

Elektromagnetische Very Low Frequency-Resistivity- (VLF-R-)Prospektion zur Erkundung von Grundwasserleitern im paläozoischen Mittelgebirge am Beispiel des Oberharzes

*Electromagnetic Very Low Frequency-Resistivity (VLF-R) Prospection of Aquifers
in Paleozoic Highlands of the Oberharz (Germany)*

J. KOLL & I. MÜLLER¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	103
2. Das VLF-F-Verfahren (Very Low Frequency-Resistivity)	104
3. Geologisch-tektonische Situation	107
4. Hydrogeologische Situation	109
5. Die VLF-R-Messungen	111
6. Ergebnisse	113
7. Ausblicke	117
Zusammenfassung	120
Literatur	121
Summary	121
Dank	122

1. Einleitung

Die im Zuge der Umweltbelastung expansive Bedeutung unserer Grundwasserressourcen zwingt zur Erfassung genauerer Kenntnisse realer Vorgänge der Grundwasserdynamik, um über Input, Speicherung, Abgabe und Kontamination des Grundwassers quantitative Erhebungen durchführen zu können. Diese sind letztendlich sowohl für eine langfristige Trinkwasserversorgung einerseits als auch die Anlage umweltgerechter Deponien andererseits die wichtigste Entscheidungsbasis. Da besonders im Bereich der Mittelgebirge zahlreiche Talsperren zur Energiegewinnung und Trinkwasserversorgung angelegt wurden, bietet sich eine Grundwassererforschung eben dieser Regionen an.

¹⁾ Dr. Jürgen KOLL, Triftweg 53, D-3300 Braunschweig. Dr. Imre MÜLLER, Centre Hydrogéologie, 11 rue Emile Argand, CH-2007 Neuchâtel.

So wurde im Rahmen eines von DFG geförderten isopenhydrologischen Forschungsvorhabens (A. HERRMANN et al., 1986) Grundlagenforschung im Grundwasserbereich betrieben. Da eine hydrogeologische Einschätzung des Kluftaquifers im gefalteten Paläozoikum, dem nach A. HERRMANN et al. (1987) für die Grundwasserneubildung eine vorrangige Stellung zukommt, aufgrund dessen Inhomogenitäten und Anisotropie äußerst schwierig ist, und konventionelle Erhebung auf Grund z.T. sehr schlechter Aufschlußverhältnisse erschwert werden, wurde der Versuch geophysikalischer Sondierungen unternommen. Während refraktionsseismische Messungen sich im wesentlichen auf die Ermittlung von Bedeckungsmächtigkeiten der Lockersedimente über Festgestein beschränken, eignen sich geoelektrische Methoden eher dazu, richtungsabhängige, wasserleitende Horizonte bzw. Strukturen zu erkunden. Dies ist auch deshalb zukunftsweisend, weil es in den nichtverkarstungsfähigen Festgesteinen im Vergleich zu Karbonat- und Lockergesteinen an gangbaren Untersuchungsmethoden mangelt.

Gleichstromelektrische Verfahren erwiesen sich im Arbeitsgebiet (Oberharzer Untersuchungsgebiete, s. Fig. 2) nicht nur als zu umständlich und zeitaufwendig, sondern sie lieferten praktisch auch keine auswertbaren Ergebnisse. Demgegenüber zeigte sich das VLF-R-(Very Low Frequency-Resistivity-)Verfahren auch im unwegsamen Gelände als äußerst praktisch. Diese Methode, die u. a. von I. MÜLLER (1982), I. MÜLLER & R. PLANCHEREL (1982), I. MÜLLER & Chr. KETTINGER (1987) und I. MÜLLER & U. SCHÖTTERER (1987) erfolgreich angewendet wurde, sollte nun erstmals Strukturen im paläozoischen Mittelgebirge, welche aufgrund mangelnder Aufschlußverhältnisse verdeckt liegen, erkunden. Dabei sollte vordergründig das Verfahren an bereits relativ gut bekannten Strukturen im Bereich des Oker-Grane-Stollens getestet werden. Den im folgenden beschriebenen Untersuchungen kommt damit Pilotcharakter zu.

2. Das VLF-F-Verfahren (Very Low Frequency-Resistivity)

Aufgrund guter Empfangsmöglichkeiten an nahezu allen Orten sind die von VLF-Sendern ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen für geophysikalische Prospektion gut geeignet (G. V. KELLER & F. C. FRISCHNECHT, 1979). Der VLF-Empfänger mißt die Intensität des Feldes eines Signals durch seine Antenne, die elektrische Komponente des Signals durch zwei im Feld ausgelegte Elektroden (Fig. 1).

Die Variationen des primären magnetischen Feldes ($H_0[F]$) für jede Meßfrequenz (F) produzieren elektrische Ströme im Untergrund. Sie verursachen ein sekundäres Feld, welches das primäre Feld an der Bodenoberfläche verstärkt. Man mißt das resultierende Magnetfeld ($B[F]$).

Mit bestimmten Frequenzen ist es möglich, den scheinbaren Widerstand des Gesteins nach folgender Gleichung zu bestimmen:

$$Ra (\Omega m) = \left[\frac{E(F)}{B(F)} \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot \mu_0} \quad (1)$$

F = Frequenz (Hertz)

E = elektrisches Feld (Volt/m)

B = magnetisches Feld (Ampere/m)

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ (elektromagnetische Durchlässigkeit des Vakuums)

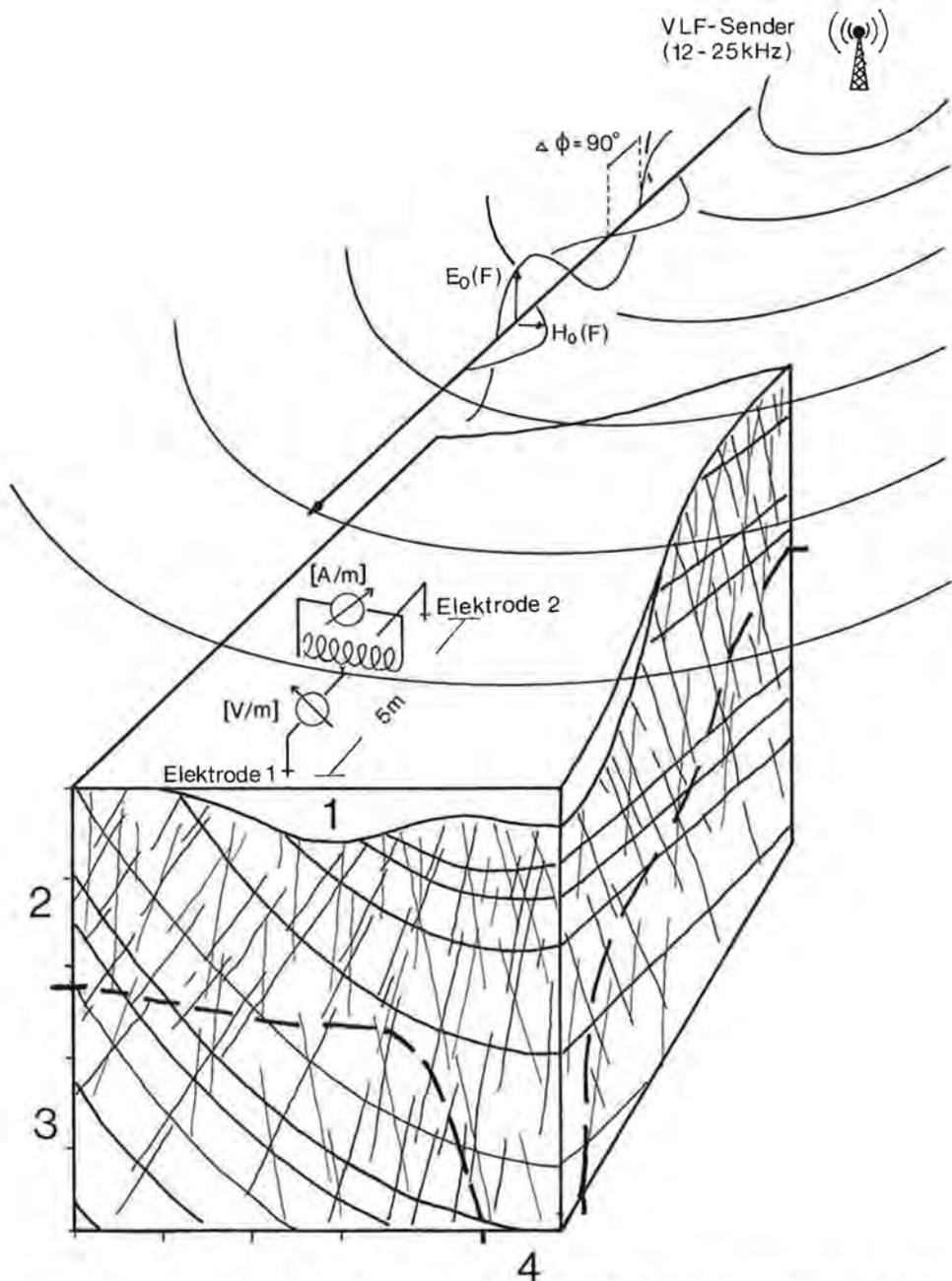


Fig. 1: Schema zur Erläuterung der elektromagnetischen VLF-R-Methode im Anwendungsbereich paläozoischer Mittelgebirge. 1 Fließerdien, 2 Verwitterungszone, 3 unverwittertes Festgestein, 4 Störungszone.

