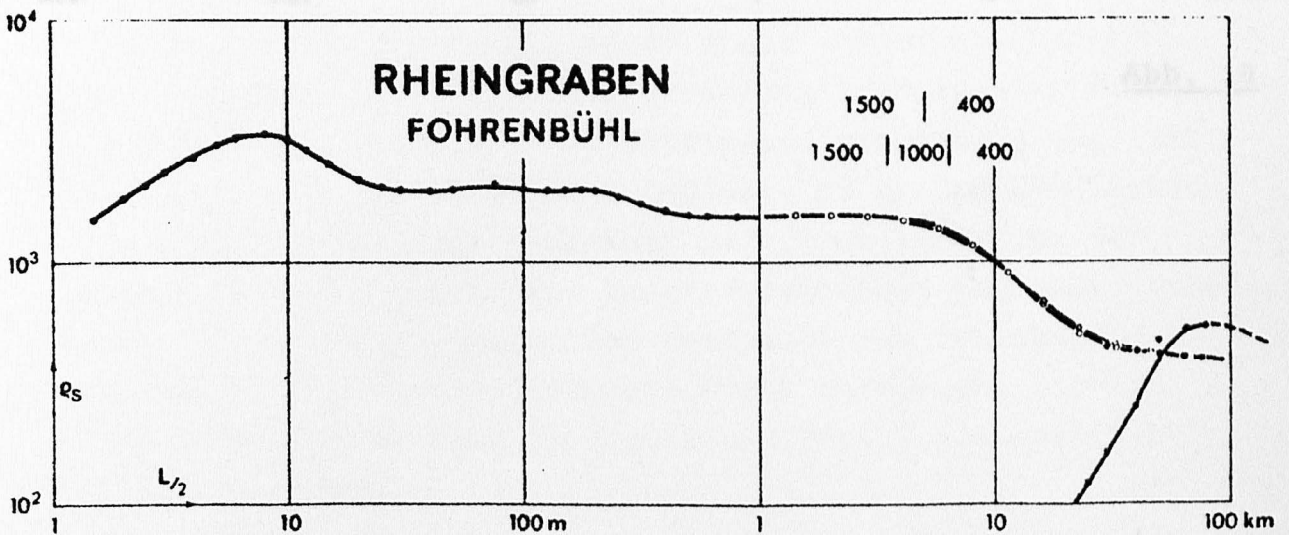


Abb. 13

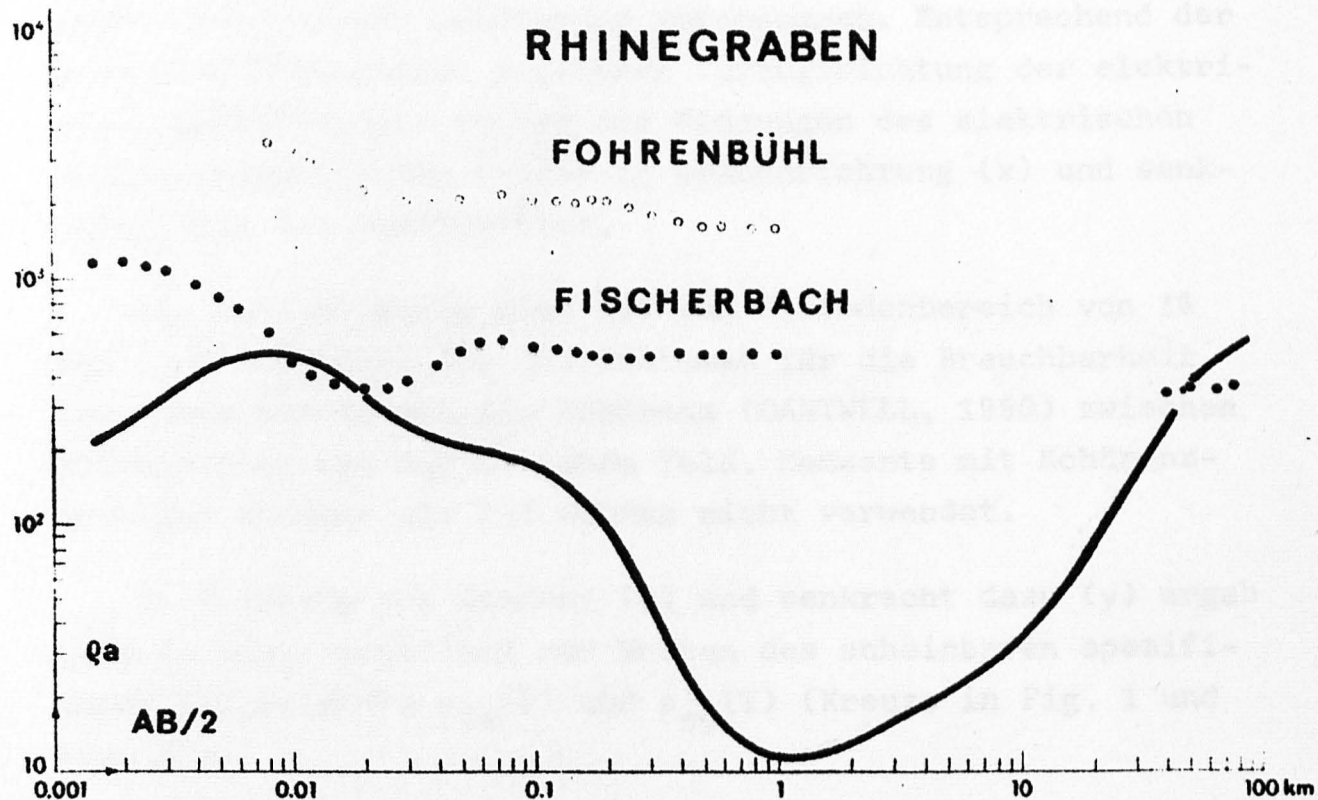


Abb. 14