

FREIBERGER
FORSCHUNGSHEFTE

C 70

GEOPHYSIK

KLAUS SCHUSTER

**Geophysikalische Erkundung
im Sudan**

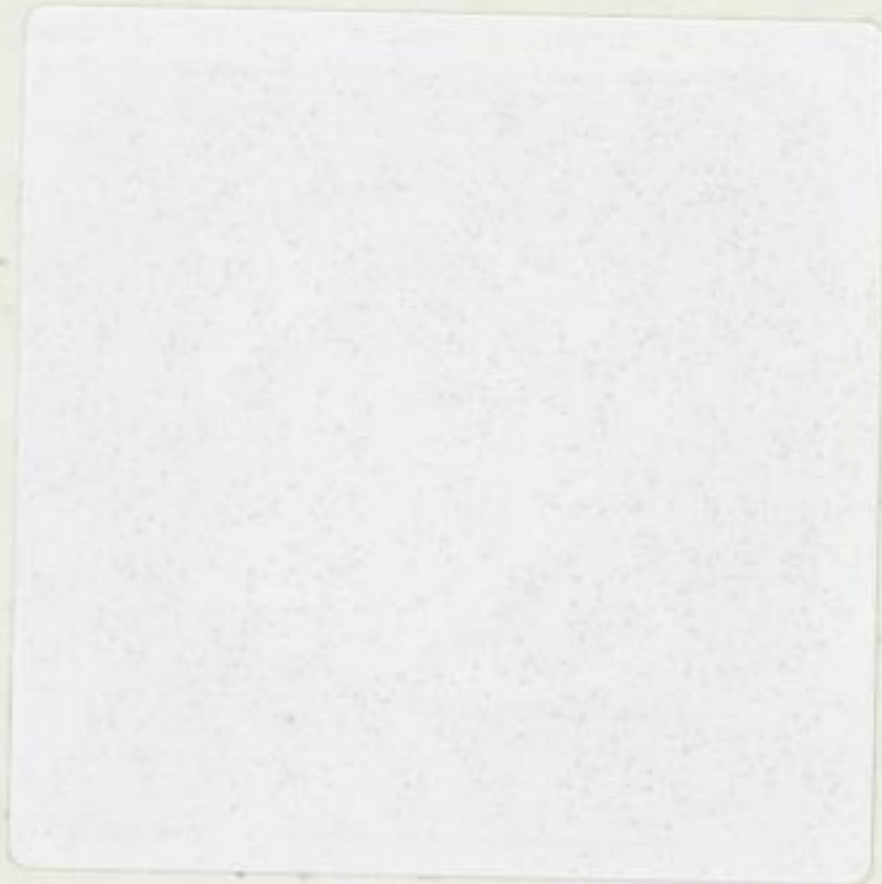


FFH

C 70

BERGAKADEMIE-VERLAG BERLIN

1959



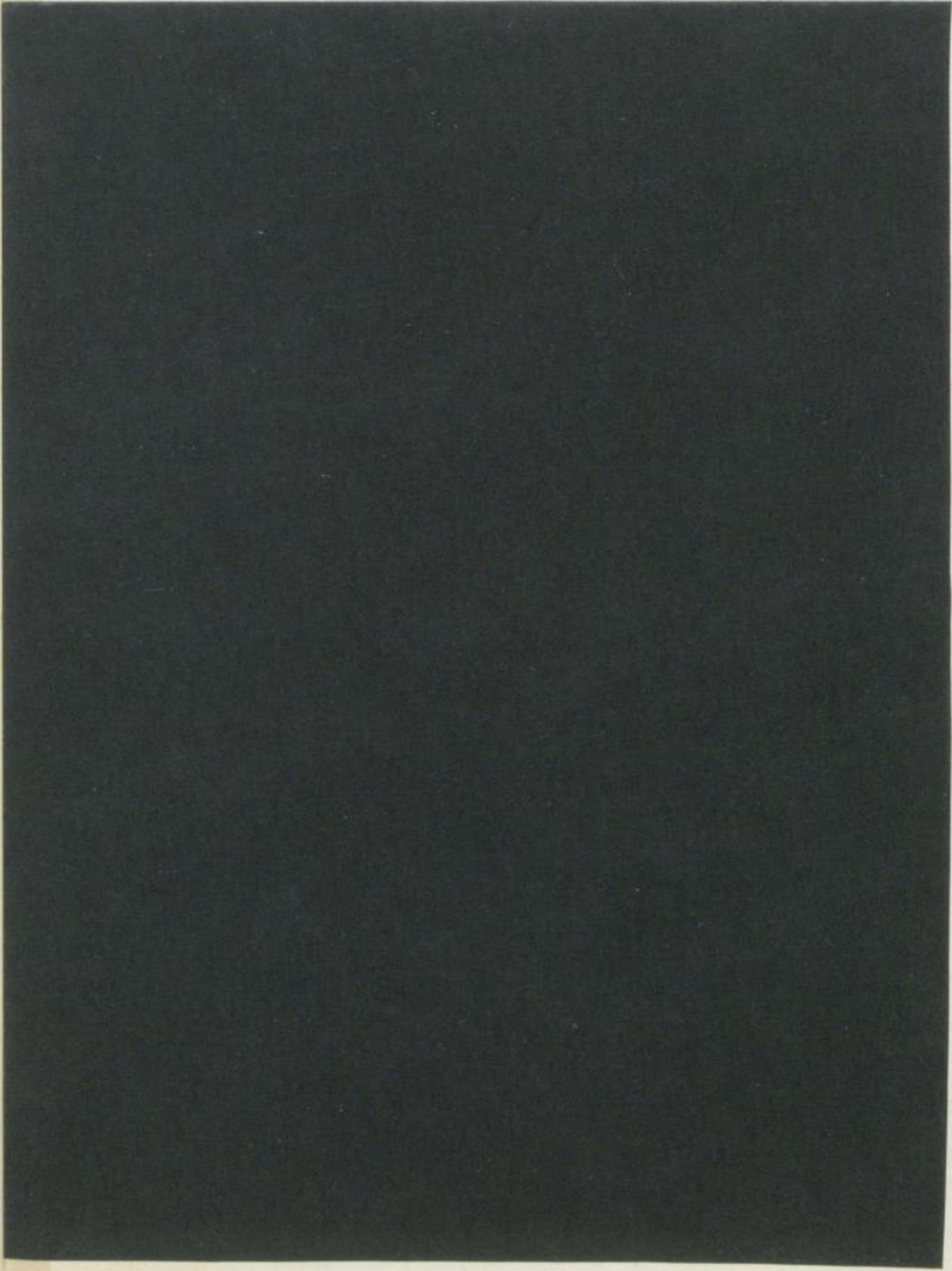
TU BERGAKADEMIE FREIBERG



XVI 1142 . C70 F

FREIBERGER FORSCHUNGSBLÄTTER

C 70



LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF FREIBERG

1875

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

C 70

GEOPHYSIK

Geophysikalische Erkundung im Sudan

Von
KLAUS SCHUSTER



A k a d e m i e - V e r l a g · B e r l i n

Freib. Forsch.-H.	C 70	S. 1—55	24 Bilder	13 Anlagen	Berlin, Mai 1959
-------------------	------	---------	-----------	------------	------------------

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben von Rektor der Bergakademie Freiberg

C 70

Diplomarbeit aus dem Institut für Angewandte Geophysik
der Bergakademie Freiberg

Direktor: Prof. Dr. O. MEISSER

Institutsveröffentlichung Nr. 67



XVI M42 f

C 70

„Freiberger Forschungshefte“, Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften. Herausgeber: Der Rektor der Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. H. Härtig. — Chefredakteur: Dipl.-Ing. R. Wender, Freiberg, Klubhaus der Bergakademie, Aug.-Bebel-Str. 5 (Fernr. 2497). — Verlag: Akademie-Verlag, GmbH, Berlin W 1, Leipziger Str. 3—4 (Fernr. 220441), Postscheckkonto 35021. — Die Freiberger Forschungshefte erscheinen in zwangloser Folge in den Reihen A, B, C und D. Ausführliches Verzeichnis aller lieferbaren Hefte von der Redaktion der Bergakademie oder dem Akademie-Verlag. — Preis dieses Heftes: 4,— DM. Bestell- und Verlags-Nr. 2062/259/C 70. — Vertrieb: Für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik durch den Buchhandel; für das Gebiet der Deutschen Bundesrepublik durch die Buchhandlung Kunst und Wissen, Inhaber Erich Bieber, Stuttgart S, Wilhelmstraße 4—6; für das gesamte Ausland über den Buchhandel bei der Deutschen Buch-Export und -Import GmbH, Leipzig C 1, Leninstraße 16.

Satz und Druck: Druckwerkstätten Stollberg VOB, Stollberg (Erzgeb.), August-Bebel-Str. 16 - VOB UNION - III/6/50 0,8 659 (241). — Veröffentlicht unter der Lizenz-Nr. 202·100/516/59 des Ministeriums für Kultur, HV Verlagswesen, der Deutschen Demokratischen Republik. — Karten: Mdi Nr. 46 52/K 11. — Printed in Germany. Alle Rechte vorbehalten.



VORWORT

Die vorliegende Diplomarbeit von K. Schuster enthält für geophysikalische Arbeiten im Sudan wertvolle Zusammenstellungen eigener Erfahrungen, Ergebnisse und Hinweise. Ich bin den zuständigen Regierungsstellen der DDR für die Genehmigung des auszugsweisen Druckes dieser Arbeit sehr verbunden. So kann auch weiteren interessierten Kreisen dieses Material nutzbar gemacht und ein Einblick in die praxisverbundene Ausbildung in angewandter Geophysik an der Bergakademie Freiberg vermittelt werden.

O. Meißer

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.

I N H A L T

1	Einleitung und Überblick	9
1.1	Vorbemerkung	9
1.2	Innere Probleme der Republik Sudan	9
1.3	Die wissenschaftlich-technische Hilfe der Deutschen Demokratischen Republik	11
1.31	Die beiden wasserwirtschaftlichen Delegationen	11
1.32	Notwendigkeit geophysikalischer Erkundungsarbeiten	12
2	Allgemeiner beschreibender Teil	14
2.1	Beschreibung des Erkundungsgebietes und seiner natürlichen Gegebenheiten	14
2.11	Geographische Lage und klimatischer Charakter	14
2.12	Geologisch-tektonischer Überblick	18
2.13	Hydrologische und wasserwirtschaftliche Voraussetzungen	19
2.2	Wissenschaftliche Untersuchungen und Arbeiten im Erkundungsgebiet vor Beginn der refraktionsseismischen Messungen	22
2.21	Befunde älterer Wasserprospektionen	22
2.22	Ergebnisse der ersten Wasserwirtschaftsdelegation	23
2.23	Tätigkeit der zweiten wasserwirtschaftlichen Arbeitsgruppe	24
2.24	Geophysikalische Vorgängerarbeiten im Kordofan	25
2.3	Vorbereitung und Durchführung der refraktionsseismischen Untersuchungen	28
2.31	Vorbereitung und Ausrüstung	28
2.32	Aufgabenstellung, Termine	30
2.33	Testmessungen, Ergebnisse und Folgerungen	31
2.34	Anlage und Ablauf der seismischen Feldarbeit	32
2.4	Auswertung und Ergebnisse der refraktionsseismischen Untersuchungen	35
2.41	Qualitative Auswertung, Vorläufiger Bericht	35
2.42	Vertiefte Auswertung und geologische Interpretation, Abschlußbericht	36
2.43	Hydrologische und wasserwirtschaftliche Folgerungen aus den seismischen Befunden	38
3	Spezieller Teil	40
3.1	Charakteristische Bedingungen der seismischen Feldarbeit	40
3.11	Profilanlage, Einmessen und Aufstellungen	40
3.12	Schießarbeit	41
3.13	Registrier- und Fototechnik	42
3.14	Energieverhältnisse	44
3.15	Seismische Bodenunruhe und andere Störungen	44

3.2 Probleme der Auswertung	45
3.21 Laufzeitbestimmung	45
3.22 Charakteristika der Laufzeitkurven, Seismische Geschwindigkeiten	46
3.23 Tiefenbestimmung der Deckgebirgshorizonte	47
3.24 Tiefenberechnung für das Grundgebirge	48
3.25 Vergleich der seismischen Horizonte mit Bohrprofilen	50
3.3 Technische und allgemeine Bemerkungen	50
3.31 Refraktionsapparatur	50
3.32 Kraftfahrzeuge	51
3.33 Organisation der seismischen Arbeit	51
4 Zusammenfassung	53
Literatur	54
Verzeichnis der Anlagen	55

Fast sechs Monate lang hat 1956/57 mit Regierungsauftrag der Deutschen Demokratischen Republik ein dreiköpfiger geophysikalischer Meßtrupp unter Leitung von Dr. H. Rische im Sudan gearbeitet. Er wurde in der trocken-heißen Hochfläche des Nordkordofan angesetzt, um mitzuhelfen, das dort äußerst dringliche und schwierige Problem der Wasserfindung zu lösen.

Vorliegende Arbeit gibt zusammenfassend Bericht über Tätigkeit und Befunde dieses Meßtrupps, behandelt daneben auch allgemeine Verhältnisse und Voraussetzungen soweit es nötig ist, den Hintergrund des Einsatzes zu zeichnen. Darüber hinaus wird auf Besonderheiten Wert gelegt, die aus tropischen und speziell lokalen Erkundungsbedingungen resultieren und teilweise gezwungen haben, routinemäßige Arbeitsprinzipien zu modifizieren. Im übrigen hat die Refraktionsseismik, die den Umständen entsprechend im Berichtsabschnitt als einziges geophysikalisches Aufschlußverfahren angewandt worden ist, sich dabei in ihren klassischen Zügen durchaus bewährt. Zu ihrer Methodik an sich kann daher ein neuer Beitrag hier nicht geliefert werden.

Ziel dieser Arbeit ist, einen Eindruck von interessanter geophysikalischer Tätigkeit mit ihren Nebenerscheinungen auf wenig bekanntem Terrain zu vermitteln, Anfangserfahrungen weiterzugeben und zum Versuch anzuregen, organisatorisch, ausrüstungs- und verfahrensmäßig verbesserte Mittel für derartige Erkundungen bereitzustellen.

Mit dem 1. 1. 1956 wurde der Sudan zur unabhängigen Republik erklärt und der Status eines anglo-ägyptischen Condominium endgültig aufgehoben. Damit ist dieses Land, das bisher, soweit geschichtliche Überlieferung zurückreicht, meist unter stärker oder schwächer lastender Herrschaft verschiedener Invasoren gestanden hat, erstmalig ganz auf eigene Füße gestellt. Die Entwicklung seiner Bevölkerung und Wirtschaft stand am Anfang des eigenstaatlichen Lebens noch auf entsprechend niedriger Stufe. Sie rasch und allseitig zu heben, stellt die junge Selbstregierung vor gewaltige Aufgaben, die energisch und mit bisher sehr beachtlichen Anfangserfolgen angepackt, aber durchaus noch nicht definitiv gelöst worden sind. Verständlicherweise mangelt es der Gesamtbevölkerung des sudanesischen Staatsgebildes, die amtlich auf 8,5 bis 9 Millionen geschätzt wird und sich aus einer Vielzahl verschiedener, teils isoliert lebender Stämme und Volksgruppen zusammensetzt, noch weitgehend an nationalem Gemeinschaftsempfinden. Zwar ist die mohammedanische Glaubensbrüderschaft ein gewisses einigendes Moment, umfaßt aber hauptsächlich nur das arabisch

Deutsches
Brennstoffinstitut
Freiberg/Sa.