Die Frequenz bestimmt die Eindringtiefe:

$$T_{(m)} = 503 \cdot \sqrt{(Ra/F)} \quad (2)$$

Es gibt zahlreiche VLF-Sender, die besonders als Radioverbindungen von U-Booten zu ihren Basen eingerichtet worden sind. Das von MÜLLER konzipierte Empfangsgerät kann alle Radiosender zwischen 15–25 kHz empfangen, was Messungen in unterschiedlichen Richtungen (verschiedene Sender) erlaubt. Die für die Messung der elektrischen Feldstärke eingesetzten Bodenelektroden benötigen lediglich einen Abstand von 5 m, wodurch im Gegensatz zu anderen geophysikalischen Verfahren ein enormes Auflösungsvermögen trotz großer Eindringtiefe erzielt wird. Weil die Messungen in Orientierung zu den jeweiligen Sendern geschehen, ist es möglich, richtungsabhängige Eigenschaften des Untergrundes aufzuzeichnen. Jeder Meßvorgang liefert zwei Parameter:

- einen scheinbaren elektrischen Widerstand (Ωm), welcher identisch ist mit dem klassisch geoelektrisch ermittelten Widerstand. Dieser charakterisiert die Lithologie der geologischen Formation.

- einen Phasenwert zwischen 0 und 90°. Das ist eine Impedanz zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Teil des Signals. Bei einer homogenen, isotropen Masse beträgt die Phase 45°. Dies ist häufig in tonigen, lehmigen Ablagerungen der Fall. Eine größere Phase weist auf Anisotropie des geologischen Körpers hin, die z. B. durch 2-Schicht-Fälle oder intensive Klüftung gegeben ist. Für den 2-Schicht-Fall gilt folgendes Gesetz:

Überlagert eine leitende Schicht eine nichtleitende Schicht, so vermindert sich der Phasenwert auf unter 45°. Entsprechendes gilt für den umgekehrten Fall.

Befindet sich eine elektrisch leitende, subvertikale Störung in weniger leitendem Fels, kann man bei entsprechend vorhandenen Sendern immer \pm parallel und \pm senkrecht zum Streichen dieser Struktur messen. Man spricht von E-Polarisation, wenn man parallel zu dieser Störung mißt, und von H-Polarisation, wenn senkrecht dazu gemessen wird (G. FISCHER et al., 1983). Eine leitende subvertikale Störung beeinflusst die Meßwerte folgendermaßen:

- Die E-Polarisation erscheint mit großem scheinbaren Widerstand und kleiner Phase.

- Die H-Polarisation erscheint mit kleinem scheinbaren Widerstand und großer Phase.

Wenn man an derselben Meßstelle in verschiedenen Richtungen mißt, ist es möglich, den größten Widerstand und die kleinste Phase zu identifizieren und so das Streichen auch einer verdeckten Struktur zu ermitteln. Dank dieser Eigenschaft ist es darüber hinaus auch möglich, einen Anisotropiekoeffizienten darzustellen, der das Verhältnis zwischen größtem und kleinstem scheinbaren Widerstand angibt:

$$K = \frac{Ra_{max.}}{Ra_{min.}} \quad (3)$$

Dieser kann zusätzlich durch die richtungsabhängigen Phasenunterschiede ($\delta \phi$) gekennzeichnet werden.

3. Geologisch-tektonische Situation

Die als Arbeitsgebiete ausgewiesenen Oberharzer Untersuchungsgebiete sind im südöstlichen Bereich des Oberharzer Devonsattels (Emsium) gelegen, der im W, S und E von siliciklastischen unterkarbonischen Serien eingerahmt wird, und im N durch die Harznordrand-Störung abgeschnitten wird.

Die Gesteinsserien im Untersuchungsgebiet zählen sämtlich zu dem Komplex des Kahlebergsandsteins, der hauptsächlich aus Quarziten, quarzitischen Sandsteinen und Schiefeln sowie untergeordnet aus Tonschiefern aufgebaut ist. Im Bereich des Testareals (Dicker Kopf, Steile Bramke, Hasselthal) sind nach C. HINZE (1971) die in Fig. 2 dargestellten Schichtfolgen vorhanden.

Während die Heiligenberger Grauwacke (keine Grauwacke im eigentlichen Sinn), die Nessigi-Schichten und die Schalcker Schichten ganz überwiegend aus Quarziten und quarzitischen Sandsteinen bestehen, sind in die Peiffenweg-Schiefer und die Giengelsberger Schichten häufiger Tonschieferlagen eingeschaltet.

Tektonisch ist der Komplex des Kahlebergsandsteins dem NW-vergenten variszischen Faltenbau des Oberharzes angepaßt, wobei im wesentlichen die Muldenstrukturen vollständig ausgebildet sind, während die Sättel häufig durch aufgeschobene flachere Muldenflügel unterdrückt werden. Die im Ganzen SW-NE verlaufenden B-Elemente (Faltenachsen) sind infolge zahlreicher Störungen stark segmentiert, so daß großräumig einfache Strukturen kleinräumig in recht komplizierte Gebilde aufgelöst sein können. Als charakteristische Störungen für dieses Gebiet sind streichende, Gangspalten- und Querstörungen voneinander zu unterscheiden. Während die Gangspaltenstörungen im wesentlichen ein flachherzynisches Streichen (WNW/ESE) zeigen, verlaufen die Querstörungen eher in Richtung SE/NW. Beide Systeme können sigmoidal ineinander übergehen. Die Gangspaltenstörungen zeichnen sich vor allem durch z. T. Dezimeter- bis Meterbreite, mit Gangquarzen bzw. Calcit verkittete und verfestigte Gesteinskörper aus, die teils als Härtling im Landschaftsbild herauspräpariert sind. Demgegenüber sind Querstörungen oft nur durch stärkere Zerrüttung des Gesteins gekennzeichnet. Dies gilt ebenso für die streichenden Störungen, die darüber hinaus stärker mylonitisiert und häufig mit tonigem Material aufgefüllt sind.

Die spezielle geologisch tektonische Situation im Bereich der von den Verfassern durchgeführten VLF-R-Messungen läßt sich nach den Geländebefunden Übertage und Untertage wie folgt umreißen:

Die wenigen stratigraphischen Befunde bezeugen im Bereich zwischen Steiler Bramke und Hasselthal das Vorkommen Heiligenberger Grauwacke sowie im unteren Abschnitt des Hasselthals Pfeiffenweg-Schiefer. Auch im Oker-Grane-Stollen sind keine weiteren stratigraphischen Hinweise zu finden (C. HINZE & A. HERRMANN, 1972), da die für die gesamte Region des Kahlebergsandsteines charakteristischen Quarzite und Quarzitschiefer-Wechselfolgen zur Abgrenzung einzelner Serien schlecht geeignet sind. So ist man gezwungen, bei einer Strukturanalyse ausschließlich auf rein tektonische Befunde zurückzugreifen.

Die SW/NE streichenden Strukturen kennzeichnen den gesamten Bereich. Die b-Achsen größerer Faltengebilde (1. Ordnung), indirekt ermittelt, streichen ca. N 25°. Die NW-Flanke des oberen Talabschnittes der Steilen Bramke wird durch eine Muldenstruktur bestimmt, die von SE her von der nächsten Struktur überschoben wird, so daß dort kein eigentlicher Sattel ausgebildet ist. Im Oker-Grane-Stollen zeigt sich bei ca. 2500 m (Entfernung vom Stolleneinlaß) der Muldenkern mit zum Teil

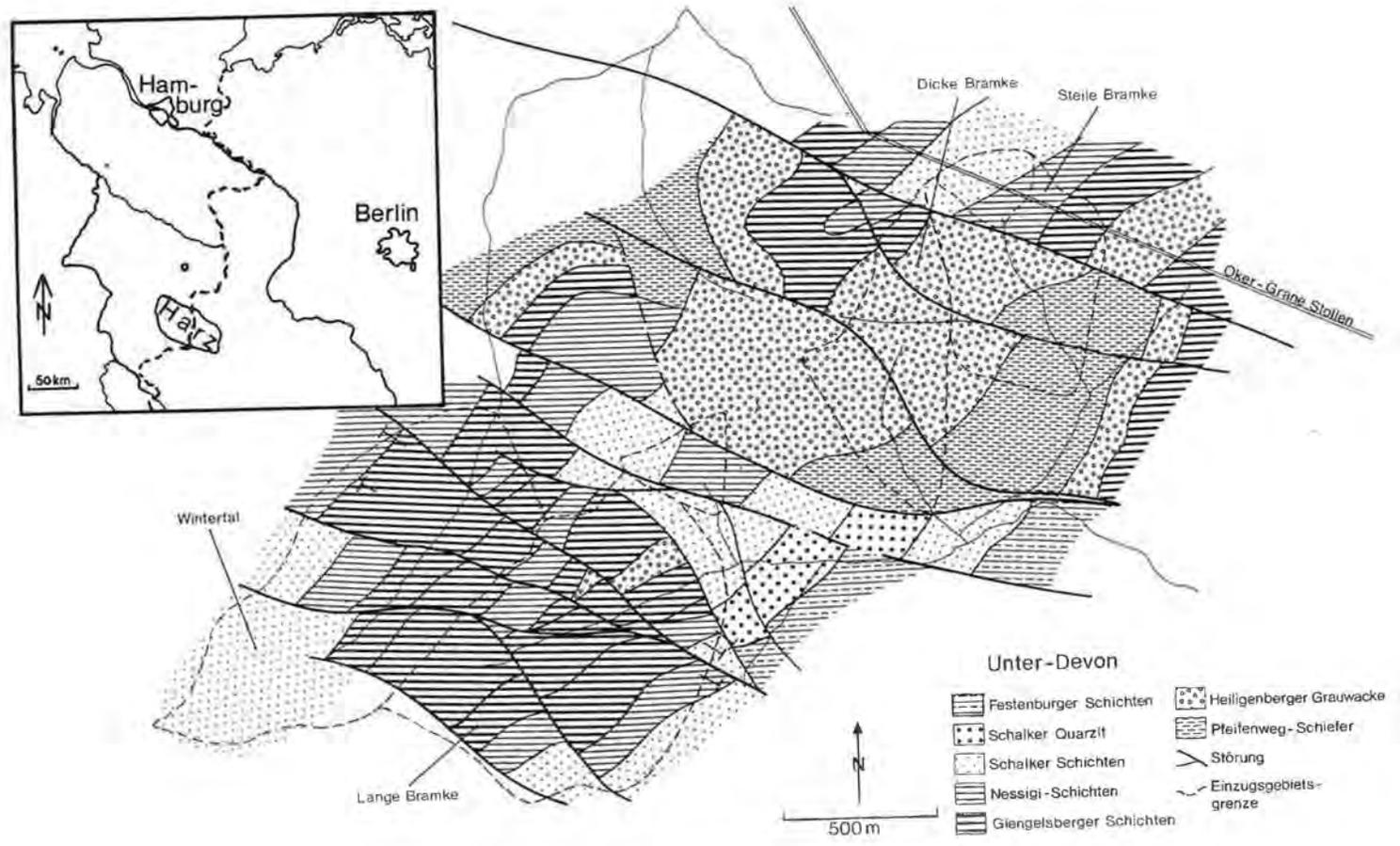


Fig. 2: Geologische Karte des SE-Bereiches des Oberharzer Devonsattels mit Umgrenzung der Oberharzer Untersuchungsgebiete.

ausgeprägten Spezialfaltenbildern. Die folgende, weiter im SE ausgebildete Faltenstruktur ist wiederum eine Mulde 1. Ordnung. Diese erweist sich in tieferen Bereichen (Oker-Grane-Stollen) in Folge zahlreicher Querstörungen als stark segmentiert. Die kleintektonische Analyse zeigt vor allem die Hauptkluftrichtungen (Fig. 3). Es sind überwiegend die Richtungen zwischen N 110 und N 150° als generelle Hauptrichtungen ausgebildet, in Übereinstimmung mit dem allgemeinen Kluftbild des Kahleberg-sandsteins. Untergeordnet sind die Klüfte der Richtungen zwischen N 50 und N 80° sowie eggisch streichende Klüfte (N 170°) vorhanden. Eine Ausnahme bildet die in Fig. 3/5 dargestellte Kluftröse aus dem Stollenbereich zwischen 1600 und 1700 m (Entfernung vom Stolleneinlaß). In diesem Falle ist durch eine streichende Störung, die eine intensive tektonische Beanspruchung des Gesteins zur Folge hatte, als Hauptkluftrichtung N 70° hervorgehoben. Alle wesentlichen Gefügeelemente der Region Steile Bramke und Oker-Grane-Stollen sind in Fig. 4 in synoptischen Gefügediagrammen dargestellt.

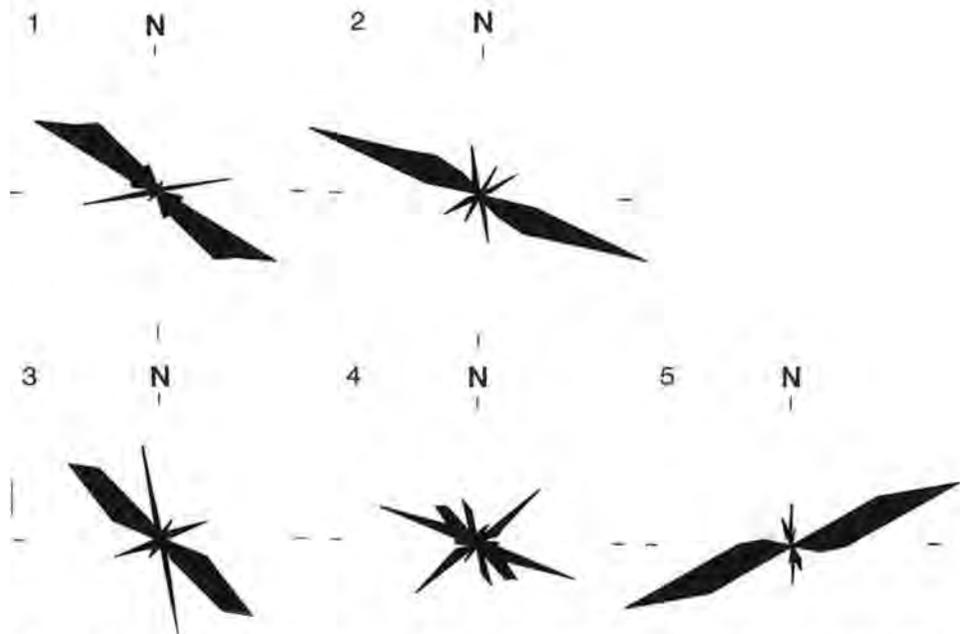


Fig. 3: Kluftrösendiagramme für den Bereich Steile Bramke und Oker-Grane-Stollen. 1 Steile Bramke, 2 Wasseraustritte im Oker-Grane-Stollen bei 2550 m, 3 Stollen zwischen 2550 und 2600 m, 4 Stollen zwischen 1700 und 1800 m, 5 Stollen zwischen 1600 und 1700 m.

4. Hydrogeologische Situation

Störungen und Störungssysteme, die Übertage in der Regel schwierig zu erkunden sind, konnten in dem 2,4 km langen Aufschluß des Oker-Grane-Stollens ausgezeichnet aufgenommen werden. So konnten neben der Charakteristik der verschiedenen

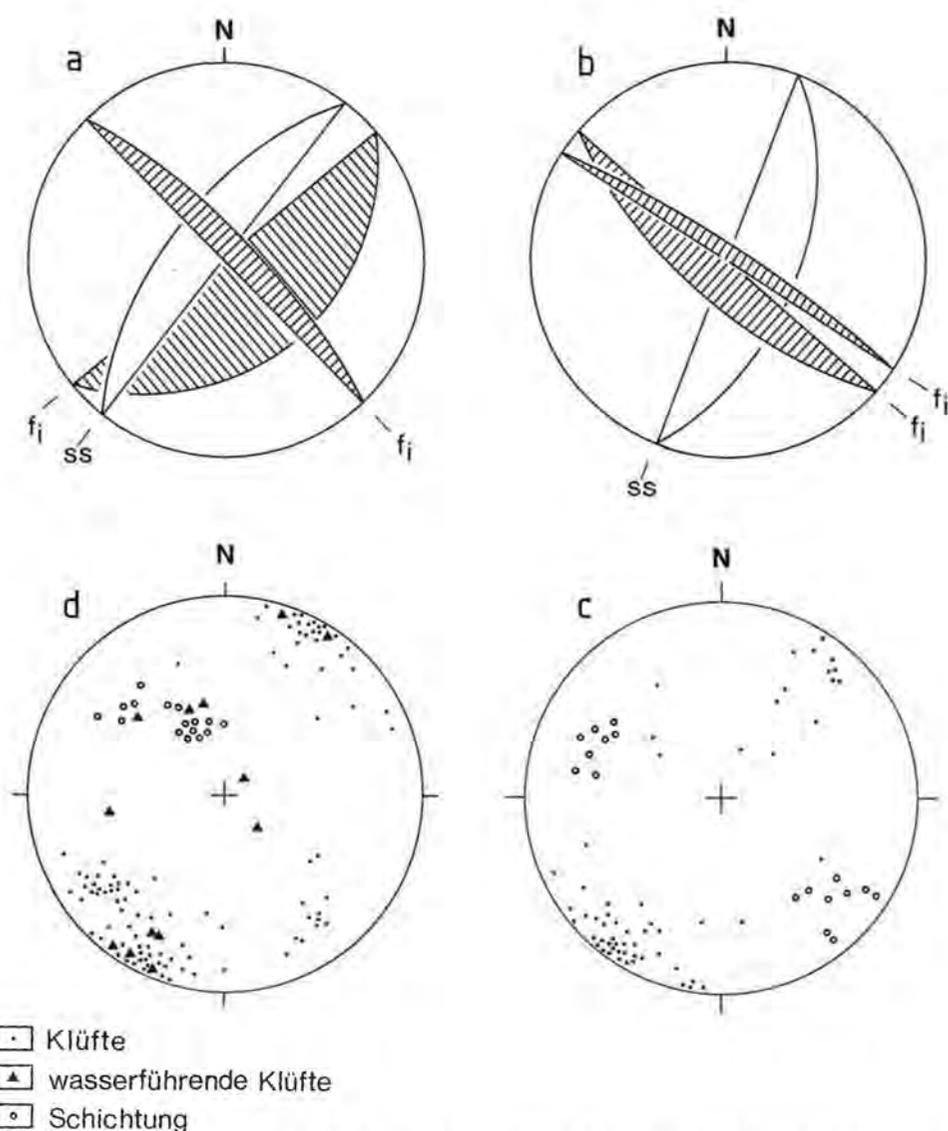


Fig. 4: Synoptische Darstellung der Gefügeelemente im Untersuchungsgebiet Steile Bramke (a, b, c) sowie im Oker-Grane-Stollen (d) zwischen 2550 und 2650 m (vergleiche Fig. 10).