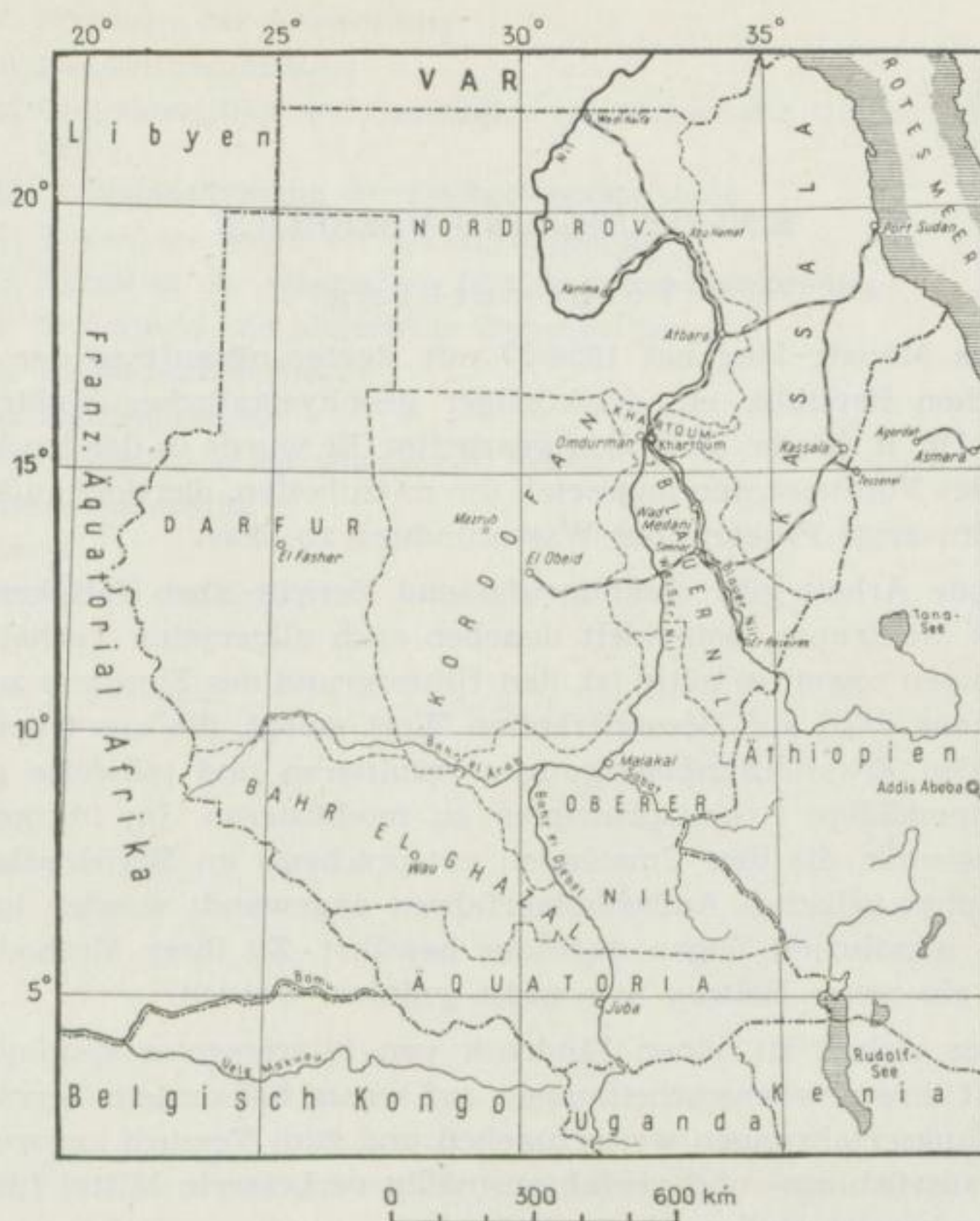


Bild 1. Übersichtskarte des Sudan
(aus HÜBNER [2, S. 171])

sprechende Mischvolk der nördlichen Landeshälfte und kann die zwischen diesem und den andersgläubigen Negern der Südprovinzen bestehenden Gegensätze nicht aufheben. Die Regierung muß über Anfangserfolge hinaus das Land restlos befrieden, universelles Vertrauen gewinnen, die Staatsräson durchsetzen, dazu nomadisierende Bevölkerungsteile fest ansiedeln und Bildungs- wie Gesundheitswesen aus noch primitivem Stadium herausführen. Sie muß die gesamte, zur Zeit ausschließlich auf landwirtschaftliche Produktion gestützte Wirtschaft auf moderner Grundlage organisieren und das bisher beträchtlich unter dem Wert der Einfuhren liegende Exportvolumen ausweiten. Zwar dürfte der Sudan auch in näherer Zukunft ein reines Agrarland bleiben, aber durch bedeutende Intensivierung landwirtschaftlicher Bodennutzung und der Viehzucht eine sichere staatliche Existenzbasis zu schaffen sein.

Das fest mit jeder einzelnen Teilaufgabe verkoppelte Kernproblem dieses Entwicklungsprojektes liegt im Wassermangel weiter Gebiete des Landes. Ab-

Deutscher
Brennstoffanstalt
Freiberg 1924

hilfe zu schaffen ist vordringlich und wirtschaftlich wie politisch von erstrangiger Bedeutung. Die Regierung tut dazu ihr Bestes und wendet beträchtliche Teile ihrer allerdings ausnehmend geringen Mittel daran. Hinzu kommt der Mangel an landeseigenen Experten, so daß der Sudan die Hilfe technisch und wissenschaftlich weiter entwickelter Nationen braucht.

Während das Wasser beider Nile in den Durchflußgebieten schon seit Jahrtausenden genutzt wird, ist in den ausgedehnten Trockenregionen, wie z. B. im Hochgebiet der Provinz Kordofan, bisher fast nichts für eine rationelle Wasserprospektion und -versorgung getan worden. Zu intensiver Bodenbewirtschaftung reichen dort die Niederschlagsmengen nicht aus. Die meist noch ständig nomadisierende Bevölkerung lebt hauptsächlich von ihren Viehherden. Um diese Menschen sesshaft zu machen, in einen organisierten Wirtschaftsprozess einzugliedern, die Viehzucht zu intensivieren und das Risiko der Schlachtviehtrift zu Verwertungs- und Exportplätzen zu senken, müssen zahlreiche Zentren der Trink- und Tränkwasserversorgung geschaffen werden. Noch stößt man bei den Nomaden wie bei den Sesshaften der wenigen Siedlungen häufig auf eine fast fatalistisch-resignative Ergebenheit in ihr vom Wassermangel beherrschtes und für unwandelbar gehaltenes Schicksal. Moderne Wissenschaft kann aber mit der Suche nach Wasservorräten im Untergrund der Hochfläche zunächst lokal erfolgreich und auch imstande sein, nach großzügiger regionaler Forschung schließlich ganz andere als die heutigen Ernährungsgrenzen für alle Lebewesen in diesen weiten Trockengebieten zu ziehen [3], [2], [5].

1.3 Die wissenschaftlich-technische Hilfe der Deutschen Demokratischen Republik

1.31 Die beiden wasserwirtschaftlichen Delegationen

1955 verstärkte die Sudanregierung ihr Bemühen um Wasserbeschaffung im Kordofan, suchte auswärtige Experten dafür zu gewinnen und richtete im Juli eine entsprechende Bitte an die Regierung der Deutschen Demokratischen Republik. Kurzfristig wurde eine deutsche Delegation aus Geologen, Wasserwirtschaftlern und einem Geophysiker zusammengestellt, die Anfang September ihre Arbeit im Sudan aufnahm. Zu Informationszwecken bereiste sie verschiedene Teile des Landes und konzentrierte sich dann auf hydrologische Erkundung des Khor bei Mazroub (ca. 130 km NW El Obeid, s. Bild 1), für das die Sudanregierung aus siedlungspolitischen Gründen besonderes Interesse zeigt. Zwei weitere Schwerpunkte des gleichen Wasserbeschaffungsprogramms lagen bei Sodiri und Hamra esh Sheikh, ca. 190 bzw. 290 km NW El Obeid.

Auf Grund dieser ersten mit einem günstigen Befund abgeschlossenen Untersuchungen wünschte die Sudanregierung, daß deutsche Fachleute die Arbeiten mit der technischen Erschließung der Wasservorkommen fortsetzen möchten.

Im Frühjahr 1956 wurde daher die zweite wasserwirtschaftliche Arbeitsgruppe der Deutschen Demokratischen Republik nach Mazroub entsandt, die stärker als die erste und ihrem Auftrag gemäß überwiegend aus ingenieur-, bohr- und montagetechnischem Personal zusammengesetzt war.

Die angestrengte Bohrtätigkeit dieser Delegation, lebhaft verfolgt und auf politischer Ebene von Gruppen diskutiert, die am Ergebnis der deutschen Bemühungen positiv oder negativ interessiert waren, brachte aber nicht den gewünschten Erfolg. Offensichtlich waren die wissenschaftlichen Vorarbeiten zur Klärung der Untergrundstruktur noch nicht weit genug geführt worden, und deshalb setzte man Ende 1956 einen geophysikalischen Meßtrupp zusammen mit einem Hydrogeologen bei Mazroub ein. Bald stand die Arbeit dieser Prospektorengruppe im Vordergrund, und das technische Personal wurde zurückgezogen bis auf einen Rest, der erforderlich blieb, um gegebenenfalls weitere Testbohrungen niederzubringen.

1.32 *Notwendigkeit geophysikalischer Erkundungsarbeiten*

Die Grundwassersuche im Kordofan ist mit einer langen Reihe ungelöster Fragen, die die Problematik des Basementkomplexes überhaupt ausmachen, verbunden. Zu umfassendem Erfolg kann sie dann erst geführt werden, wenn großzügige hydrogeologisch-geophysikalische Forschungstätigkeit ein regionales Bild vom Verlauf unterirdischer Wasserscheiden und von den Grundwasserströmen bzw. -becken der Hochebene hinsichtlich Richtung und Ausmaß geliefert hat. Es steht außer Zweifel, daß es der Hydrogeologie nur mit Hilfe ausgedehnter geophysikalischer Untersuchungen gelingen kann, Licht in die zur Zeit noch subterran verborgenen Verhältnisse zu bringen [3]. Für derartige Regionalvermessungen werden neben seismischen und geoelektrischen Aufschlußmethoden vorteilhaft die Gravimetrie und z. T. auch die Geomagnetik anwendbar sein.

Soweit Informationen eingeholt werden konnten, sind geophysikalische Mittel zu großräumiger Erkundung der Hochflächen im Basementkomplex von Kordofan und Darfour noch nie eingesetzt worden und scheint die geologische Bearbeitung dieser Gebiete jetzt nahezu zu stagnieren. Der Verzicht auf grundlegende Forschung zum Nutzen wasserwirtschaftlicher Großaktionen ist bedauerlich, aber auch begründet. Der Sudan verfügt über relativ wenig eigene wissenschaftliche Kräfte und nur über geringe finanzielle, bohrtechnische und vor allem geophysikalische Hilfsmittel. Notgedrungen hat er sie bisher im Übermaß lokal für äußerst dringliche Wasserprospektion eingesetzt, um nur örtliche Bedürfnisse im Sinne der primitiven, aber allerorts typischen und stets wiederholten Frage: „Gibts hier Wasser — gibts keines?“ zu befriedigen. Aber auch diese Praxis hat zur Überzeugung geführt, daß blind ange-setzte Bohrungen meist fehlschlagen und geophysikalische Unterstützung selbst lokaler Wassererkundungen im Basementbereich unentbehrlich ist. Es kommt darauf an, vor Beginn des Bohrbetriebes stets erst die Tiefenlage und Oberflächengestaltung des festen Grundgebirges, die Mächtigkeiten und stratigraphische Sonderausbildung der Deckschichten und die örtliche Tektonik zu klären. Welche geophysikalischen Methoden am besten für diese Zwecke geeignet sind, wird durch den Umstand entschieden, daß derart lokale Erkundungen sehr weitgehend Einzelheiten des in geringen Teufen anstehenden,

stark gegliederten Grundgebirgsreliefs und der auflagernden Schichten erfassen müssen, damit aber bereits in den Bereich der Baugrunduntersuchung übergreifen. Elektrische Tiefensondierungen bieten sich des geringen meßtechnischen Aufwandes wegen in erster Linie an. Sie sind vom Geologischen Dienst des Sudan ausschließlich und auch von der ersten deutschen Wasserwirtschaftsdelegation im Nordkordofan durchgeführt worden. In ihrer Anwendbarkeit, vor allem außerhalb der Regenperiode, sind sie jedoch recht beschränkt und nicht immer hinreichend klar zu deuten. Beste Erkundungsleistung ist gerade bei sehr komplizierter Untergrundstruktur von der Refraktionsseismik zu erwarten. Sie senkt die Zahl kostspieliger Fehlbohrungen auf ein Minimum und bleibt, wie ihr erster Einsatz bei Mazroub bestätigt, trotz hoher Eigenkosten doch in jedem Fall rentabel. Unter Umständen kann Komplexeinsatz von Geoelektrik und Seismik zweckmäßig sein.

Daß die Anwendung geophysikalischer Verfahren bei spezieller Wasserprospektion im Sudan gerechtfertigt ist und die Hydrogeologie nicht auf sie verzichten kann, wird von einheimischen wie von deutschen Fachwissenschaftlern, die mit sudanesischen Verhältnissen vertraut sind, nachdrücklich betont [2], [3], [6], [7].