Störungssysteme (s. o.) auch deren hydrogeologische Eigenschaften dargestellt werden. Unter Berücksichtigung, daß auf Grund des flachherzynischen Verlaufs des Stollens einige Richtungen bevorzugt, andere scheinbar unterdrückt werden, konnte eine besonders starke Wasserführung der Gangspaltenstörungen nachgewiesen werden. Dieses gilt besonders für Kreuzungsbereiche mehrerer Störungselemente. Fast ebenso häufig sind streichende Störungen, untergeordnet Querstörungen an der Wasserführung beteiligt. Als wasserleitende Elemente im Stollen fungieren Klüfte und

Schichtfugen nur in der Umgebung von Störungen. Eine örtlich nur schwach ausgebildete Schieferung (s1) ist nicht leitend. An dieser Stelle sei ausdrücklich vermerkt, daß die o. g. Gefügeelemente mit Ausnahme der Schieferung sowohl wasserleitend als auch nicht wasserleitend sein können.

Da Wasserbewegungen im geklüfteten Festgestein, besonders im Hinblick auf Tiefenzirkulation vom jeweiligen Bewegungsschema des Gebirges abhängen, wird im Folgenden ein Strukturplan des Oberharzes kurz geschildert:

Für den Oberharz setzt sich der Strukturplan im wesentlichen aus zwei dynamischen Phasen, der variszischen und der postvariszischen Phase zusammen. Im Zuge der variszischen Phase mit einengender Bewegung nach NW konnten die in diesem Zusammenhang geschaffenen Hauptstörungssysteme infolge Scherung eggische (N 170°) sowie flacherzgebirgische Richtungen (N 80°) geöffnet werden. Diese entsprechen den Richtungen der Oberharzer Ruscheln (A. STAHL, 1928). Das so entstandene Gefügebild wird bereits in spätvariszischer Zeit durch den Oker- und Brockenplutonismus verändert, indem besonders die herzynische Richtung der Gangspalten-systeme gebildet werden, die für eine Wasserzirkulation nennenswerte Hohlräume schaffen. Der überwiegende Teil dieser Hohlräume wird durch hydrothermale Bildungen in Form von Calcit, Quarz sowie Vererzungen wieder verschlossen. Die postvariszische, also saxonische Phase, besonders die Heraushebung des Harzes während der Kreide, schafft wiederum eine neue Situation, die letztlich den Gesamtstrukturplan des Harzes abschließt. Während der Ausbildung der Harznordrandstörung, welche nicht nur als steile Aufschiebung (K. MOHR, 1978), sondern auch als wrench-fault-system angesehen werden kann (V. WREDE, 1987), wurde unter anderem die herzynische Richtung der Gangspalten reaktiviert. Nach der Auswertung von Bewegungsspuren an bis zu Meter mächtigen Quarzgängen liegen die Gangspalten des Untersuchungsgebietes vorwiegend als sinistrale Seitenverschiebungen vor, so daß innerhalb dieses Systems neue Öffnungen geschaffen wurden. Bei einer Deutung der Harznordrandstörung als Aufschiebung oder Überschiebung (H. FLICK, 1986) sind Öffnungen im Bereich herzynischer Strukturen kaum zu erwarten.

5. Die VLF-R-Messungen

Das von den Verfassern eingesetzte VLF-R-Meßgerät wurde von IMRE MÜLLER entwickelt und hergestellt. Dieses umfaßt den gesamten Frequenzbereich zwischen 15 und 25 kHz, so daß folgende Sender empfangen werden konnten:

Tab. 1: Senderfrequenzen für VLF-Sender sowie die jeweiligen Richtungen zur Lage der Sender für das Arbeitsgebiet Lange Bramke im Oberharz.

Frequenz (kHz)	Richtung (Grad)	Bezeichnung
15,1	N 60	Bordeaux, F
16,8	N 60	"
16,4	N 5	Skandinavien
16,0	N 110	GB
19,6	N 110	"
19,1	N 120	UdSSR
21,4	N 80	USA
24,5	N 140	

Daß die jeweiligen Senderrichtungen mit geologischen Strukturen des Harzes in Beziehung zu setzen sind, zeigt Fig. 5, in der sowohl die Richtungen der Sender als auch die charakteristischen Strukturelemente des Oberharzes eingetragen sind. So wird deutlich, daß die Senderrichtung N 60° in etwa der Streichrichtung des variszischen Faltenbaues, die N 110–120° dem Streichen des Oberharzer Gangspaltensystems entsprechen, während das System der Querstörungen durch die Richtung N 140° repräsentiert wird. Der skandinavische Sender mit der Richtung N 5° liegt etwa parallel zu den rheinisch verlaufenden Strukturen.

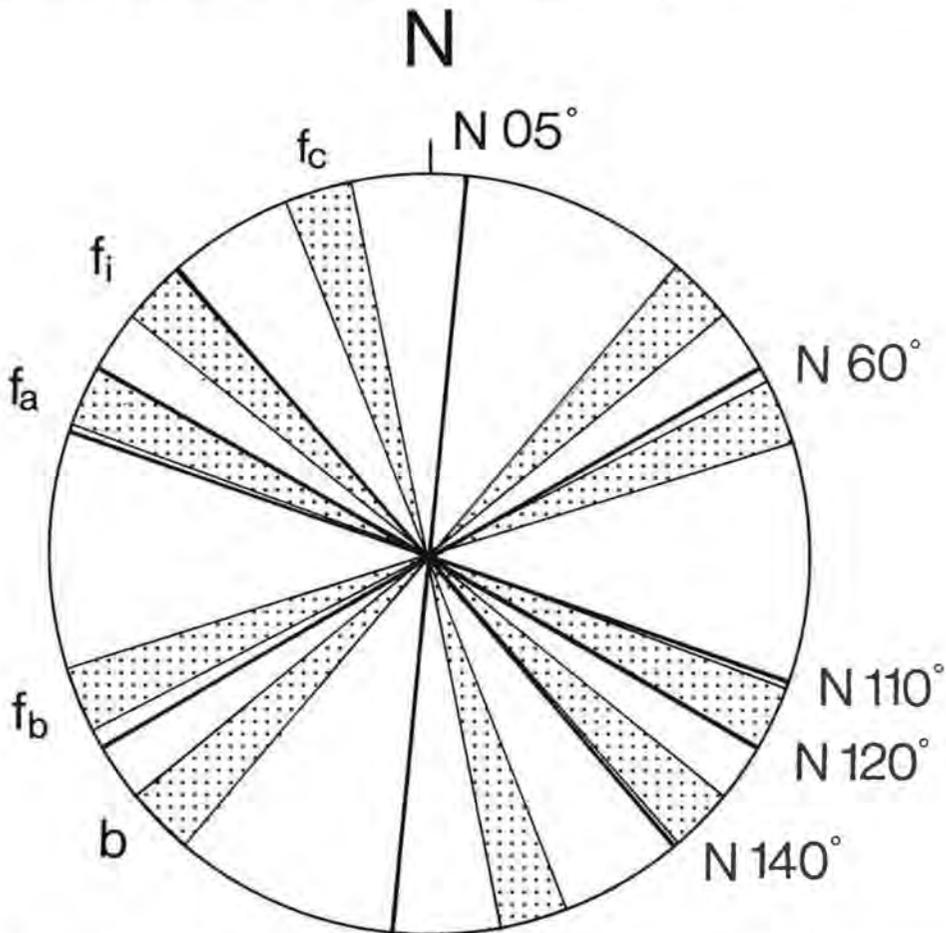


Fig. 5: Richtungsrose mit Angabe der VLF-Sender und mit den Oberharzer Strukturen (A. STAHL, 1928): b = Richtung des Faltenbaues, fb = Richtung der Ruscheln, fa = Richtung des Oberharzer Gangspaltensystems, fi = Richtung der Querstörungen und Hauptkluftrichtung, fc = Richtung der vertikalen Ruscheln.

Um in möglichst kurzer Zeit gute Ergebnisse erzielen zu können, wurden mehrere Profile gelegt (Fig. 6), die hauptsächlich senkrecht zu den Gangspalten- bzw. Querstörungssystemen verliefen und die mit den jeweiligen senkrecht zueinanderstehenden Sendern durchgemessen wurden (Profile 1–5).

Für eine generelle Betrachtung strukturbezogener Leitfähigkeiten wurden parallel zur Stollenrichtung in einem relativ ungestörten Bereich einige Punkte mit jeweils vier Senderrichtungen aufgenommen. Für die Profile 1 bis 4 wurde an jedem Meßpunkt zunächst der französische Sender der Richtung N 60° (16,9 kHz) aufgenommen. Beim Überschreiten einer vermeintlichen Struktur wurden \pm senkrecht dazu in Richtung N 140° Kontrollmessungen zur Erhebung des Anisotropiekoeffizienten durchgeführt. Entsprechendes gilt für Profil 5, wobei aus empfangstechnischen Gründen für die NW/SE-Richtung der Sender mit 19,1 kHz, N 120° gewählt wurde.

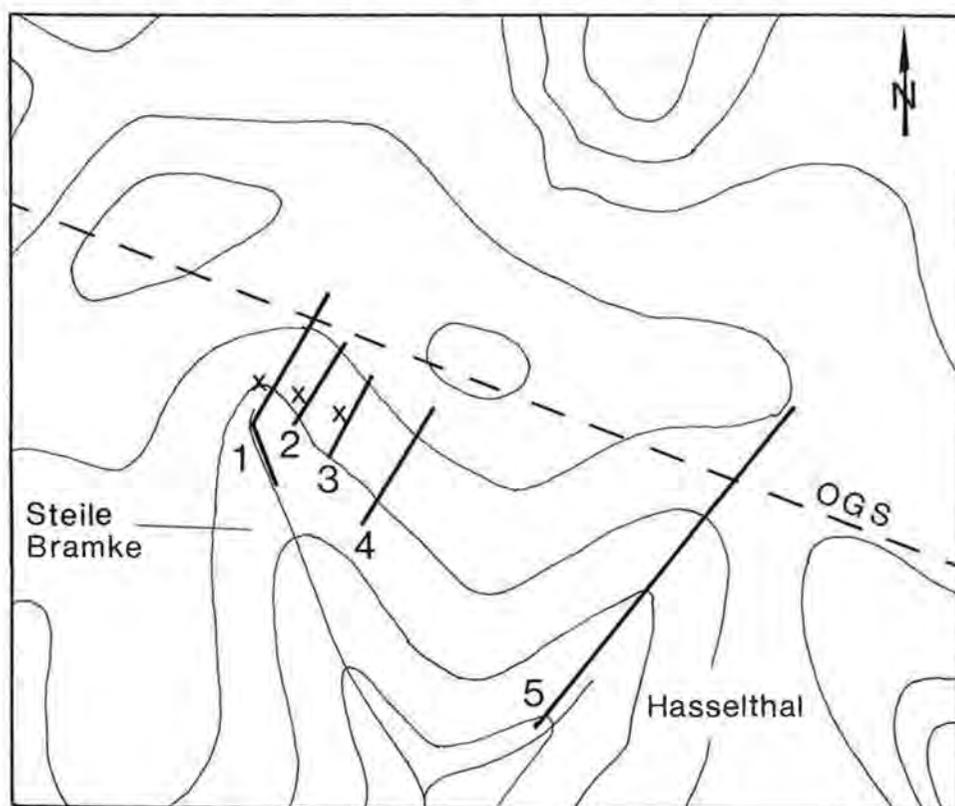


Fig. 6: Karte des Untersuchungsgebietes mit Lage der VLF-R-Profile.

200 m

6. Ergebnisse

Nach der vorangegangenen geologisch-tektonischen Aufnahme wird bei den Meßreihen zwischen gestörten und ungestörten Bereichen unterschieden.

Ungestörte Bereiche

In relativ ungestörten Bereichen des Untersuchungsgebietes liegen die ρ_A -Werte zwischen 600 und 1200 Ωm , wobei Richtungsabhängigkeiten mit wenigen Ausnahmen stets zu erkennen sind. So sind in der Regel die Werte für die scheinbaren

Widerstände in den Richtungen N 110° und N 140° am höchsten, während die Richtungen N 5° und N 60° die jeweils geringeren Werte zeigen (Fig. 7). Eine Abhängigkeit zwischen scheinbaren Widerständen und der Phase besteht in diesen Fällen nicht. Damit lassen sich die richtungsabhängigen Widerstandswerte mit der Klüftung (Fig. 3) vergleichen. Das bedeutet bezüglich der Leitfähigkeit eine Bevor-

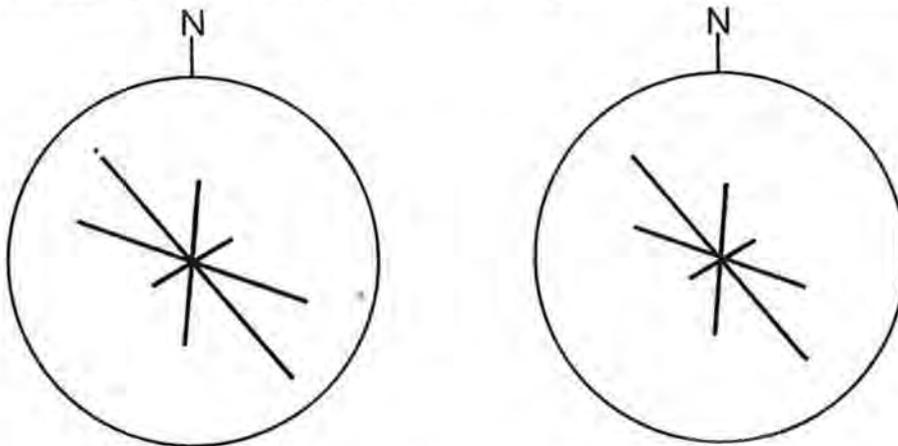


Fig. 7: Scheinbare Widerstände des Untergrundes in Abhängigkeit zur Richtung in ungestörten Bereichen. Ein Kreisdurchmesser entspricht 1000 Ωm .

zugung der Hauptklüftrichtungen im Arbeitsgebiet. Dieses Ergebnis wird durch hammerschlagseismische Messungen im Bereich des Einzugsgebietes Lange Bramke unterstützt (A. SCHEELEN, 1985), wonach in Streichrichtung höhere Geschwindigkeiten aufgezeichnet wurden als in der Hauptklüftrichtung. Letzteres ist allerdings statistisch noch nicht abgesichert.

Gestörte Bereiche

Zur Erfassung der Störungsstrukturen wurden gezielt die Profile 1–4 (Fig. 6) mit Anpeilung des Senders N 60° angelegt. Wie der Gang der Widerstandslinie und der Phase in Fig. 8 a anzeigen, ist bei 155 m (Markierung X) ein deutlicher Abfall des scheinbaren Widerstandes sowie ein Ansteigen der Phase zu verzeichnen. Der niedrigste Wert von ρ_A beträgt an der Markierung X 118 Ωm , der dazugehörige Phasenwert 60°. Nach der Gleichung 2 beträgt hier die Eindringtiefe ca. 40 m, so daß eine Deckschichtenerscheinung ausgeschlossen werden kann. In den Profilen 2 und 3 (Fig. 6) sind ebenso relativ niedrige Werte für die scheinbaren Widerstände sowie höhere Werte für die Phase angezeigt (Tab. 2):

Tab. 2: Die jeweils niedrigsten Werte für scheinbare Widerstände und höchsten Phasenwerte sowie die entsprechenden Anisotropiekoeffizienten der Profile 1–4 (s. Fig. 6).

	App N 60° Ωm	Phase Grad	App N 140° Ωm	Anisotropie- koeffizient
Profil 1	118	60	3260	27,6
Profil 2	384	48	3100	8,0
Profil 3	393	48	2440	6,2
Profil 4	580	41	1102	1,9

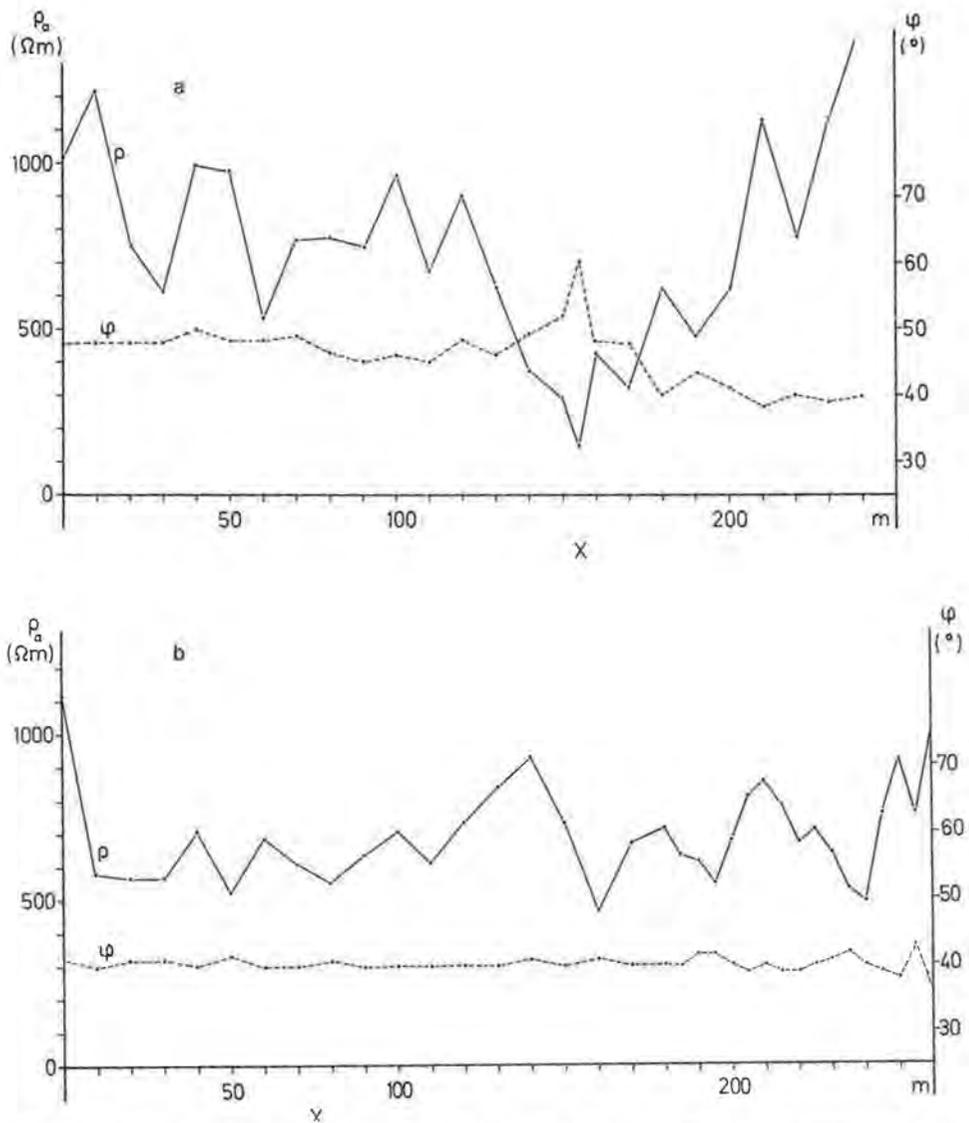


Fig. 8: Linie des scheinbaren Widerstandes und der Phase in Profilen quer zur Richtung der Gangspaltenstörungen. a Profil 1 (vgl. Fig. 6), b Profil 4 (vgl. Fig. 6).