2

ALLGEMEINER BESCHREIBENDER TEIL

2.1 Beschreibung des Erkundungsgebietes und seiner natürlichen Gegebenheiten

2.1.1 Geographische Lage und klimatischer Charakter

Als Erkundungsgebiet im weiteren Sinne wird im Folgenden ein etwa von 13° – 15° N und 28° – 30° E reichender Teil des Kordofan betrachtet (Bild 2). Das Meßgebiet selbst umfaßt nur ca. $1,2 \text{ km}^2$ innerhalb des Khor bei Mazroub. Sein Zentrum liegt ungefähr 650 m nordwestlich vom Markt Mazroub, dessen

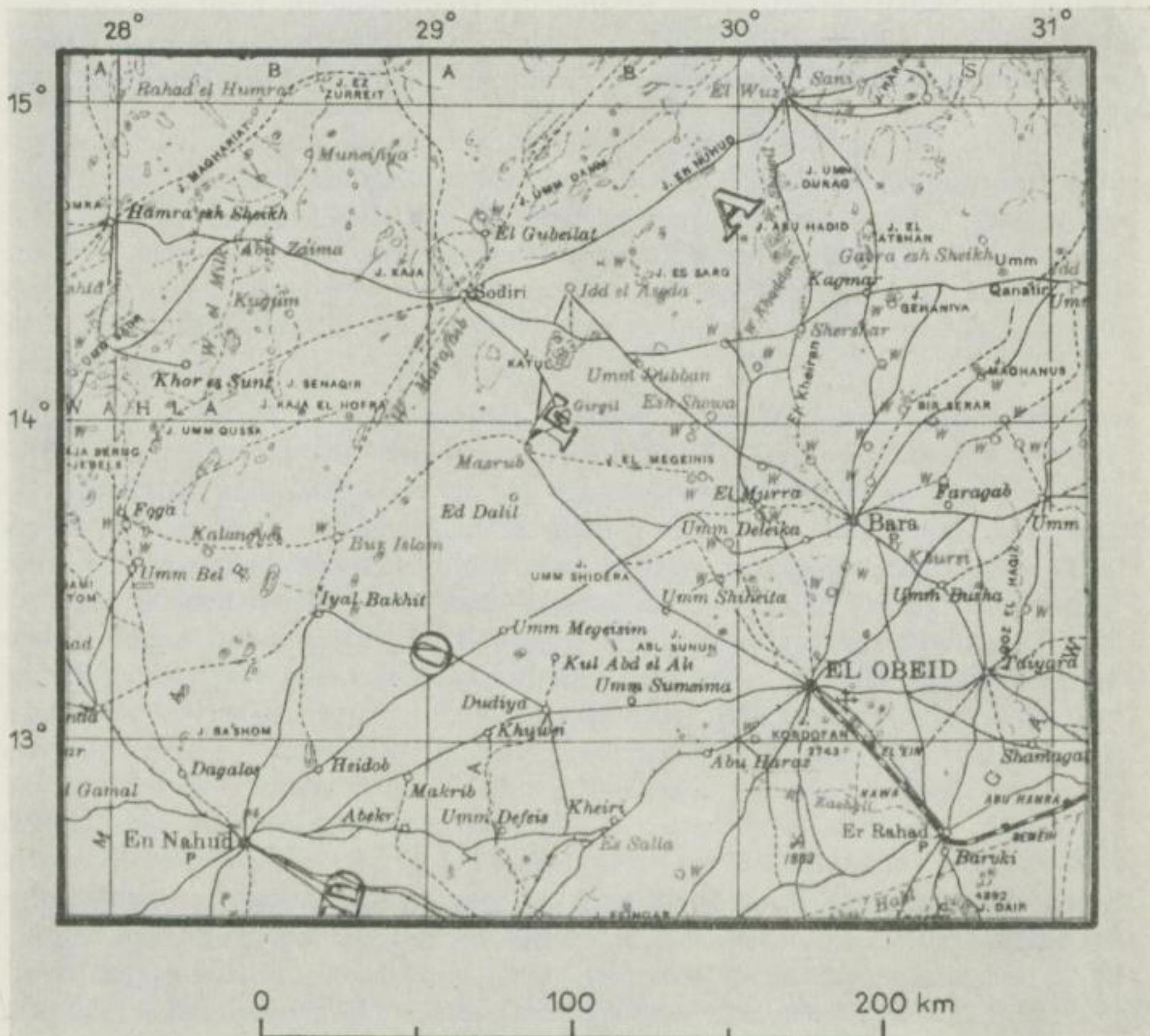


Bild 2. Übersichtskarte des Erkundungsgebietes
(Kartenausschnitt aus TOTHILL [4])

geographische Koordinaten mit $29^{\circ}20' E$, $13^{\circ}50' N$ und seine Höhe über NN (M. S. L. Alexandria) grob mit 600 m angegeben werden (Anlage 1).

Der Kordofan hat in seinem mittleren bis nördlichen Teil ebene oder flachgewellte Geländeform. Er wird von den roten qoz-Sanden mit stellenweise eingeschalteten, meist in Niederungen auftretenden Tonen bedeckt. Verstreut ziehen sich Trockentäler (sing. „Khor“) und Trockenbetten („Wadi“) durch die Ebene. Das paläozoische Grundgebirge durchstößt die Landschaftsoberfläche an



Bild 3. Inselbergkette bei Sodiri

vielen Stellen. Es bildet größere und kleinere Rücken oder ragt steil mehrere 100 m hoch aus dem Flachland auf in Gestalt der charakteristischen Inselberge, die sich häufig zu langgestreckten, tiefgestaffelten Gebirgsketten vereinen (Bild 3). Eine der größten ist die Inselberggruppe, an deren SE-Rand Sodiri liegt. Als mächtiger Komplex erhebt sich 40 km nördlich von Mazroub der



Bild 4. Teilansicht des Djebel Katul

Djebel Katul mehr als 1000 m über NN, im W vom kleineren Djebel Abu Asal benachbart (Bild 4).

Das Klima im ariden Nordteil des Kordofan — wie im Sudan allgemein — ist tropisch-kontinental. Die Niederschläge, die Hauptvoraussetzung für Bildung unterirdischer Wasservorräte sind, ergeben im Erkundungsgebiet eine durchschnittliche Jahressumme von 300 mm oder weniger bei einer über das Jahr extrem differierenden Verteilung. Eine ausgedehnte Trockenzeit von Oktober bis April bringt gar keinen Niederschlag. In der jährlich einmaligen Regenperiode von Juni bis September gehen dagegen mit Maximum im August meist stoßartig große Mengen nieder, im allgemeinen nachmittags oder abends und häufig mit Gewittersturm verbunden. Aber auch in diese Regenperiode schieben sich Reihen niederschlagsloser Tage ein. Die Temperaturmessungen der meteorologischen Station El Obeid ergeben abgerundet:

Jahresmittel	27° C
Tagesmittel April—Juni	30° C
Tagesmittel Januar	22° C
Tagesmaximum im Mai, durchschnittlich	39° C
Tagesmaximum im Mai, Höchstwert	46° C
Tagesminimum im Januar, durchschnittlich	12° C
Tagesminimum im Januar, Tiefstwert	−0,4° C

Dieselbe Station gibt für die relative Luftfeuchtigkeit an:

	08.00	14.00 MOZ
Jahresmittel	46 ‰	28 ‰
Maximales Monatsmittel (August)	79 ‰	52 ‰
Minimales Monatsmittel (März)	23 ‰	16 ‰

Von Oktober bis April herrschen stark abgetrocknete, böartig Stärken von 4 bis 6 Bf erreichende N- bis NNE-Winde vor. Im Juni bis September konvergieren heiß-trockene NNW- und sehr feuchte SW-Winde, wodurch sich starke Wetterfronten ausbilden.

Mit etwa dem 14. Breitengrad läuft durch das Erkundungsgebiet die Grenze zweier Vegetationsgürtel. Der nördliche Teil liegt im Akazien-Wüsten-Busch („Acacia Desert Scrub“), der südliche in der etwas niederschlagsreicheren Region des Akazien-Kurzgras-Busches („Acacia Short-grass Scrub“) (Bild 5). Wenn Mitte März die Dürre der Bodenbewachsung den höchsten Grad erreicht hat, entstehen tagelang anhaltende Steppenbrände, die Frontbreiten von vielen km erreichen und erst bei Windrichtungswechsel zusammenbrechen.

Siedlungsmäßig ist der Nordkordofan in eine Vielzahl von Stammesterritorien aufgeteilt, deren jeweilige Bewohner das Eindringen Fremdstämmiger meist ungerne dulden. Die dunkelhäutigen, arabischsprachigen Eingeborenen sind zu einem Teil viehzüchtende Nomaden. Zum anderen haben sie sich in weitverstreuten Siedlungen mit runden Strohütten sesshaft gemacht, halten Vieh, bauen etwas Körnerfrucht („dura“) oder Melonen an und gewinnen das Gummi arabicum der wildwachsenden Akazien.

Außerhalb El Obeid, das von der Sudan Airways angefliegen wird und Endstation der Eisenbahn ist, sind die Verkehrsverhältnisse im Kordofan primitiv.



Bild 5. Akazien-Kurzgras-Busch südwestlich von El Ga'a

Befestigte Straßen fehlen. Die Hauptverbindungswege sind lediglich Fahrspuren von Kraftfahrzeugen, teils tief in den gelockerten Sandboden eingewühlt (Bild 6), teils auf festgewalztem Tonuntergrund verhältnismäßig gut befahrbar. Im übrigen durchziehen viele Trampelspuren von Kamel- und Eselkarawanen das Land und sind für Kraftfahrten als Richtungsanhalt von Wert.

Der Ort Mazroub ist Sammelpunkt eines teilweise nomadisierenden Stammes, der Medjani. Er stellt eine lose Anhäufung von Einzelsiedlungen dar, die in 10 km Umkreis um den festen Markt („suq“) weit verstreut liegen.

Westlich von Mazroub streicht NE—SW ein flaches, durchschnittlich 4,5 km breites Khor. Im NE geht es ohne deutliche Begrenzung in die Senken von



Bild 6. Straße El Obeid—Sodiri; im Hintergrund Zeltlager Mazroub
(Photo: RISCHE)



Bild 7. Khor nordwestlich von Mazroub, im Hintergrund Djebel Katul

Girgil, Tini und andere über, wodurch der Eindruck eines einzigen, vom Fuße des Djebel Katul bis nach Mazroub durchlaufenden Trockentales entsteht (Bild 7) [4, Kap. IV, V], [3].

2.12

Geologisch-tektonischer Überblick

Das Gebirgsfundament des gesamten Sudan bildet die uralte Festlandmasse des Afrikanischen Schildes aus Ortho- und Paragesteinen mit plutonischen Intrusionen der assyntischen Orogenese. Schon zu Beginn des Kambriums ist das Gebirgsmassiv sehr weitgehend zu einer Festebene bis auf die heute noch sichtbaren Inselbergreste abgetragen worden. Besonders oberflächennahe liegt es in dem als „Basementkomplex“ bezeichneten Hauptteil der Hochflächen, der auch das Erkundungsgebiet einbezieht (Bild 8). Das Generalstreichen des kristallinen Grundgebirges im Kordofan ist NNE–SSW [4, Kap. VI]. An seinem Aufbau beteiligt sind hauptsächlich gefaltete und verworfene Gneise, Glimmerschiefer und Phyllite, mehr oder weniger mit eingefaltete Ultrabasite, Gabbronorite, Granodiorite und Granite, weiterhin nichtmetamorphe Grauwacken und Laven und ungefaltete jüngere Granite. Verschiedentlich sind in die Paragesteine auch Quarzite, metamorphe Kalksteine und Graphitschiefer eingelagert. Mengenmäßig treten die einzelnen Komponenten des Gesteinsbestandes in örtlich stark variierendem Maße auf. Im Meßgebiet sind bunte Granite vorherrschend, seltener werden basische Gesteine und daneben noch Marmor angetroffen.

Auf die allgemeine Triaslücke folgt jurassisch-kretazisch die Nubische Serie mit horizontalgeschichteten Sandsteinen, zwischengelagerten Schiefertonbänken, Tonen, Letten, Konglomeraten und in einzelnen Horizonten mit Eisenkongregationen bzw. -infiltrationen. Diese Serie ist über den gesamten Nord Sudan verbreitet und schiebt sich mit zwei Keilen nach S in den Basementkomplex hinein (Bild 8). Ob sie im Erkundungsgebiet häufiger, wenn auch lokal sehr be-

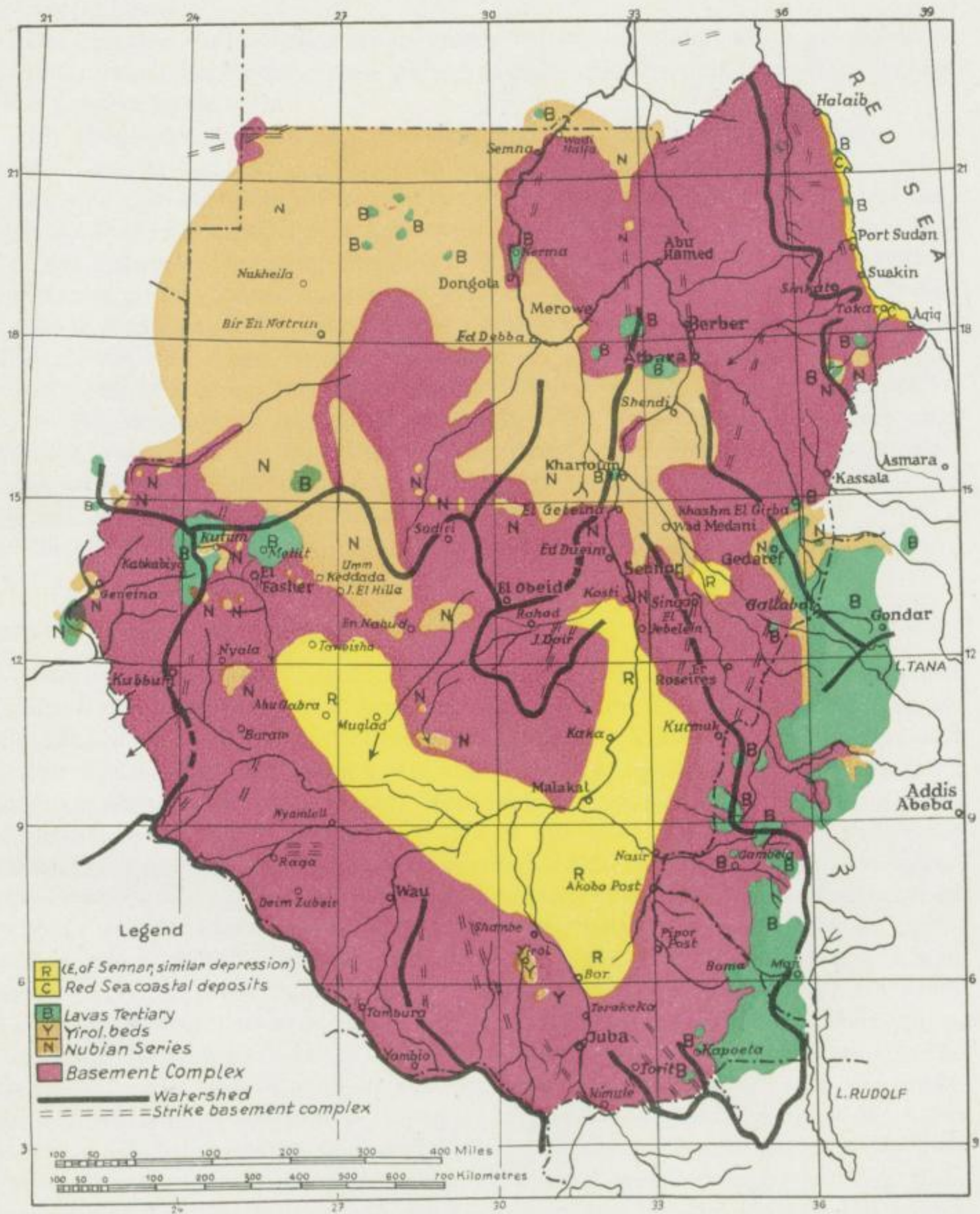


Bild 8. Der Basementkomplex im Sudan
(nach ANDREW, aus TOTHILL [4, Kap. VI])

schränkt unter jüngeren Schichten auftritt, kann noch nicht mit Sicherheit beantwortet werden.

Der tertiäre Vulkanismus ist in vielen Teilen des Sudan aktiv gewesen, im kordofanischen Basement treten seine Trachyt-, Basalt- und Phonolith-Ergüsse aber äußerst selten auf.