Im Profil 4, 200 m SE¹, sind keine nennenswerten Phasenunterschiede und keine besonders niedrigen scheinbaren Widerstandswerte aufgezeichnet (Fig. 8 b). Verbindet man die Punkte X der Profile 1–3, so liegen diese auf einer Linie mit einer Streichrichtung von N 130°. Das entspricht einer Struktur, die dem Gangspaltensystem bzw. der Querstörungsrichtung oder Hauptkluftrichtung zugeordnet werden kann. Die leitende Struktur verschwindet nach SE. In ca. 400 m Entfernung in SE¹-Richtung sind an einzelnen Punkten nur noch Widerstandswerte zwischen 600–900 Ωm sowie Phasen zwischen 35–40° gemessen worden. Nach diesen Ergeb-

nissen des VLF-R-Verfahrens und durch Kenntnis der geologisch-tektonischen Situation aus dem Bereich der Steilen Bramke sowie aus dem ca. 300 m tiefer gelegenen Oker-Grane-Stollen läßt sich eine hydrogeologische Situation schildern, die detaillierte Einblicke in grundwasserdynamische Prozesse ermöglicht.

Aufgrund der tektonischen Bewegungen innerhalb der Gangspaltensysteme (s. o.) sind im Bereich der Quelle Steile Bramke die Hauptkluftscharen der Richtung N 140° bevorzugt als geweitete Gefügemerkmale ausgeprägt. Dieses ist nicht nur aus den ermittelten Relativbewegungen zu schließen, sondern auch aus Kluftweitenmessungen. Letztere belegen eine zunehmende Kluftweite der Hauptkluftscharen zur Quelle Steile Bramke hin. Im Zuge von fortschreitender Verwitterung sind gerade in diesem Störungsbereich die Klüfte mit tonig bis lehmigem Material verfüllt worden, so daß relativ zu weniger gestörtem Festgestein ein StauhORIZONT gebildet wurde. Das zur Tiefenzirkulation gehörige Grundwasser wird in Klufträumen der Gangspaltenstörung, die nach VLF (Fig. 9) in Richtung N 110° verläuft, nördlich des StauhORIZONTES zur Tiefe hin abgeleitet. Dieses entspricht der direkten Beobachtung der Wasseraustritte im Oker-Grane-Stollen 300 m unter dem Meßfeld. Wie in Fig. 10 zu sehen, sind die Wasseraustritte auf die flachherzynisch verlaufende Richtung beschränkt, während die Störungsrichtungen und die streichende Richtung an diesem Orte keine Wasseraustritte zeigen.

Das im Bereich des Hasselthales gemessene Profil (Fig. 6) zeigt beim Durchgang von NE nach SW weder ein ausgeprägtes Phasenmaximum noch ein deutliches Minimum des scheinbaren Widerstandes. Demgegenüber sind aber auf nahezu der gesamten Profillänge deutliche Anisotropien angezeigt (Fig. 11), die höhere Leitfähigkeiten in der Richtung der Oberharzer Gangspaltensysteme anzeigen. Das Hasselthal wurde in erster Linie durch eine streichende Störung geprägt. Die Weitung der Kluftsysteme geschah aber im wesentlichen an den Hauptkluftsystemen bzw. Gangspaltensystemen. Einhergehend mit tiefgründiger Verwitterung und Tonfüllungen in stärker geweiteten Klüften wird hier mit der VLF-R-Methode nicht nur die Richtungsabhängigkeit einer Leitfähigkeit, sondern auch die Tiefgründigkeit der Verwitterung angezeigt, die im Bereich des Hasselthals bis ca. 100 m reicht.

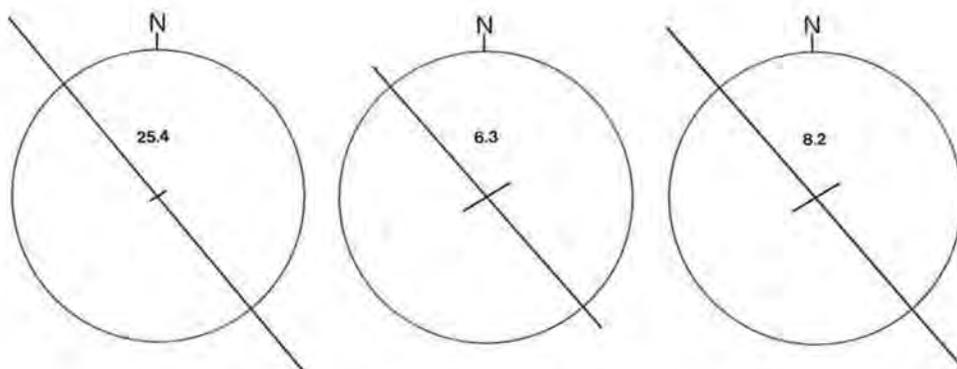


Fig. 9: Scheinbare Widerstände des Untergrundes in Abhängigkeit zur Richtung im Bereich Steile Bramke. Der Anisotropiekoeffizient ist durch die Zahlen in den Diagrammen wiedergegeben. Ein Kreisdurchmesser entspricht 1000 Ω m.

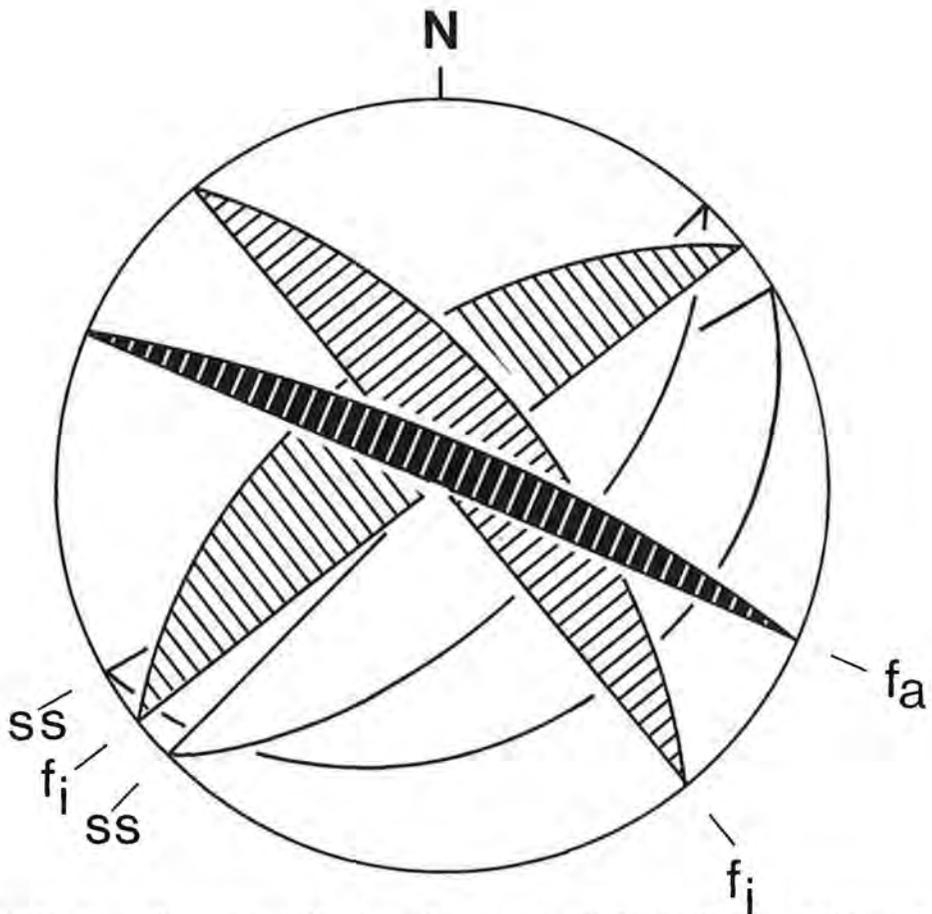


Fig. 10: Hauptgefügeelemente im Oker-Grane-Stollen zwischen 2550 und 2650 m. *ss* = Schichtung, *fi* = nicht wasserführende Hauptklüftscharen, *fa* = wasserführende Klüfte (vgl. auch Fig. 4 d).

Nach Ansicht der Verfasser ist die Mächtigkeit der Verwitterungszone nur dann zu ermitteln, wenn die Anisotropien sehr deutlich angezeigt sind, da nur in solchen Fällen von einer entsprechenden Weitung der Klüfte ausgegangen werden kann. In nahezu isotropen Fällen ist die Eindringtiefe der Verwitterung nur dann zu ermitteln, wenn die Werte für den scheinbaren Widerstand sehr viel niedriger sind als die sonst üblichen für das entsprechende Gestein.

7. Ausblicke

Nach den von den Autoren durchgeführten Untersuchungen mit der VLF-R-Methode, die von IMRE MÜLLER ständig verfeinert und auf den neuesten Stand der Technik gebracht wird, kann gefolgert werden, daß die Anwendung dieser Methode auch in komplexen inhomogenen geologischen Systemen möglich ist. Besonderes Augenmerk, gerade bei Anwendung derartiger geophysikalischer Methoden, muß

dennoch auf eine penible Erkundung der geologisch-tektonischen Situation Wert gelegt werden, da sonst für eine Interpretation der Meßwerte sämtliche Grundlagen fehlen. In Fig. 12 ist in einer schematischen Darstellung der Strukturplan im Bereich Steile Bramke nach einzelnen Gefügeelementen aufgelöst und mit den VLF-R-Profilen 1-3 (s. Fig. 6) überlegt.