Im Pleistozän wurden auf der Grundgebirgshochfläche des Kordofan limnische Tone, örtlich auch Süßwasserkalke und in ariden Phasen die roten Dünen-sande der qoz-Formation („Kordofansand“) abgelagert. Alternierend mit den lückenhaft verbreiteten Tonen bedecken diese Quarzsande den weitaus größten Teil des gesamten Basementkomplexes. Oberflächlich sind sie teilweise ferritisch verkrustet und zu Dünen aufgeweht, die wohl auf Grund vorherrschender Nordwinde in N-S-Richtung angelegt und gegenwärtig durch Pflanzenwuchs befestigt sind. Sande und Tone werden hauptsächlich als Grundgebirgsderivate angesehen, sind möglicherweise zum Teil auch Umlagerungsprodukte der Nubischen Serie. An ihrer Basis liegen Massen groben Gebirgsschutttes. Außerdem sind Gerölle, vor allem in Bereichen größter Oberflächennähe des Grundgebirges, nicht selten den Sand-Ton-Mischungen zwischengelagert. Ihr Auftreten läßt auf geringe Basement-Teufe schließen.

Rezente Bildungen von qoz-Sanden sind oberflächlich wenig verfestigt [3], [4, Kap. VI], [5], [7].

2.13 *Hydrologische und wasserwirtschaftliche Voraussetzungen*

Die Hauptmenge der Niederschläge, die stoßartig während kurzer Regenzeit fallen, fließt oberirdisch in Khors und Wadis bis in Senken ab, deren Tonauskleidung das Versickern verhindert oder hemmt. Vorübergehend bilden sich örtlich flache Seen und Tümpel, die als Oberflächenspeicher für die Wasserversorgung der Bevölkerung in den Hochgebieten von größter Bedeutung sind. Zusätzlich hat man, in den letzten Jahren auf staatliche Initiative, zahlreiche künstliche Becken (sing. „hafir“) und vereinzelt Dämme angelegt, um das Regenwasser oberirdisch aufzufangen und zu sammeln (Bild 11). Die handgegrabenen Schöpf- und Schachtbrunnen der Eingeborenen (Bilder 9 und 10) stellen praktisch meist auch nur Zisternen dar und füllen sich auf gleichem Wege. Abgesehen davon, daß die Anlage dieser Oberflächenspeicher das Wasser stärksten Verunreinigungen aussetzt, gehen erhebliche Wassermengen durch die temperaturbedingte enorme Verdunstung in kurzer Zeit verloren. Schon Wochen oder wenige Monate nach der Regenzeit sind die oberirdischen Vorräte erschöpft. Eine durchhaltende, rationelle Versorgung mit Trink- und Tränkwasser kann sich nur auf unterirdische Wasserrücklagen stützen, auf jenen bescheidenen Teil der Gesamtniederschlagsmenge, der nach Abzug weiterer beträchtlicher Verluste durch Kapillarverdunstung des Bodens in den tieferen Untergrund eingesickert ist. Über den unterirdischen Abfluß, der durchaus nicht an die Richtung des oberirdischen gebunden sein muß, und über die subterranean Wasserspeicher ist aber vorläufig so gut wie nichts bekannt.

Für eine nennenswerte Wasserführung im Grundgebirge sind die Gesteinseigenschaften meist ungünstig. Wassersammler sind allenfalls Zersetzungszone



Bild 9. Schöpfbrunnen



Bild 10. Blick in einen Schachtbrunnen

und postorogen entstandene, meist nicht im Streichen liegende Verwerfungsspalten und -klüfte, soweit sie offen oder nur mit Lockermaterial gefüllt sind. Im allgemeinen gilt das unverwitterte Grundgebirge als undurchlässiger Leiter und Träger des in die Sedimentdecke eingedrungenen Regenwassers. Lage und Größe unterirdischer Speicher werden daher vornehmlich durch die Oberflächen-gestaltung des Grundgebirges bestimmt, die unter der Sedimentbedeckung vielfach dem aufgeschlossenen Relief der Inselberge ähneln kann, ohne sich an der Oberfläche abzuzeichnen. Mulden und Depressionsformen sind, sofern nicht durch Tonfüllung versetzt, besonders wasserhöffig und in begünstigender Weise gleichzeitig orographische Sammler für groben Gebirgsschutt. Der Annahme, daß im Basementkomplex außer dem Basisgerölle der Deckschichten auch die Verwitterungsrinde des Grundgebirges selbst Grundwassersammler sei (nach AUDEN und DLANEY, s. ROST [3]), wird entgegengestellt, daß diese in situ hochgradig vertont sei (nach MARHOUD AHMED ABDULLAH, s. ROST [3]).

Die Wasserführung, -aufnahme und -abgabe der Sedimente ist grundsätzlich von deren Tongehalt abhängig. Erhebliches Speichervermögen besitzt die Nubische Serie in ihren Sandsteinpartien, ist aber für das Erkundungsgebiet bedeutungslos. Die lückenhaft verbreiteten Tone stellen ausgesprochen gute Sohl- und Deckhorizonte für sandig-kiesige Wassersammler und Wasserleiter dar. Wichtigster Grundwasserzubringer der Hochflächen sind die qoz-Sand-Horizonte mit zuweilen weiträumigen Einzugsgebieten. Wo nicht tonige Lagen den Sickerweg blockieren, wird der Regenfall von weniger verfestigten Sandböden so rasch aufgesogen, daß sich oberflächliche Abzugslinien gar nicht erst ausbilden. Niederschlagswasser kann außerdem durch die geröllhaltigen Flankensedimente der Inselberge, durch Sandpartien in Böden und Rändern der Trockentäler und über sandige Lücken in Tonhorizonten die tieferen Stockwerke der qoz-Formation bzw. die Basementoberfläche erreichen. Die meisten Brunnen der Einhei-



Bild 11. Der Hafir von Mazroub im Dezember
(Photo: RISCHE)

mischen sind nicht bis in die Grundgebirgsmulden abgeteuft, sondern reichen nur in verschiedene, voneinander durch Tonlagen getrennte Tiefenhorizonte der qoz-Sande.

Regenwasser, das sich einige Zeit in Tonbecken an der Oberfläche hält, versalzt häufig. An verschiedenen Stellen erreicht auch das Grundwasser des sedimentbedeckten Basement eine so hohe Salinität, daß es für Trinkzwecke nicht mehr brauchbar ist.

Im Khor bei Mazroub, dessen Einzelsenken sich in der Regenzeit füllen, ohne daß ein durchgehender oberirdischer Abfluß zustandekommt, liegen ein größerer Hafir und etwa 200 willkürlich angelegte, unzulänglich befestigte Schacht- und Schöpfbrunnen. Von diesen ist die Mehrzahl bald nach Ausgang der Regenperiode erschöpft. Auch der Hafir speichert nur bis etwa Ende Oktober (Bild 11). So entsteht im Verlauf der Trockenzeit ein wachsend kritischer Zustand in der Wasserversorgungslage des Siedlungszentrums Mazroub [2], [3], [7].

2.2 Wissenschaftliche Untersuchungen und Arbeiten im Erkundungsgebiet vor Beginn der refraktionsseismischen Messungen

2.21 *Befunde älterer Wasserprospektionen*

Wie aus allerdings nur spärlichem Informationsmaterial entnommen werden kann, hat die Wassersuche der staatlichen Institutionen mit wissenschaftlichen und technischen Mitteln im nördlichen und mittleren Kordofan keinen nennenswerten Erfolg gebracht. Nach einer längeren Reihe von Fehlbohrungen wurde die Tätigkeit im Erkundungsgebiet nahezu eingestellt. Sie blieb nur noch auf einzelne Bezirke beschränkt, in denen durch lokales Auftreten der Nubischen bzw. Umm-Ruwaba-Serien günstigere Bedingungen erwartet und mehrere Bohrungen tatsächlich fündig wurden. Elektrische Tiefensondierungen waren seit 1940 in zunehmendem Maße zur Erkundung herangezogen worden und den meisten der Testbohrungen vorangegangen.

1943/44 sind im SW-Auslauf des Khor bei Mazroub drei Bohrungen niedergebracht worden, die das Grundgebirge in Teufen zwischen 37 und 50 m antrafen, ohne Wasser zu bringen. Man folgerte daraus und aus der unterschiedlichen Höhe des Grundwasserstandes, die in den Eingeborenenbrunnen beobachtet wurde, daß der unterirdische Wasserspeicher kompliziert gegliedert sein müsse.

Im Gebiet um Sodiri stießen 1937 bis 1952 verschiedene Brunnenbauten und Testbohrungen in 10 bis 80 m Teufe auf festes Grundgebirge und trafen Wasser in geringen Mengen an, das jedoch teilweise und besonders in der Verwitterungsrinde des Basement viel Salz enthält. Spätere Bohrungen blieben leer. Da festgestellt wurde, daß die Grundwasserstände erheblich variieren, schloß man auf einen irregulären Wasserkörper und eine hydrologische Situation, die mit der von Mazroub vergleichbar ist [6]. Die Ergebnisse elektrischer Tiefen-

sondierungen bei Sodiri begründeten 1954 einen Vorschlag, dort erneut Testbohrungen anzusetzen und gegebenenfalls die geophysikalischen Untersuchungen intensiver fortzuführen [6].

Einige Bohrungen im NW-Kordofan, darunter eine bei Hamra esh Sheikh, trafen das Basement bei 12 bis 33 m, aber kein Wasser an. Bei Bara wurden Grundgebirgsteufen über 130 m erkundet, die nach S zu auf 50 m und weniger abnehmen. An verschiedenen Orten, die 60 bis 80 km SW, S und SE von Mazroub liegen, erreichten zahlreiche Bohrungen das Basement in 38 bis 90 m Tiefe. Vereinzelt waren sie wasserhöflich, soweit sie die Ausläufer der Nubischen Serie erfaßten. Auch im Umkreis von En Nahud wurden mehrere geoelektrisch vorerkundete Bohrungen fündig. Basement und Grundwasserspiegel liegen in Teufen zwischen 30 und 140 m. Meist ist die Salinität dieses Wassers hoch, da sich zwischen den Nubischen Schichten und qoz-Sanden Kalkstein- und Salzhorizonte befinden.

Im ganzen gesehen war das Ergebnis unbefriedigend und führte zu der Überzeugung, daß grundsätzlich im erkundeten Teil des Basementkomplexes keine grundwasserführenden Bodenschichten existieren. Zu weiterer Forschung in diesem Gebiet bestand demzufolge wenig Anreiz. Man entschloß sich vielmehr, das Wasserversorgungsproblem durch Anlage von Oberflächenspeichern zu lösen [1], [2], [6].

2.22

Ergebnisse der ersten Wasserwirtschaftsdelegation

Die Delegation erkundete kurzfristig in ca. fünf Wochen hydrogeologisch das Khor westlich und südwestlich vom Markt Mazroub und die nördlich anschließende Senke von Girgil. Auf drei Profilen führte sie geoelektrische Tiefensondierungen durch und brachte, nach deren Ergebnissen zum Teil angesetzt, 11 Testbohrungen im Khor nieder. Eine der Bohrungen (später bezeichnet B 1/56, Anlage 1) stieß in 22 m Tiefe auf Wasser und wurde bis 36,4 m abgeteuft, ohne das feste Grundgebirge zu erreichen.

Festgestellt wurden ein stark „gefurchtes“ Grundgebirgsrelief, teilweise beachtlich wasserführende tonfreie Sande als Senkenausfüllungen und über den Basementerhebungen Tonschichten, die stellenweise so ausgedehnt sind, daß auf dem lebhaft gegliederten Basement gespanntes Wasser auftritt. Man fand bestätigt, daß die nahezu ebene Geländeform sich nicht in der Oberflächengestaltung des Grundgebirges wiederholt und mit einer grundsätzlichen Abweichung des tatsächlichen, d. h. unterirdischen Einzugsgebietes vom oberirdischen gerechnet werden muß. Die Depressionen des Grundgebirges wurden als lange Furchen betrachtet, die NNE–SSW streichend vom Djebel Katul bis Mazroub durchlaufen und dort einen größeren, zusammenhängenden Grundwasserkörper speisen. Mit dieser Annahme war ein so großes Einzugsgebiet gegeben, daß die Vorratsschätzung anhand der durchschnittlichen jährlichen Niederschlags Höhen trotz bewußt hoch angesetzter Verdunstungsverluste (99 %) eine erhebliche Wassermenge im unterirdischen Speicher bei Mazroub ergab, zu deren Förderung der Einsatz technischer Mittel gerechtfertigt schien.

Man folgerte weiter, daß ähnliche hydrologische Möglichkeiten in weiten Gebieten des Basementkomplexes selbst unter extrem ungünstigen Klima- und Untergrundbedingungen nachweisbar sind, daß dazu allerdings systematische und sorgfältige Voruntersuchung mit hydrogeologischen und geophysikalischen Methoden in jedem Falle unerlässlich ist [2], [7].

2.23 Tätigkeit der zweiten wasserwirtschaftlichen Arbeitsgruppe

Diese Gruppe sollte zunächst durch Testbohrungen im Khor bei Mazroub den nach Auffassung der ersten Delegation existierenden Grundwasserkörper lokalisieren und an günstigsten Punkten so viele Brunnen anlegen, bis die Gesamtförderung zur Versorgung eines zentralen Wasserhofes ausreichen würde. Hydrogeologische und geophysikalische Methoden wurden zur Lösung dieser Aufgabe nicht herangezogen, entsprechende Fachkräfte und Ausrüstungen standen der Gruppe auch nicht zur Verfügung.

Im April 1956 begann der Bohrbetrieb. Eingesetzt wurden zwei Testgeräte und ein schwerer Bohrsatz HB 1300 (60 bzw. 80 m Teufenkapazität, 150 bzw. 400 mm anfänglicher Rohrdurchmesser). Bis Ende 1956 sind 18 Bohrungen mit insgesamt 560 laufenden Bohrm Metern niedergebracht worden, annähernd längs zweier quer durchs Khor E–W laufender Linien. Die südliche Bohrlinie, identisch mit dem später angelegten seismischen Profil I, führt unmittelbar nördlich am Bereich der Eingeborenenbrunnen vorbei, die andere liegt ca. 700 m weiter N (Anlage 1).

Die wasserhöffige Bohrung der ersten Delegation wurde zum behelfsmäßigen Brunnen B 1/56 mit Dieselpumpe ausgebaut und täglich Wasser nach Befriedigung des Eigenbedarfs in relativ beträchtlicher Menge an die Eingeborenen ausgegeben (Bild 12). Bei 6stündiger Pumpdauer leistete der Brunnen bis 7 m^3



Bild 12. Wasserausgabe an B 1/56

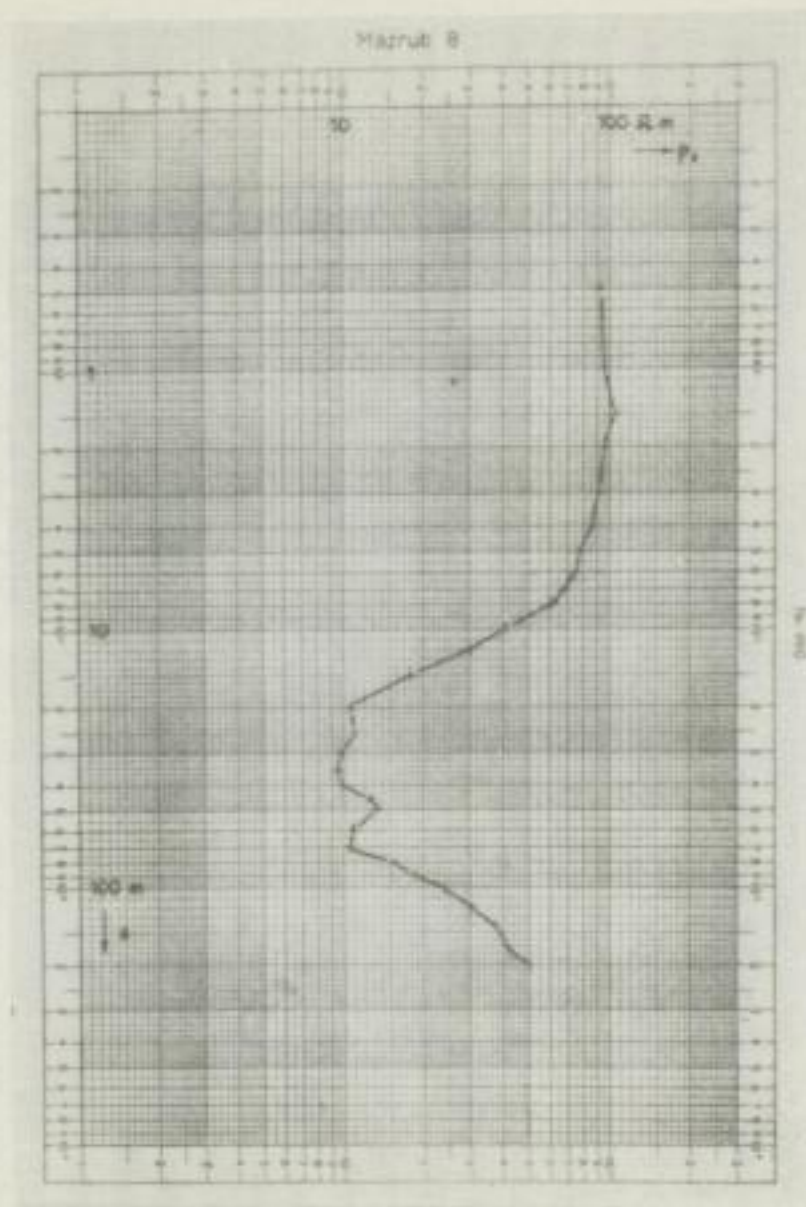
tächlich, hielt in der Trockenzeit durch und versorgte, als nahezu alle Eingeborenenbrunnen erschöpft waren, praktisch die mehrtausendköpfige Bevölkerung. Ende Januar 1957 senkte sich sein Spiegel um 5 m. Um Überbeanspruchung bis zur nächsten Regenperiode zu vermeiden, wurde die Tagesentnahme auf 4 m³ reduziert.

Fündig wurde noch B 7/56, 550 m westlich von B 1/56 (Anlage 1). Sie stieß in 55 m Teufe auf Grundwasser und erreichte das Basement bei 57 m. Das Wasser war jedoch wegen hohen Salzgehaltes unbrauchbar. Von weiterem Bohren westlich B 7/56 wurde daher abgesehen.

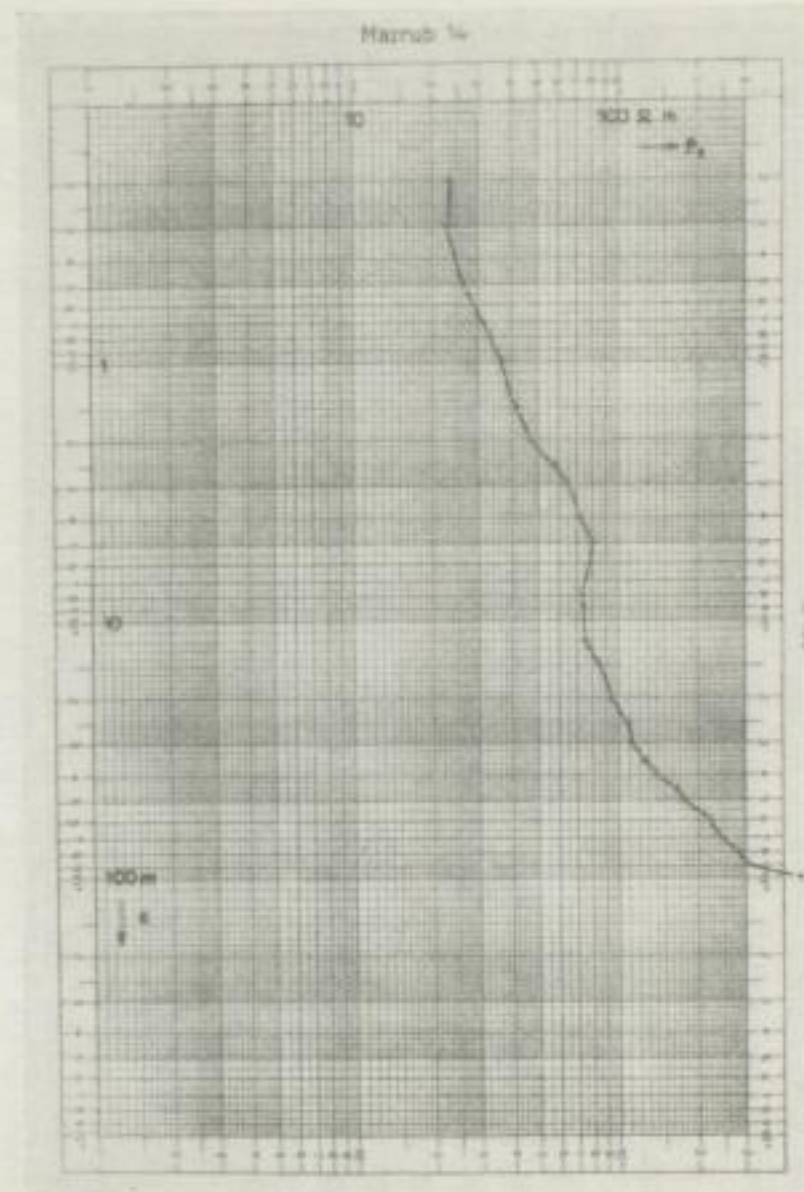
Die übrigen Bohrungen brachten kein Wasser. Das feste Grundgebirge wurde fast stets erreicht, jedenfalls nach Angaben der Bohrmeister, die möglicherweise auch grobes Geröll zuweilen als „Fels“ angesprochen haben. Die Bohrtätigkeit wurde eingestellt, bis die exakte Weitererkundung der nachgeführten hydrogeologisch-geophysikalischen Prospektorengruppe günstigere Bohransatzpunkte lieferte [7].

2.24 Geophysikalische Vorgängerarbeiten im Kordofan

Geophysikalische Vorarbeiten mit besonderem Wert für die Planung des seismischen Einsatzes im Kordofan sind geoelektrische Untersuchungen, die Dipl.-Geophysiker Ch. KNOTHE (Bergakademie Freiberg) von der ersten Wasserwirtschaftsdelegation im Herbst 1955 bei Mazroub angestellt hat. Auf zwei Profilen quer durchs Khor und einem dritten in der Senke von Girgil hat er insgesamt 22 Tiefensondierungen vorgenommen. Ausgerüstet war er mit einem Siemens-Erdungsmesser und einem Gleichstromkompensator, außerdem standen Geräte des sudanesischen Geologischen Dienstes zur Verfügung. So konnte wahlweise mit 75-Hz-Wechsel- oder kommutiertem Gleichstrom gearbeitet werden. Als Elektrodenkonfiguration wurde die Wennersche Anordnung gewählt und mit 200 m maximalem Sondenabstand gearbeitet. Hohe Übergangswiderstände ließen sich durch entsprechend tiefes Einschlagen der Stahlspieße auf 500 Ω herabsetzen. Die Sondierungsergebnisse wurden als Kurven dargestellt und nach Hummel ausgewertet. Darnach ergibt sich mehr oder weniger gut ausgeprägt für sämtliche Messungen der 3-Schichten-Fall $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, und zwar $\rho_1 \sim 60 - 200 \Omega \text{ m}$, $\rho_2 \sim 6 - 30 \Omega \text{ m}$, $\rho_3 \sim 250 - 800 \Omega \text{ m}$. Die Deutung dieser Schichten stützte sich auf bekannte Grundzüge der örtlichen Geologie und wird durch Testbohrungen verifiziert. Die dritte Schicht mit hohem spezifischen Widerstand entspricht dem wasserfreien festen Grundgebirge, die erste trockenen Sanden mit erheblichen Toneinlagen und die zweite mit größter spezifischer Leitfähigkeit vorwiegend sandigen und feuchteren Sedimenten des Deckgebirges. Noch im Ausgang der Regenzeit durchgeführte Sondierungen bringen die deutlichsten Indikationen. Die Teufenberechnungen stimmen mit den Ergebnissen vergleichbarer Testbohrungen gut überein. Dagegen liefern spätere Messungen verwaschene, schwer deutbare Kurven (Bild 13a, b). Grundgebirgsteufen werden daraus viel zu gering berechnet und lassen sich mit den Bohrbefunden nicht korrelieren. Offensichtlich muß zur Erklärung dieser Erscheinung die zuneh-



a) während der Regenzeit gemessen



b) nach der Regenzeit gemessen

Bilder 13a und 13b. Typische Sondierungskurven
(aus KNOTHE [8])

mende Austrocknung und daher stark wachsender spezifischer Widerstand der obersten Bodenschicht herangezogen werden. Geoelektrische Widerstandsverfahren scheinen demnach im Kordofan vorteilhaft nur anwendbar zu sein, solange der Boden noch hinreichend durchfeuchtet ist. Im Verlauf der Trockenzeit werden sie unbrauchbar.

Über eigene geophysikalische Arbeit des sudanesischen Geologischen Dienstes kann zuverlässig nur fragmentarisch berichtet werden, da die Informationsmöglichkeit auf wenig Literatur ([1], [6]) und einige mündliche Auskünfte beschränkt ist.

Seit 1940 hat G. Y. Karkanis, später unterstützt von Miss F. M. Delany, vornehmlich bei Wassersuchen in vielen Gebieten des Sudan geoelektrische Widerstandsmessungen zur Vorerkundung günstiger Bohrpunkte benutzt. Als Geophysiker wurde im Sudan 1951 L. Z. Makowiecki, dazu ab 1953 D. G. Gear angestellt. Als Hauptverfahren haben sie sich der elektrischen Tiefensondierung bedient und sie in der Regel stets erst zur Erkundung herangezogen, ehe in Gebieten mit zweifelhaften Erfolgsaussichten Wasserbohrungen angesetzt wurden.

Dem Basementkomplex des Kordofan hat man, von kleineren begünstigten Bezirken abgesehen, nach anfänglichen Fehlschlägen anscheinend wenig Interesse zugewandt und dort auch geophysikalisch seit 1954 keine Arbeit mehr geleistet. Im Bereich von En Nahud wurde mit einer größeren Zahl von Tiefensondierungen Wasser erschlossen. Bei Umm Kereidim, ebenso mit zwei Sondierungen in Bara, wurde mit einer maximalen Eindringtiefe von 130 m das feste Grundgebirge nicht, dagegen hart südlich von Bara in 90 m Teufe wieder erreicht. In den Monaten März/April 1951, also im Maximum der Trockenperiode, hat Makowiecki nördlich von El Obeid und im Mumu-Gebiet (südlich von En Nahud) Tiefensondierungen zur Wasserfindung durchgeführt. Er bekam überall undeutbare Indikationen, die nur ungefähre Rückschlüsse auf die Basement-tiefenlage und Zusammensetzung des Deckgebirges zulassen. Als Ursache führt er den extrem hohen Widerstand der obersten Bodenschichten und horizontale Änderungen im spezifischen Leitvermögen des tieferen Untergrundes an. Mai 1952 erfaßte er bei Sodiri das Basement mit Widerstandsmessungen in 80 m Teufe. Tiefensondierungen, die Gear im September 1953 an fünf Punkten N von Sodiri durchführte, ergaben den typischen 3-Schichten-Fall $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$. Für das Deckgebirge mit spezifischem Widerstand 18–49 Ω m errechnete er Mächtigkeiten von 36–67 m. Über geophysikalische Messungen des sudanesischen Geologischen Dienstes im Raum Mazroub ist nichts zu erfahren.

Mit meist besserem praktischen Erfolg sind geoelektrische Widerstandsmessungen für die Wasserprospektion in anderen Provinzen des Sudan vorgenommen worden. So in Darfour, Blue Nile, Northern, Equatoria, besonders in Kassala und bei Wadi Halfa.

In bezug auf die Anwendung anderer geophysikalischer Aufschlußverfahren im Sudan bis 1956 ist fast nichts bekannt. Vor allem im Kordofan scheinen sie bisher noch nie angewandt worden zu sein. Als ausgeprägte Schwerestörung

Deutsches
Brennstoffinstitut
Freiberg/Sa.

hat Makowiecki 1951/1953 in der Küstenebene von Port Sudan und im Gash-Delta (nördlich von Kassala) eine starke Verwerfung durch Gravimetermessungen festgestellt, die mit vorangegangenen elektrischen Tiefensondierungen und Testbohrungen gut übereinstimmen. Im Zusammenhang damit schlägt er seismische Methoden zur Erkundung der Einzelheiten dieser Struktur vor [1b].

Ganz am Rande sei noch erwähnt, daß der Geologische Dienst des Sudan 1951 ein Worden-Gravimeter erworben, 1952 die Durchführung geomagnetischer Messungen erwogen und 1951/52 durch Makowiecki auf den Flugplätzen Kassala, Gedaref, Geneina, El Fasher und El Obeid an die Pendelbasis Khartoum angeschlossene Schwerestationen eingerichtet hat [8], [2], [1a, b], [6].

2.3 Vorbereitung und Durchführung der refraktionsseismischen Untersuchungen

2.31 Vorbereitung und Ausrüstung

Im August 1956 übernahm Dr. H. Rische (damals Bergakademie Freiberg) den Auftrag, möglichst kurzfristig einen geophysikalischen Meßtrupp aufzustellen und in Zusammenarbeit mit einem Hydrogeologen (Dipl.-Geol. H. Durhack, Staatliche Geologische Kommission) etwa sechs Monate lang Wassererkundungen im Kordofan durchzuführen.

Die Anwendbarkeit geophysikalischer Methoden im Kordofan beurteilte er vor allem nach den erwähnten Befunden von Knothe. Er beschloß, die spezielle Erkundung refraktionsseismisch durchzuführen, gegebenenfalls auch mit elektrischen Widerstandsverfahren und stellte seinen Trupp dementsprechend zusammen.

Personell mußte er ihn möglichst klein halten und entschied sich für zwei Mitarbeiter: einen Schießmeister (H. Briese, VEB Geophysik, Leipzig) und einen Registrierer, zugleich Reparaturmechaniker und geophysikalische Hilfskraft (Autor, damals Bergakademie Freiberg). Im übrigen mußte der Trupp mit eingeborenen Hilfskräften aufgefüllt werden.

Die geoelektrische Ausrüstung bestand aus einem Rentsch-Erdungsmesser, einem Siemens-Erdungsmesser und einem sowjetischen Gleichstromkompensator KPA mit Zubehör.