So sei abschließend angeführt, welche hydrogeologisch relevanten Elemente mit dem kombinierten Verfahren von klassischer Geologie und Geophysik im Bereich paläozoischer Mittelgebirge ermittelt werden können:

1. Ermittlung von Anisotropiebereichen, die mit herkömmlichen geologischen Verfahren nicht zu erhalten sind.
2. Ermittlung leitender Elemente, z. B. wasserführender Störungen.
3. Ermittlung der Mächtigkeit der Verwitterungszone in Störungsbereichen.

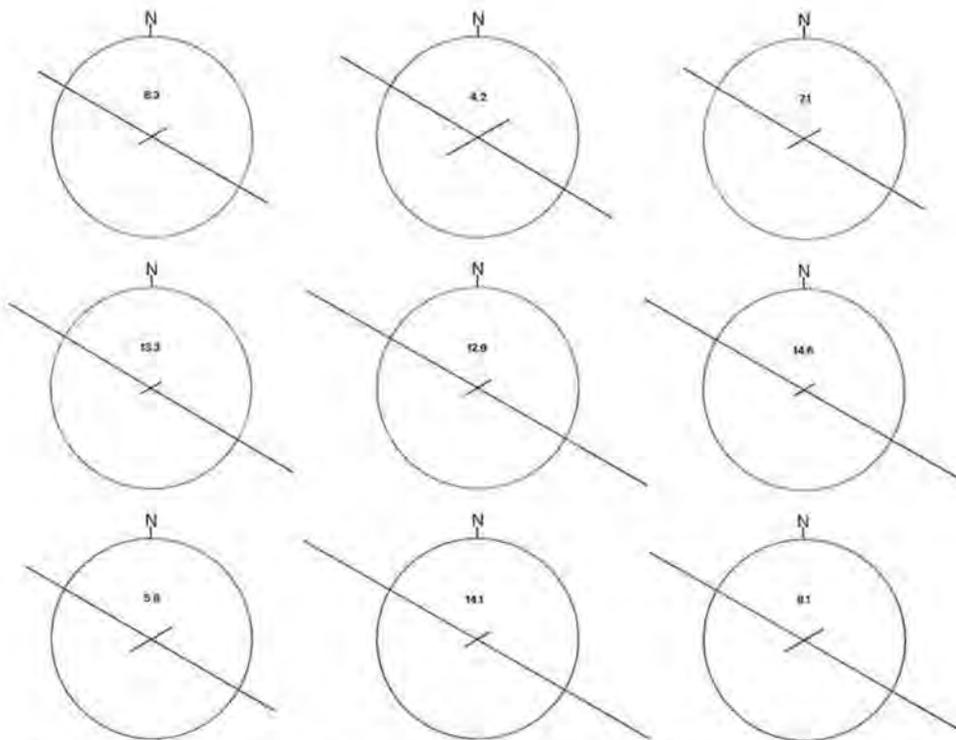


Fig. 11: Scheinbare Widerstände des Untergrundes in Abhängigkeit zur Richtung im Bereich Hasselthal (vgl. Profil 5 in Fig. 6). Die starken Anisotropien (Zahlen in den Diagrammen) verdeutlichen den Störungscharakter dieses Tales. Ein Kreisdurchmesser entspricht 1000 Ωm .

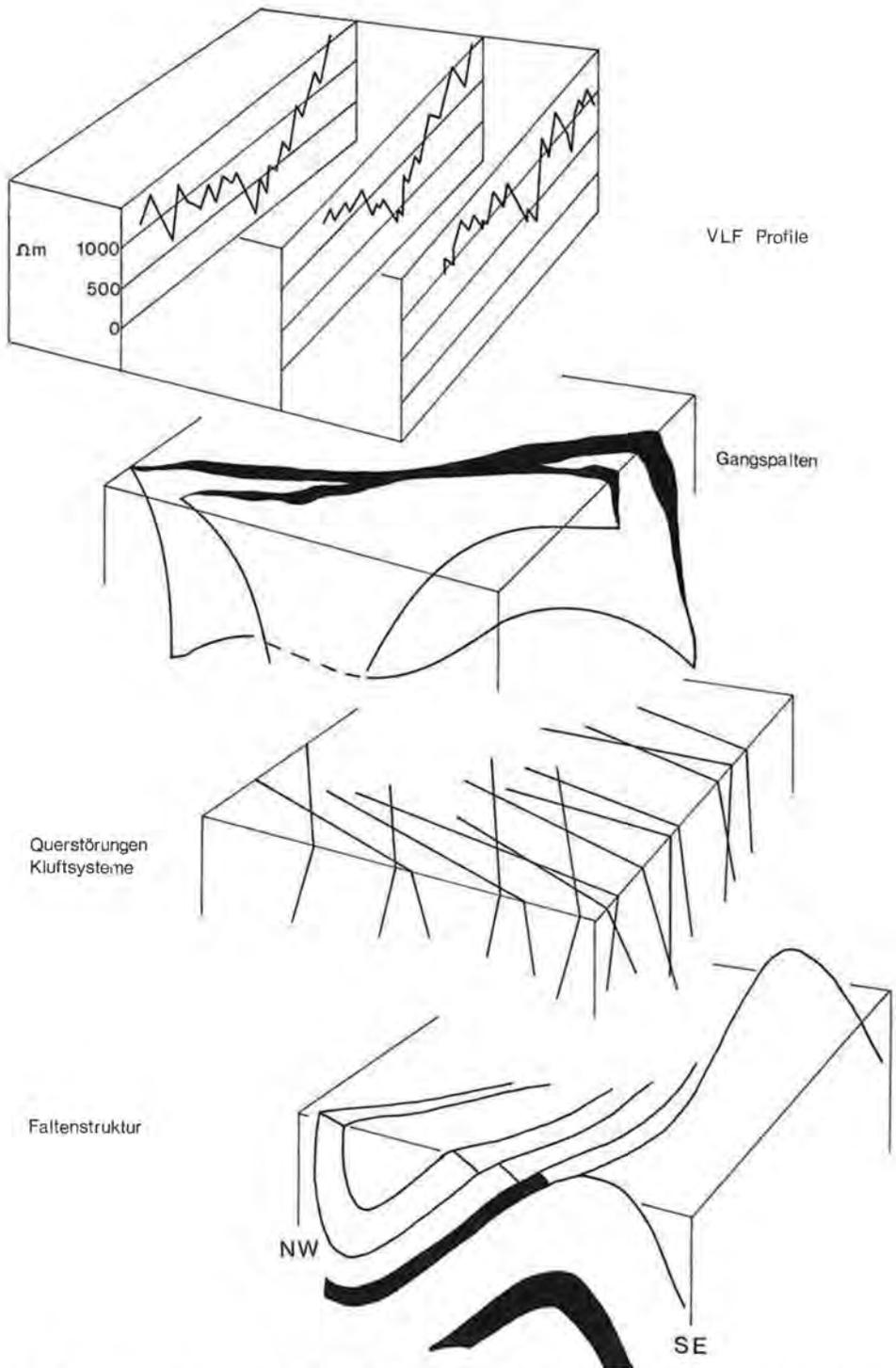


Fig. 12: Schematische Darstellung des Strukturplanes mit Aufschlüsselung der hauptsächlichsten Strukturelemente (Faltenbau, Klüftung und Querstörungen, Gangspaltensystem). Der aufgesetzte VLF-Block entspricht den Profilen 1–3 (Fig. 6) und verdeutlicht deren Zusammenhang mit den Gangspaltenstörungssystemen.

Zusammenfassung

In einem von der DFG geförderten isotopehydrologischen Forschungsvorhaben wurde besonderer Wert auf die Erforschung des Kluftgrundwasserleiters gelegt, da vermutet werden konnte, daß sich der wesentliche Teil der Grundwasserdynamik im Raum des geklüfteten Felses abspielt. Um die Charakteristik des Grundwasserspeichers genau zu erforschen, wurde neben der klassischen geologisch-tektonischen Methode auch das VLF-R-(Very Low Frequency-Resistivity-)Verfahren erstmals im Paläozoischen Mittelgebirge angewendet.