Für die Seismik lieferte VEB Geräte- und Reglerwerk Teltow, Werk II (Geogerätewerk Brieselang), die sechsspurige Refraktionsapparatur und Zubehör. Mit Rücksicht auf besondere Erfordernisse des geplanten Einsatzes war sie noch in einigen Teilen abzuändern. Für Festkondensatoren wurden tropenfeste Typen eingesetzt. Die Zahl der Kanäle ließ sich auf acht erhöhen. Da kurze Linien zu schießen beabsichtigt war, wurden die Elemente für drahtlose Kommando- und Abrißübertragung überflüssig und durch galvanische Schaltungen ersetzt. Mit erhöhtem Materialverschleiß und erschwelter Ersatzbeschaffung mußte gerechnet und deshalb die Ausstattung um Reserven an betriebswichtigen Elementen, wie Geophonen, Verstärkern, Oszillographenschleifen, Um-

Deutscher
 Zentralbibliothek
 Freiberg
 2/2/57

formern, Kabel, Röhren und Kleinbauteilen, erweitert werden. Nach Fertigstellung wurde noch in der Heimat die Apparatur Ende Oktober annähernd unter den für den Kordofan erwarteten Einsatzbedingungen eingeschossen. Daß danach noch einige Wünsche an die Eigenschaften der Apparatur offen blieben, mußte in Kauf genommen werden, da die Zeit zur Ausreise drängte und die Arbeitsaufnahme im Sudan allein mit geoelektrischer Ausrüstung schon im Hinblick auf die mittlerweile fortgeschrittene Trockenzeit nicht sinnvoll gewesen wäre.

An Fahrzeugen benötigte der Trupp einen Meßwagen und einen PKW für Geländeerkundung und Sprengstofftransport. Da damals kein Fahrzeug mit Spezialaufbau verfügbar war, wurden ihm ein bereits bei der Arbeitsgruppe in Mazroub eingesetzter offener LKW „Granit“ und ein Jeep „Landrover“ zugewiesen. Dort konnte er auch Großgerät, ein Ladeaggregat und Camp-Einrichtung übernehmen.

Die Komplettierung der seismischen Ausrüstung erforderte mehrere Wochen und ließ Zeit, den Einsatz auch anderweitig in der Heimat gewissenhaft vorzubereiten, beispielsweise zu Versuchen, unter tropischen Temperaturbedingungen mit handelsüblichem Film- und fotochemischem Material zu arbeiten. Günstigste Ergebnisse lieferte der Agfa-Repro-Entwickler, der noch bis 35° Lösungstemperatur etwa normal arbeitet. Für höhere Temperaturen zeigte er sich brauchbar, wenn die Standardkonzentration reduziert wird auf das 0,5- bis 0,25fache. Für das Fixierbad machte sich ein Härtezusatz erforderlich.

Anfang November 1956 konnte der Hauptteil der Ausrüstung ausgeflogen werden und der Autor, zunächst allein, nachreisen. Bis Anfang Dezember die übrigen Mitglieder der Prospektorengruppe im Meßgebiet eintrafen, mußten

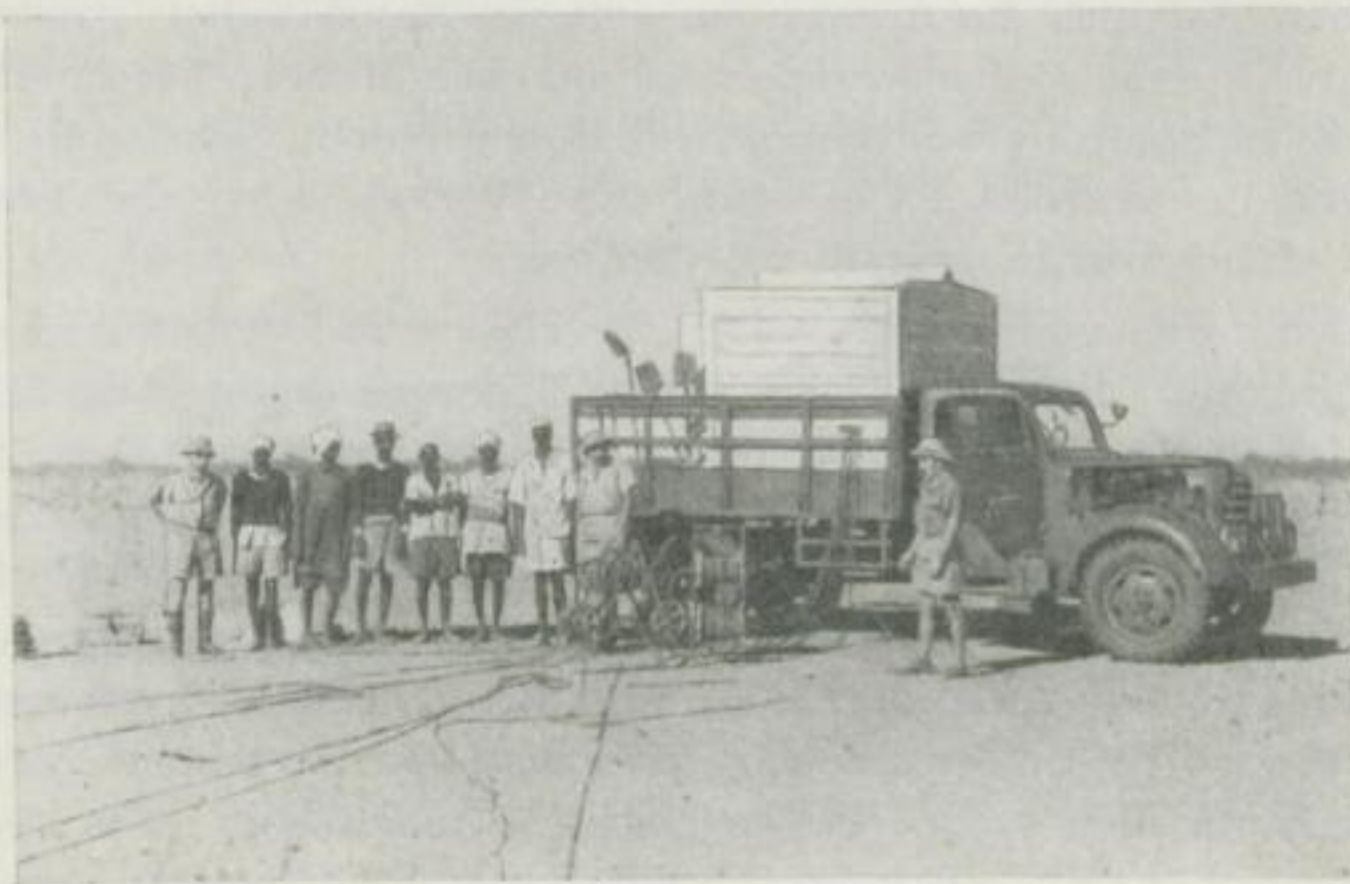


Bild 14. Kabinenfahrzeug und Personal des seismischen Trupps
(Photo: RISCHE)

sehr schwere Schäden behoben werden, die während des Transports vor allem an Registrieroptik, Oszillographenschleifen, Filmtransportmechanik, Zeitmarkengeber, Verstärkern und Umformern entstanden waren. Mangels verschiedener Originalersatzteile ließ sich die Feldbrauchbarkeit teilweise nur durch improvisierende Mittel wiederherstellen.

Neben dem Regierungsrasthaus an der Straße El Obeid – Sodiri, 2 km südlich vom Markt Mazroub, wurde ein Camp als Einsatzbasis eingerichtet und der Sprengstoff in einer mit Zement ausgegossenen tiefen Sandgrube eingebunkert. Der offene LKW erhielt auf dem Vorderteil der Ladefläche einen behelfsmäßigen hölzernen Kabinenaufbau (Bild 14) mit fest installierter Apparatur und einer abgetrennten, durch Ventilator über Lichtschleuse belüfteten Dunkelzelle. Die hintere Ladefläche blieb frei für Kabel, Großgerät und Personentransport.

Nach Auswahl eingeborener Hilfskräfte, Organisation des Sprengstoffnachschubes, Orientierung im Meßgebiet, Einmessen der ersten seismischen Profile und Probeschießen waren die Erkundungsvorbereitungen am 10. 12. 1956 abgeschlossen und der Trupp einsatzbereit.

2.32

Aufgabenstellung, Termine

Zuerst war festzustellen, ob die Refraktionsseismik in der Lage ist, die Untergrundstruktur mit erforderlicher Klarheit zu erkunden. Vor allem mußte nachgewiesen werden, daß die zur Erfassung der Grundgebirgsoberfläche notwendige Eindringtiefe erreicht wird. Dazu waren Testmessungen anzusetzen und ihre Ergebnisse mit Vertikalprofilen bereits geteufter Bohrungen zu vergleichen. Gleichzeitig sollten die Testmessungen entscheiden, ob es möglich und zweckmäßig sei, die seismischen Untersuchungen durch geoelektrische Verfahren zu überlagern bzw. teilweise zu ersetzen. Im Falle positiv verlaufener Testmessungen war bis Mitte Dezember ein Teil des Meßgebietes soweit seismisch zu erkunden, daß sich die Aussichten weiterer Bohrtätigkeit generell beurteilen und eventuell neue Bohransatzpunkte angeben ließen. Dieser Termin mußte über die Zurückhaltung von deutschem Bohrapersonal entscheiden, konnte aber nicht eingehalten werden, da er schon zwei Wochen, bevor der Trupp vollzählig und arbeitsfähig wurde, gestellt worden war.

Das 'Land Use und Rural Water Development Department' der Republik Sudan wünschte, die geophysikalischen Untersuchungen ungefähr auf jenes enge Gebiet in der Nähe des Brunnenfeldes Mazroub zu beschränken, das bis dahin durch die Bohrungen der zweiten deutschen Wasserwirtschaftsgruppe erfolglos abgetastet worden war. Es erwartete bis Januar 1957 Vorlage eines Ergebnisberichtes, der über die hydrologischen Voraussetzungen des Wasserprojektes Mazroub entscheidet. Von deutscher Seite wurde ein seismischer Erkundungsfortschritt angestrebt, der günstigenfalls das Abteufen fündiger Bohrungen noch vor dem sudanesischen Termin ermöglichte.

Im übrigen sah der allgemeine Dienstauftrag vor, daß die seismischen Profile bezüglich ihrer Lage und Länge nach Übereinkunft mit dem Hydrogeologen festgelegt wurden [9].

2.33

Testmessungen. Ergebnisse und Folgerungen

Für die Testmessungen war Profil I am günstigsten, weil es sieben geteufte Bohrungen berührt, die sich zum Vergleich mit dem seismischen Befund heranziehen lassen (Anlage 1). Am westlichen Profilende beginnend wurden Mitte Dezember 450 m mit Aufstellungen zwischen SP 1 und SP 6, 10 m seismischem Abstand und 20 Schuß vermessen. Nach Zwischenauswertung ist anschließend das restliche Profil abgeschossen worden (Anlage 8). Es ergab sich:

1. Die elastische Energie nimmt mit der Entfernung rasch ab. Oberflächensprengungen mit 1,5 kg maximaler Ladung genügen jedoch, um mindestens bis 170 m Schußpunktentfernung noch erkennbare erste Einsätze zu erhalten. Das sichert eine Eindringtiefe, die größer als die zu erwartende maximale Teufenlage des Grundgebirges ist und daher erlaubt, dessen Oberflächengestaltung voll zu erfassen.
2. Es liegt grundsätzlich ein Mehrschichtenfall vor. Meist ergeben sich fünf, im Höchstfall sechs refraktierende Horizonte. Der unterste ist mit $v \sim 5500 \text{ m s}^{-1}$ durch einen deutlichen Geschwindigkeitssprung von den übrigen getrennt. In bezug auf die Geschwindigkeit sind die Grenzen zwischen den oberen Horizonten weniger gut ausgeprägt.
3. Alle Horizonte variieren längs des Profils mehr oder weniger beträchtlich bezüglich Teufe und horizontaler Ausdehnung.
4. Der praktisch lückenlos erfaßte tiefste Horizont wird seiner Geschwindigkeit und Tiefenlage nach als Oberfläche des unverwitterten Grundgebirges angesprochen. Durch die vorhandenen Bohrungen wird das voll bestätigt. Die Übereinstimmung seismischer Tiefenberechnungen, die nur näherungsweise durchgeführt werden konnten, mit vergleichbaren Bohrbefunden befriedigt. Die Abweichungen sind im Mittel $< 10\%$, unter Ausschluß zweifelhafter Bohrangaben noch geringer.
5. Die oberen Horizonte treten teilweise absätzig auf. Sie sind sedimentären Schichten bzw. Einlagerungen des Deckgebirges zuzuordnen und nicht in allen Fällen mit den Bohrbefunden korrelierbar. Auf Grund der ersten Testmessungen allein lassen sie sich genauer nicht interpretieren.

Es wurde gefolgert:

1. Die Refraktionsseismik ist für den Einsatz im Erkundungsgebiet geeignet. Sie muß als sicherste geophysikalische Methode zur Untersuchung dieses kompliziert gebauten Untergrundes beurteilt werden. Mit geoelektrischen Tiefensondierungen können annähernd gleichwertige Ergebnisse nicht erzielt werden, weil das Basement im Verhältnis zur erforderlichen Eindringtiefe zu lebhaft kupiert ist, die petrographische Ausbildung des Deckgebirges auch in der Horizontalen häufig wechselt und außerdem extrem hoher spezifischer Widerstand der ausgetrockneten oberen Bodenschichten die Indikationen zu stark überprägt. Auf Widerstandsmessungen kann im Meßgebiet verzichtet werden.
2. Damit die hydrologisch sehr interessierenden Details des Basementreliefs nicht verwischt und größere Einlagerungen im Deckgebirge erkannt wer-

den, ist eine dichte Meßpunktbesetzung der Profile erforderlich. Der für die Testmessungen gewählte seismische Abstand von 10 m muß, zumindest im engeren Meßgebiet, beibehalten und geringerer Arbeitsfortschritt in Kauf genommen werden [9].

2.34 *Anlage und Ablauf der seismischen Feldarbeit*

Die Lage des refraktionsseismisch vermessenen Gebietes, des Brunnenfeldes und des Hafir im Khor ist aus dem Lageplan Markt Mazroub zu ersehen. Er enthält alle abgeschossenen Profile mit ihren Schußpunkten und die im engeren Meßgebiet stehenden Bohrungen (Anlage 1).

P I, P II und P III waren als Basisprofile für die seismischen Untersuchungen angelegt und vor Beginn der Feldarbeit eingemessen worden. Wie erwähnt, deckt sich P I mit der senkrecht zum Khor-Streichen laufenden südlichen Bohrlinie, wurde deshalb für Testmessungen gewählt und bis 18. 12. 1956 gänzlich abgeschossen.

P II ist im Lageplan nicht enthalten. Es läuft ca. 700 m weiter nördlich parallel zu P I längs der zweiten Hauptlinie von Bohrungen. Mit P II sollte untersucht werden, wie weit der in Brunnenfeldnähe durch P I festgestellte Charakter des Basementreliefs nach dem N-Teil des Khor hin erhalten bleibt und die Annahme langstreichender Grundgebirgsfurchen gestützt werden kann. Bereits mit den ersten Schüssen auf S-Teil P III stellte sich jedoch heraus (Anlage 9), daß Parallelprofile über derartige Entfernungen weg nicht durch Isohypsen des Basement verbunden werden können. Deshalb wurde P II zunächst ausgelassen und auch später nicht mehr abgeschossen.

P III war als Verbindung von P I mit P II gedacht. Es ist in spitzem Winkel zum Khor-Streichen angelegt, so daß es nach N zu dessen E-Begrenzung überschreitet und der seismische Effekt der Randdünen untersucht werden kann. Im S erfaßt es B 17/56 und die produktive B 1/56. Seine seismische Vermessung – zunächst von SP 1 bis SP 9 – ergab, daß die Grundgebirgssteufen auch im Streichen des Khor rasch wechseln und daß B 1/56 in einer steilflankierten Depression steht, über deren Zuflußweg noch nichts ausgesagt werden konnte (Anlage 9). P III wurde später nur noch über den Schnitt mit P IV hinaus bis SP 11 abgeschossen.

P IV stellt eine an P III angehängte Interpolationsstütze zwischen P I und P II dar (Bild 15). Sein Abstand von P I ist mit 380 m noch zu groß, um die bis 30. 12. von SP I bis SP 9 vorliegenden Ergebnisse an das engere Meßgebiet anschließen zu können. Das Restprofil wurde Mitte Januar abgeschossen (Anlage 10).

Da dringend ein neuer Bohransatzpunkt anzugeben war, wurde die auf P I zwischen SP 4 und SP 5 festgestellte Grundgebirgsdepression näher untersucht. Es galt, ihre horizontale Ausdehnung abzugrenzen und sicherzustellen, daß sie nicht mit der Senke der wasserfündigen B 1/56 in Verbindung steht. Dazu wurden zu Jahresschluß beiderseits P I mit 100 m Abstand die Kurzprofile P V und P VI (SP 1 bis SP 2) abgeschossen. Die anschließend vermessenen Profile P VII



Bild 15. Meßgelände bei P IV

und P VIII (Bild 16) wurden angelegt, um den Verlauf der interessierenden Senke nach S bzw. SE zu verfolgen.

Anfang 1957 wurden P IX (Bild 17), P X und beiderseitige Verlängerungen von P VI abgeschossen. Dadurch konnten die N-Begrenzungen der beiden Senken festgelegt werden, in denen B 1/56 steht, bzw. die neue Bohrung B 1/57 geteuft wurde.

Durch P XI erfuhr das Netz seismischer Profile im engeren Meßgebiet Mitte Januar 1957 die letzte Verdichtung. Es lag nahe, den Verlauf der beiden Hauptsenken weiter zu verfolgen und das Meßgebiet nach SE auszudehnen. Im Zentrum des Brunnenfeldes ist aber seismische Arbeit unmöglich. Menschen und

Bild 16. Arbeit auf P VIII
(Photo: RISCHE)



Bild 17. Arbeit auf P IX
(Photo: RISCHE)

Tierherden rufen unerträglich hohe Bodenunruhe hervor und lassen sich nicht außerhalb des Gefahrenbereiches der Sprengungen halten (Bild 18). Hinzu kommt das Risiko, daß die unbefestigte Wandung von Schachtbrunnen durch Schüsse in der Nachbarschaft gelockert wird und nachbricht.

Zum Abschluß wurde noch P XII, ca. 1000 m südlich vom engeren Meßgebiet, geschossen. Es ist über eine lokale Tonmulde im Khor gelegt worden, für deren Untergrundstruktur sich der Hydrogeologe aus grundsätzlichen Erwägungen interessierte (Anlage 11).



Bild 18. Brunnenfeld Mazroub
(Photo: RISCHE)

Die mit den Testmessungen am 11. 12. 1956 begonnene Feldarbeit wurde am 20. 1. 1957 beendet. In 19 Tagen reiner Schießtätigkeit sind 11 der 12 angelegten Profile von 5900 m Gesamtlänge seismisch mit 262 Schuß und 250 auswertbaren Seismogrammen vermessen worden. Alle Profile sind — von einigen geringen Abweichungen abgesehen — mit Aufstellungslängen von 90 und 180 m und mit 10 m seismischem Abstand im Hin- und Rückschuß, also vierfach, abgeschossen worden. Die durchschnittliche Tagesleistung betrug 15 Schuß. In den übrigen 18 Arbeitstagen dieses Zeitraumes sind Arbeiten verrichtet worden, die zur Weiterführung der Schießtätigkeit erforderlich waren bzw. Ausfallzeiten infolge von Apparaturdefekten oder Tropenerkrankungen überbrückten: Profilineinmessen, Anlegen von Schuß- und Geophonlöchern, Sprengstoffnachschießen, Auswerten und Geräteinstandsetzen [9].

2.4 Auswertung und Ergebnisse der refraktionsseismischen Untersuchungen

2.41 *Qualitative Auswertung. Vorläufiger Bericht*

Die genaue Auswertung der seismischen Feldergebnisse verband sich mit Schwierigkeiten, die später unter 3.2 dargelegt werden, und konnte zeitlich mit dem Meßbetrieb im Gelände nicht Schritt halten.

Schon eine grobe Auswertung ergab, daß die grundsätzlichen Befunde der Testmessungen (vgl. 2.33) für den seismisch abgeschossenen Bezirk allgemein gültig sind. Alle auftretenden Geschwindigkeiten lassen sich in sechs Gruppen einordnen, die als entsprechende seismische Horizonte im Meßgebiet teils ständig, teils an mehreren Stellen wiederholt erscheinen. Die Sohle dreier schmaler Senken ausgenommen, ist die Grundgebirgsoberfläche als tiefster seismischer Horizont mit eindeutiger Geschwindigkeit überall erfaßt worden.

Sofort nach Beendigung der Feldarbeit sollte der Regierung des Sudan über die Ergebnisse berichtet werden. Deshalb blieb die Auswertung zunächst auf qualitative Angaben über die hydrologisch vorzugsweise interessierende Gliederung der Basementoberfläche beschränkt. In einem „vorläufigen Bericht“ wurden die Befunde zusammengestellt und mit einem Lageplan abgegeben, in dem der Verlauf von Senken und höchsten Erhebungen des Basement ohne absolute Teufenangaben eingezeichnet ist.

Folgendes legt bereits die qualitative Auswertung fest:

1. Die Oberfläche des festen Grundgebirges ist im Meßgebiet sehr lebhaft mit teils beträchtlichen Teufenunterschieden gegliedert.
2. Innerhalb des Meßgebietes liegen zwei markante Senken, die N—S streichen und nach SE umbiegen. Eine Verbindung zwischen beiden läßt sich im seismisch vermessenen Bereich nicht erkennen. In der östlicheren Senke steht die fündige B 1/56, in der westlicheren wurde am 9. 1. 1957 neu B 1/57 angesetzt. (Diese Bohrung mußte wegen Meißelbruchs in 30 m Tiefe abgebrochen werden. Grundgebirge hat sie bis dahin nicht erreicht.) Eine dritte Senke am W-Rand des Meßgebietes weiter zu verfolgen lohnt

nicht, da B 7/56 dort auf Salzwasser gestoßen ist. Eine vierte wird im NE des Meßgebietes durch Profil III angedeutet (vgl. Anlage 2).

3. Größtenteils sind die Senken meterhoch mit Material gefüllt, das als seismischer Horizont mit $v \sim 3400 \text{ m s}^{-1}$ auftritt. Vergleich mit Bohrbefunden bestätigt die Annahme, daß es sich um Geröll handelt.
4. Die festgestellten Senken dehnen sich nach N bzw. NE wahrscheinlich nicht weit aus. Das seismische Profil IV im N zeigt ein ausgeglicheneres Basementrelief als das zentrale Meßgebiet (vgl. Anlage 10) [7], [9].

2.42 Vertiefte Auswertung und geologische Interpretation. Abschlußbericht

Nach Abgabe des seismischen Zwischenberichtes mußten Entscheidungen über den Fortgang der Wasserprospektion abgewartet werden. Diese Erkundungspause konnte bis Ende April 1957 zu vertiefter Auswertung der refraktionsseismischen Ergebnisse und Anfertigung des Abschlußberichtes genutzt werden. Für das Grundgebirge wurden verbesserte Tiefenangaben errechnet und für die Deckschichten Teufenerstreckung, Flächenverteilung und geologische Deutung der refraktierenden Horizonte gegeben. Den Befund des Zwischenberichtes ergänzend, ergab sich endgültig:

1. Horizont F (Anlagen 2, 9, 10, 11)

ist der tiefste refraktierende Horizont und von den übrigen durch den Geschwindigkeitssprung auf 5000 bis 6000 m s^{-1} stets eindeutig zu trennen. Er ist im gesamten Meßgebiet durchgehend erfaßt, ausgenommen die Sohle einiger schmaler, steilflankiger Senken. Seiner Geschwindigkeit nach entspricht er der Oberfläche des festen Grundgebirges. Die vergleichbaren Bohrbefunde bestätigen diese Annahme und die seismischen Teufenangaben. Im einzelnen können die Geschwindigkeiten des Basement nicht genau ermittelt werden, so daß seismisch nicht zu entscheiden ist, ob innerhalb des Meßgebietes die petrographische Beschaffenheit des Basement wechselt. Die Angaben des Zwischenberichtes über Oberflächengestaltung, Hauptstreichen und Senkenausbildung des Grundgebirges werden durch die vertiefte Auswertung erhärtet.

Von den beiden Senken des Zentralgebietes ist die östliche, in der B 1/56 steht, durchweg tiefer als 30 m und senkt sich an zwei Stellen über 35 m hinab. Nach NNW teilt sie sich in zwei Arme, deren westlicher im N durch Tiefen kleiner als 25 m abgeschnürt wird, während sich der östliche nach N in Tiefen größer als 30 m auf 15 bis 20 m Breite verengt und aus dem vermessenen Gebiet herausläuft. Die westliche Senke zieht sich tiefer als 30 m mit gleichmäßiger Breite und Flankenausbildung nach E in den Bereich des Hafir. Bevor sie im N durch Tiefen kleiner als 30 m flach abgeschlossen wird, senkt sie sich auf mehr als 35 m ab. Zwischen den beiden Senken taucht das Grundgebirge zu Teufen kleiner als 25 m, teilweise sogar kleiner als 20 m auf, so daß sie zumindest im Meßgebiet nicht kommunizieren. Den Abfall einer tiefen Depression, die ihrer Salzwasserführung wegen nicht weiter verfolgt wurde, zeigen alle im W des Meßgebietes beginnenden Profile an. Möglicher-

weise gehören dazu auch die Tiefen größer als 35 m am Ende von P IV. Eine relativ flach einfallende und breite Senke deutet P III im NE des Meßgebietes an. Nahe dem Schnittpunkt P III/P IV liegt die Basementoberfläche ebenfalls tiefer als 35 m. Auch P IV überquert einige kleinere Senken, zeigt aber im ganzen gesehen ein gleichförmigeres Grundgebirgsrelief. Im Bereich der mit P XII untersuchten Tonmulde steht das Basement höher an. Seine Tiefenlage schwankt mäßig zwischen 20 m und 10 m.

2. Horizont E (Anlagen 3, 9, 10)

kennzeichnen Geschwindigkeiten von 2800 bis 3400 m s^{-1} . Die obere Grenze ist das Maximum der Verteilung, die untere gleich der Höchstgeschwindigkeit des Horizontes D. Seinem Auftreten in zwei ganz verschiedenen Tiefenlagen nach muß der Horizont E geologisch getrennt als E' und E'' interpretiert werden.

E'' wird in 5 bis 6 m Teufe auf P I zwischen B 7/56 und SP 4, auf P XI bei SP 3 angetroffen. Er entspricht stark tonigen Sedimenten, die 15 m und mehr mächtig auf dem Grundgebirge liegen.

E' wird erst in 20 bis 30 m Teufe erreicht. Er ist nach Befunden von B 1/56 und B 1/57 als Geröll mit mehr oder weniger sandig-tonigem Zwischenmittel zu deuten, das den Hauptteil der W-Senke, das Tief um B 1/56 und die Senken im NE des zentralen Meßgebietes füllt. Auch im Verlauf der Profile III und IV ist E' mehrfach als charakteristische Senkenausfüllung zu beobachten und bedeckt ab SP 6 auf P IV bis zu dessen W-Ende das Basement als geschlossene Lage.

3. Horizont D (Anlagen 4, 9, 10)

ist durch Geschwindigkeiten charakterisiert, die sich auf Werte von 1700 bis 2800 m s^{-1} mit Häufungen bei 1900 m s^{-1} und 2400 m s^{-1} verteilen und weder nach der Teufenlage noch in der horizontalen Verteilung eine erkennbare Systematik aufweisen. Dieser Horizont repräsentiert petrographisch verschiedene, seismisch nicht unterscheidbare Erscheinungsformen. In tieferen Lagen sind es nach den Bohrbefunden von B 5/55, B 9/56 und B 7/56 teils sandige Tone, teils vertonter Verwitterungsgrus des Basementgranits. Bei B 1/57, wo der Horizont nur 5 m unter der Oberfläche ansteht, entspricht er tonigem, sehr stark verfestigtem Feinsand.

Im Zentrum des Meßgebietes ist der Horizont weit und lückenlos verbreitet, an den Rändern verschwindet er. Nur im W erscheint er auf P I um SP 3 noch einmal nach einer Lücke, in die sich, ebenso wie in eine Einbuchtung am S-Rand, der Horizont E'' einschleibt. Dieser mag als petrographische Sonderausbildung zum Schichtenverband des D-Horizontes gehören, muß jedoch des krassen Geschwindigkeitssprunges wegen seismisch zu Horizont E geschlagen werden.

Der Horizont ist im Zentralgebiet stark kuptiert. Eine Senke beim Schnittpunkt P I/P VII erreicht Tiefen größer als 15 m, eine andere bei B 18/56 größer als 20 m. 5 m und weniger unter der Oberfläche streicht eine Erhebung über B 1/57 hinweg etwa N-S und setzt sich, nach E einbiegend, wahrscheinlich über P VIII hinüber fort.

Im NE erscheint der Horizont auf P III zwischen SP 5 und SP 8 flachwellig in 10 bis 15 m Teufe, im N auf P IV von SP 4 bis SP 7 und von SP 9 bis SP 14 in 5 bis 15 m Teufe.

4. Horizont C (Anlagen 5, 9, 10)

wird durch Geschwindigkeiten von 1000 bis 1800 m s⁻¹ mit ausgesprochenem Häufungswert bei 1300 m s⁻¹ angegeben. Er entspricht Sanden, die mehr oder weniger tonig oder verfestigt sind. Die variierenden Geschwindigkeiten drücken offensichtlich Unterschiede im Verfestigungsgrad aus, die von den groben Befunden vergleichbarer Bohrungen nicht angegeben werden.

Der Horizont erscheint in 4 m mittlerer Teufe im gesamten Meßgebiet, ausgenommen diejenigen Bezirke, in denen die Erhebungen des Horizontes D zu etwa gleicher Höhe aufsteigen. Im NE bildet er eine bis zu 14 m tiefe Senke. Weiter nach NE verhält er sich längs P III wie im Zentrum des Meßgebietes. Ebenso im N auf P IV, soweit er dort nicht zwischen SP 6 und SP 10 verschwindet.

5. Horizont B (Anlagen 6, 10)

bezeichnen Geschwindigkeiten mit einem Streubereich von 700 bis 1100 m s⁻¹, Häufigkeitswerte liegen bei 750 m s⁻¹ und 1000 m s⁻¹. Er kann als stärker verfestigter oder schwach toniger Sand angesprochen werden. An der Oberfläche steht er nicht an. Im Zentralgebiet fehlt er gänzlich und füllt nur die NE-Senke des Horizontes C. Ferner erscheint er noch im N auf P IV bei SP 12 und SP 13 und tritt in die Lücke des Horizontes C zwischen SP 6 und SP 10.

6. Horizont A (Anlagen 7, 9, 10)

ist die im Meßgebiet maximal 6 m mächtige oberste Deckschicht. Ihre Scheingeschwindigkeiten streuen von 350 bis 850 m s⁻¹ mit Häufungen um 550 m s⁻¹ und lassen eine systematische Flächenverteilung erkennen. Am höchsten sind sie am N- und S-Rand des Meßgebietes. Sie sinken beträchtlich nach E ab, wo am Rand des Khor lockere Sande zu Dünen aufgeweht sind.