Bei diesem Verfahren wurden der scheinbare Widerstand des durchdrungenen geologischen Körpers direkt unterhalb der jeweiligen Meßstelle sowie die Phase zwischen magnetischer und elektrischer Komponente gemessen. Die geologisch-tektonischen Verhältnisse sind durch den variszischen Gebirgsbau bestimmt. Die Hauptstreichrichtung der Faltenzüge ist SW-NE gerichtet, während Querstörungen \pm senkrecht dazu verlaufen. Ein wesentliches Element ist das System der Oberharzer Gangspaltenstörungen, die zwar variszisch angelegt, jedoch postvariszisch reaktiviert wurden. Diese flachherzynisch verlaufenden Strukturen sowie streichende Störungen und Kluftsysteme sind für die Wasserführung im Kluftgrundwasserspeicher von Bedeutung. Mit dem VLF-R-Verfahren wurden die Leitfähigkeiten dieser Systeme untersucht, indem mehrere Profile senkrecht zur Richtung des Gangspaltenstörungssystems gelegt wurden. Es konnte gezeigt werden, daß sowohl Gangspaltenstörungen als auch gewisse Kluftsysteme eine große Bedeutung für die Grundwasserdynamik und -speicherung haben. Dabei konnte eine Verwitterungszone von einer Tiefenzirkulationszone unterschieden werden. Durch einen unterhalb der Meßfläche verlaufenden Stollen in ca. 300 m Tiefe konnten die mit der VLF-R-Methode an der Oberfläche erzielten Ergebnisse aufgrund entsprechender Wasseraustritte praktisch bestätigt werden. Mit Unterstützung einer geologisch-tektonischen Aufnahme des Gebietes wurden folgende Ergebnisse mit der VLF-R-Methode erzielt:

Im Bereich der Oberharzer Untersuchungsgebiete (Fig. 1) sind in Störungszonen entsprechend den Relativbewegungen an streichenden Störungen und vor allem an Gangspaltensystemen Kluftscharen geöffnet, die teils aufgrund tiefgreifender Verwitterung als Wasserstauer ausgebildet sind und somit Quellhorizonte hervorrufen. Zum anderen sind Klüftungen innerhalb der Gangspaltensysteme wasserleitende Elemente, die hauptsächlich den Bereich von Tiefenzirkulation ausmachen. Ausgeprägte Störungszonen zeichnen sich allgemein durch größere Anisotropien (scheinbare Widerstände verschiedener Richtungen) aus, während die Widerstände relativ ungestörter Bereiche das Abbild der allgemeinen Klüftigkeit nachzeichnen.

Der große Vorteil der VLF-R-Methode liegt in der unkomplizierten Meßmethode, die es nicht nur erlaubt, große Areale in relativ kurzer Zeit zu messen, sondern die vor allem eine große Eindringtiefe bei gutem Auflösungsvermögen aufweist. Genaue geologisch-tektonische Kenntnisse des Arbeitsgebietes sind allerdings die Grundvoraussetzung, um auch in geologisch kompliziert gestalteten Gebieten mit dem VLF-R-Verfahren arbeiten zu können.

Literatur

- FISCHER, G., B. V. LE QUANG & I. MÜLLER (1983): VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two dimensional structures. - *Geophysical Prospecting*, 31, 977-991.
- FLICK, H. (1986): The Hercynian Mountains – a postorogenic overthrust Massif?. - *Naturwissenschaften*, 73, 670-671, Heidelberg.
- HERRMANN, A., J. KNOLL, Chr. LEIBUNDGUT, P. MALOSZEWSKI, R. RAU, W. RAUERT & W. STICHLER (1986): Anwendung von Tracertechniken zur Erfassung des Wasserumsatzes in kleinen Einzugsgebieten. Stand und Fortgang der Arbeiten. - *Dt. Gewässerkundl. Mitt.*, 30 (4), 85-93, Koblenz.
- HERRMANN, A., J. KOLL, M. SCHÖNIGER, W. STICHLER (1987): A runoff formation concept to model water pathways in forested basins. - *Forest Hydrol. a. Watershed Management – Hydrologic (Proceedings of the Vancouver Symposium, Aug. 1987)*, publ. no. 167, 519-529, Vancouver.
- HINZE, C. (1971): Geol. Karte Niedersachsen 1:25 000, Erl. Bl. Clausthal-Zellerfeld Nr. 4128. – 166 S., Hannover.
- HINZE, C. & F. HERRMANN (1972): Geol. Karte Niedersachsen 1:25 000, Erl. Bl. Clausthal-Zellerfeld Nr. 4128, Ergänzungsheft: Baugelogische Aufnahme des Oker-Grane Stollens. – 148 S., Hannover.
- KEJLER, G. V. & F. C. FRISCHKNECHT (1979): *Electrical methods in Geophysical Prospecting*, – 523 S., Oxford.
- MÖHR, K. (1978): *Geologie und Minerallagerstätten des Harzes*. – 387 S., Stuttgart.
- MÜLLER, I. (1982): Résultats préliminaires des sondages géophysiques pluridirectionnels (résistivité, polarisation induite, microsismique) dans la région de la Baume (Jura neuchâtelois, Suisse). - *Bull. de la Soc. Neuchâteloise des Sc. Nat.*, 105, 191-204, Neuchâtel.
- MÜLLER, I. & R. PLANCHEREL (1982): Contribution à l'étude de l'hydrogéologie karstique du massif du Vanil Noir et de la chaîne des Gastlosen (Préalpes fribourgeoises, Suisse). - *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.*, 71, 102-132, Fribourg.
- MÜLLER, I. & Chr. KETTINGER (1987): Cartographie directionnelle de la résistivité électrique des formations géologiques du delta de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse) par la méthode géophysique électromagnétique VLF-R. - *Bull. de la Sc. Neuchâteloise des Sc. Nat.*, 110, 113-118, Neuchâtel.
- MÜLLER, I. & U. SCHOTTERER (1987): Un exemple de l'efficacité de la géophysique électromagnétique VLF-R pour la prospection hydrogéologique dans le karst en bordure de mer (Peleponnese Oriental, Grèce). - *XXI congrès de l'AIH, 12/18 avril 1987, Rome*, 12 S., Rome.
- SCHIELE, A. (1985): Refraktionsseismische Messungen im Einzugsgebiet Lange Bramke (Oberharz) zur Entwicklung eines Speichermodells. - *Unveröffentl. Dipl.-Arbeit*, 95 S., Braunschweig.
- STAHL, A. (1928): Das Problem der Oberharzer „faulen Ruscheln“. - *Zt. Berg-Hütten-Salinenwesen*, 76, 50-61, Berlin.
- WREDE, V. (1988): Der nördliche Harzrand – flache Abscherbahn oder wrench-fault-system?. - *Geologische Rundschau*, 77/1, 101-114, Stuttgart.

Summary

In the Harz-Mountains (West-Germany) a research project was performed in fissured aquifers with use of isotopic dyes, chemistry and geophysics. One of the main goals of this project, supported by the German National Science Foundation (DFG), was the understanding of the flow system organization in the fractured paleozoic reservoirs. In order to complete the classical geological mapping and structure analysis, the Very Low Frequency-Resistivity (VLF-R) was used for the first time in this region.

This electro-magnetic geophysics was developed thanks to the radio transmission in the VLF band (3–30 kHz). Since it is necessary to have radio-communications with submerged submarines and to organize a radio-beaconing system for maritime navigation, many countries have installed very low frequency emitters. Our VLF receiver, a prototype designed by ourselves, measures the electric and magnetic components of the VLF field and gives the apparent resistivity (Ohmm) of the strata as well as a phase information between the electric and magnetic field. The lay out of the system is only 5 m having a depth penetration of many dozen meters. Because there exists emitters in several directions

it is also possible to establish at the same measuring station the electrical properties of the rock in all directions. More often than not they are different. The variations of these parameters are due to the presence of fracture systems, behaving as conductors, influencing by their orientation and development the distribution of the current generated by the VLF emitting station. So the VLF technique consists in making a detailed map of directional resistivities and phase variations, localizing faulted and jointed zones and throws. Parallel to the strike of conductive joints (E-polarisation) the greatest resistivity and smallest phase is measured and perpendicular to the strike (H-polarisation), the smallest resistivity and the highest phase is measured. It is also possible to determine an anisotropy of the apparent resistivity depending on the intensity of the fracture development (Ohmm max./Ohmm min.; Phase max. - Phase min.).

The geological-tectonical conditions in the Harz are determined by Variscan orogeny. The main trend of the fold system strike is SW-NE, whereas cross faults are taking place vertically to them. An important tectonical element is the system of the "oberharzer" vein fissure faults of variscan origin but reactivated again later. All these flat-Hercynian fold structures as well as striking faults and joint systems are relevant for the underground flow system organisation in fissured reservoirs. The geophysical VLF-R prospecting, as an indirect method, attempts to find out some hydrogeological properties of these systems by aligning several profiles perpendicular to the vein fissure faults. It could be shown that both vein fissure faults and certain joint systems are of great importance for groundwater dynamics and storage. It was also possible to distinguish between a circulation in the weathered zone and in the deep aquifer. The presence of a gallery 300 m beneath the research area and suitable water outlets in this gallery permit to verify the results of the VLF-R ground survey. The combined survey with geophysics and structural geology gives the following results:

In the test area of the Upper Harz Mountains joints sets are opened in faulted zones corresponding to the movements along the striking faults and especially along the vein fissure systems. This later became partially an aquiclude because the weathering has filled the joints at a greater depth and in this way produced an alinement of springs. On the other hand some joints in the vein fissure system remain very conductive and assume an important flow rate even in a greater depth. These water conductive joints, verified also in the gallery, are located with the VLF-R as very anisotropic features with high resistivity in the E-pol alinement. As a general rule, an important anisotropy of the apparent resistivity and large phase differences are typical for faulted zones. The resistivity distribution in undisturbed areas reflect the pattern of the general and regional jointing. One of the main advantages of the VLF-R prospecting is the fast and easy lay out in several directions to get parameters with an instrument of rather small dimensions. Even in greater depth the measurement constitutes a vertical loop beneath the measuring station and does not homogenize the strata. A good understanding and the correct interpretation of the measured geophysical parameters needs, however, a detailed knowledge of the geology and the tectonics in the survey area.

Dank

Diese Arbeit entstand im Zusammenhang mit einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten tracerhydrologischen Forschungsvorhaben. So gilt der Dank der Autoren dieser Organisation, die durch weitreichende finanzielle Unterstützung diese interessanten und zukunftsweisenden Forschungen ermöglichte.

Darüber hinaus gilt unser Dank dem Team des tracerhydrologischen Forschungsprojektes, insbesondere dem Projektleiter Herrn Prof. Dr. A. HERRMANN.