7. In der mit P XII (Anlage 11) abgeschossenen Tonmulde erscheinen vier seismische Horizonte, von denen zwei — entsprechend Basement und oberster Deckschicht — die gleichen Geschwindigkeiten wie im engeren Meßgebiet aufweisen. Die Geschwindigkeiten der beiden anderen streuen von 2600 bis 3200 m s⁻¹ bzw. von 1000 bis 1200 m s⁻¹ und kennzeichnen offensichtlich nur verschiedene Verfestigungsgrade des Tones im Untergrund. An der Oberfläche steht Ton mit tiefen Trockenrissen zwischen SP 3 und SP 5 an [9].

2.43 *Hydrologische und wasserwirtschaftliche Folgerungen aus den seismischen Befunden*

Von allen Bohrungen beider deutscher Wasserwirtschafts-Delegationen stehen außer der neuangesetzten B 1/57 vier der früher geteufte in den seismisch festgestellten Grundgebirgsdepressionen:

B 1/56 wurde in 22 m Teufe wasserfündig mit Eintritt in die dem seismischen Horizont E entsprechenden Gerölle.

B 7/56 brachte ungenießbares Salzwasser.

B 5/55 und B 9/56 sind in den nördlich abgeschnürten W-Arm der ostwärtigen Senke geteuft worden. Sie konnten nicht fündig werden, weil diesen Arm nicht durchlässige Gerölle, sondern die sandigen Tone und vertonter Grus des seismischen Horizontes D anfüllen.

Einige relativ lange aushaltende Schachtbrunnen der Eingeborenen liegen im Bereich der festgestellten Basementsenken.

Während im seismisch engvermessenen Gebiet das Grundgebirgsrelief stark gegliedert ist, verläuft es im N nach den Ergebnissen von P IV und der Bohrungen auf der nördlichen Linie (entsprechend P II) weit gleichförmiger. Die Annahme einer Grundgebirgsfurchung, die vom Djebel Katul bis Mazroub durchläuft, kann nicht gestützt werden. Vielmehr müssen die Senken als kleine, voneinander isolierte Grundwasserspeicher mit begrenzten oberirdischen Einzugsgebieten gelten. Ihre Gesamtkapazität ist wesentlich geringer als ursprünglich angenommen. Keinesfalls ist zu erwarten, daß unterirdische Zuflüsse aus fremden Einzugsgebieten den Grundwasservorrat bei Mazroub vermehren könnten. Für die engere Nachbarschaft von Mazroub besteht lediglich Aussicht, daß eine oder zwei weitere, in den seismisch lokalisierten Senken abzuteufende Bohrungen fündig werden mit Jahresleistungen, die der von B 1/56 ($1500 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$) annähernd gleichkommen.

Diese Schlußfolgerungen zieht bereits der vorläufige hydrogeologische Ergebnisbericht [7], der mit dem geophysikalischen Zwischenbericht Ende Januar 1957 in Khartoum der Sudanregierung vorgelegt worden war. Sie bewirkten, daß die Arbeit zur Wasserfindung bei Mazroub wurde eingestellt und nur die Pumpe B 1/56 noch eine Zeitlang für die einheimische Bevölkerung von deutschem Personal in Betrieb gehalten wurde.

Leider hat der abschließende Prospektionsbefund auf das spezielle Wasservorhaben gesetzte Hoffnungen enttäuscht, andererseits aber den positiven Erfolg gehabt, daß seine exakten Ergebnisse vom Geological Department und anderen Sudanbehörden ausdrücklich anerkannt und die refraktionsseismische Erkundungsqualität sehr hoch eingeschätzt worden ist. Die Arbeit bei Mazroub galt als Schulbeispiel, das so überzeugend war, das der Sudan noch stärker für geophysikalische Erkundungen interessiert wurde und in Betracht zog, künftig vorzugsweise das Refraktionsverfahren, gestützt auf die bei Mazroub gesammelten Anfangserfahrungen, sowohl lokal wie in weiterer Sicht auch regional für die Wasserprospektion im gesamten Basementkomplex einzusetzen [7].

3.1 Charakteristische Bedingungen der seismischen Feldarbeit

3.11 Profilanlage, Einmessen und Aufstellungen

Die meisten Grund- und Zwischenprofile liegen parallel zueinander in Richtung E–W, weil der Basementkomplex generell etwa NNE–SSW streicht und auch seine Kleinstruktur im seismisch untersuchten Bereich diese Richtung bevorzugt. Im SE-Teil des Meßgebietes sind Profile unter 45° bzw. 90° zum System der Parallelprofile angelegt worden, um die interessierenden, nach E abbiegenden Depressionszüge weiterverfolgen und senkrecht zu ihrem Streichen erfassen zu können. Wie erwähnt, verbietet die komplizierte Gestaltung des Grundgebirgsreliefs meist die Konstruktion von Isohypsen zwischen Parallelprofilen, die 100 m oder weiter auseinanderliegen (vgl. Anlage 2). Mit hinreichender Zuverlässigkeit läßt sich nur über Entfernungen von etwa 50 m interpolieren, so daß das seismische Netz entsprechend verdichtet worden ist.

Topographisch ist es an Festpunkte angehängt, die die zweite wasserwirtschaftliche Arbeitsgruppe für die Bohrarbeiten geschaffen hatte. Eine spätere Vermessung hat das seismisch erkundete Gebiet mit der Ortslage des Marktes Mazroub verbunden (Anlage 1) und damit an das Grundnetz der sudanesischen Landesaufnahme angeschlossen. Die Richtungswinkel der Hauptprofile sind mit Theodolit (Th 30), die Längen tachymetrisch (P I, P IV) oder mit 50-m-Stahlmeßband (P II, P III) bestimmt worden. Profilverflucht und Zwischenmeßpunkte werden durch 3 m lange Eisenrohre markiert, die in halber Länge, d. h. genügend fest und diebessicher, eingerammt wurden. Beim Einmessen der kürzeren Verdichtungsprofile genügte zur Winkelbestimmung ein Baunivellier. Da das Meßgelände im Khor praktisch eben ist, sind Höhennivellements überflüssig, und das Profileinfluchten, begünstigt durch nur spärliche Bodenbewachsung, macht keine Schwierigkeiten. Die freie Sicht ist selbst auf Profilen, die durch dichteren Akazienbusch führen, nur selten behindert. Die Lage der Schuß- und Geophonaufstellungs-Punkte ist mit Stahlmeßband so genau bestimmt worden, daß relative Abweichungen von tachymetrischen Längenmessungen stets kleiner als 1 ‰ sind.

Die Tiefenlage des Grundgebirges verlangt eine Aufstellungslänge bis etwa 160 m, die bei 20 m seismischem Abstand mit der 8-Kanal-Apparatur gerade erreicht wird. Dagegen mußte bei dem auf 10 m reduzierten seismischen Abstand jede Laufzeitkurve aus zwei Teilaufstellungen von je 80 m Länge gewonnen werden. Um die starke Kupierung des Grundgebirges und absätziges Horizonte im Deckgebirge sicherer verfolgen zu können, wurden außerdem die Schußpunkte in nur 90 m Abstand angelegt. (Abweichungen in einigen Fällen

sind z. B. durch die Lage von Bohrungen auf dem Profil bedingt.) Außer P V sind so alle Profile in Schritten von 90 m überlappend mit 170 m maximaler Schußpunktentfernung hin und zurück abgeschossen worden. (Meßwerte für 90 m Schußpunktentfernung fehlen in den zusammengesetzten Laufzeitkurven, weil an Schußpunkten kein Geophon aufgestellt wurde.)

Praktisch ist die Feldarbeit so durchgeführt worden: Mit Geophonaufstellung zwischen SP_n und SP_{n+1} wurden Hin- und Rückschuß aus SP_n bzw. SP_{n+1} als „Nahschüsse“ mit 10 bis 80 m, Hin- und Rückschuß aus SP_{n-1} bzw. SP_{n+2} als „Weitschüsse“ mit 100 bis 170 m Schußpunktentfernung registriert. Dann wurden die Geophone in den Nachbarabschnitt SP_{n+1}/SP_{n+2} usf. umgesetzt und sinngemäß geschossen. Insgesamt sind aus jeder Schußgrube vier, an Profilenden drei bzw. zwei Schüsse abgetan worden. Die Länge der Geophon-Anschlußkabel (ca. 150 m) erlaubte, je drei Teilaufstellungen ohne Kabinenumzug abzuschießen.

3.12

Schießarbeit

Die Schüsse wurden oberflächennah aus Schußlöchern abgetan, die, etwa 1,5 m tief gegraben, im unteren Drittel zur Aufnahme der Ladung auf 0,15 m Durchmesser verjüngt waren (Bild 19) und nach Besetzen zugeschüttet wurden. Die verdämmende Wirkung des völlig trockenen, nur festgestampften Sandes ist natürlich gering (Bild 20). Es entstehen Auswurftrichter, die bei 1,5 kg Ladung ca. 3 m Durchmesser haben. Als Sprengstoff stand Spezialgelatine britischer Herkunft mit 80 % Nitroglyzerin, 6 % Kolodiumwolle und 14 % Natronsalpeter in Ölpapierpatronen von je 60 g zur Verfügung. Die „Nahschüsse“ (bis 80 m Schußpunktentfernung) wurden mit 0,3 kg besetzt, für die „Weitschüsse“ (bis 170 m Schußpunktentfernung) genügten im allgemeinen 1,5 kg, maximal

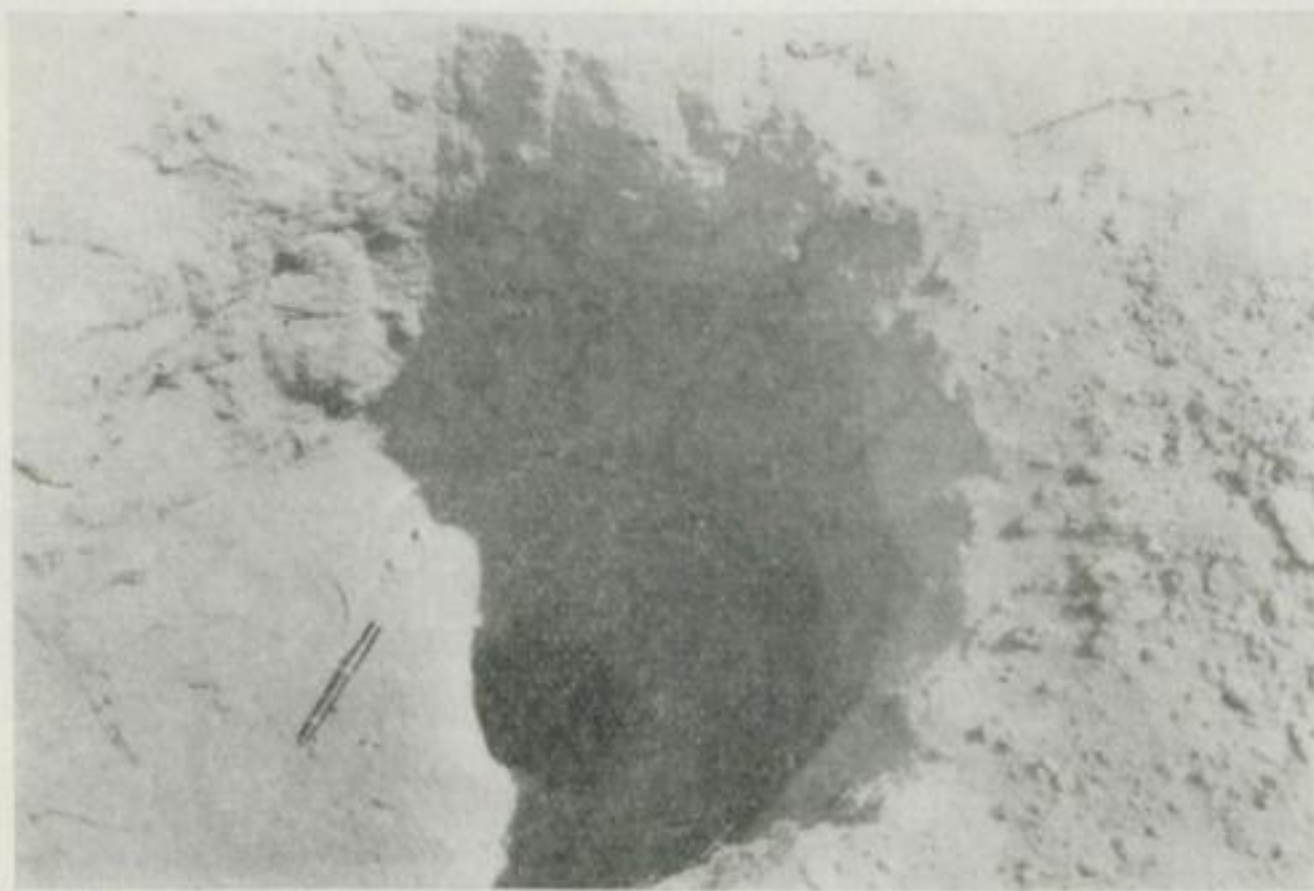


Bild 19. Schußgrube (Aufblick)



Bild 20. Schuß mit Ladung 1,5 kg, schwach verdammt
(Photo: RISCHE)

2,1 kg. Noch stärkere Ladungen vergrößern nur erheblich die Zerstörungsarbeit am Schußpunkt, aber nicht die registrierte elastische Energie.

Bereitschaftsmeldung und Schußkommando wurden wegen kurzer Entfernung zwischen Schießmeister und Kabine einfach durch Zuruf gewechselt, der Sprengmoment in üblicher Weise fixiert durch Abriß einer Ruhestromschleife um die Schlagladung.

Sprengstoff und Zünder wurden aus Beständen der sudanesischen Armee geliefert, mit Eisenbahn von Port Sudan nach El Obeid gebracht und dort bei der staatlichen Drilling Section eingebunkert. Zweiwöchentlich wurden jeweils 100 kg nach Mazroub überführt. Das ist die Höchstmenge, die das sudanesisches Sprengstoffgesetz für den Transport mit einem Kraftfahrzeug zuläßt.

3.13

Registrier- und Fototechnik

Das Registrierverfahren ist der Forderung nach optimaler Wiedergabe der ersten Einsätze angepaßt worden, da es hinsichtlich der Entfernungs- und Untergrundverhältnisse und auch apparativ unmöglich war, andere seismische Bestimmungsgrößen in auswertbarer Qualität zu erhalten. Die L-Welle setzt im allgemeinen flau mit geringer Anfangsamplitude ein (Bild 21). Deshalb ist ohne Rücksicht auf Amplitudenverzerrungen nachfolgender Schwingungen die Verstärkung grundsätzlich so hoch getrieben worden, wie der Störpegel des Einzelkanals jeweils zuließ. Mäßig verstärkt wurden nur die zu 10 und 20 m Schußpunktentfernung gehörenden Kanäle, in allen anderen wurde ohne systematische Stufung nach der Entfernung die volle Verstärkerempfindlichkeit zu etwa 70 % ausgefahren (Bild 22, 23).

Der Einfluß hoher Temperaturen auf die Fotoarbeiten ließ sich in einfacher Weise ausschalten. Entwickler- und Fixierlösungen wurden nachts angesetzt,

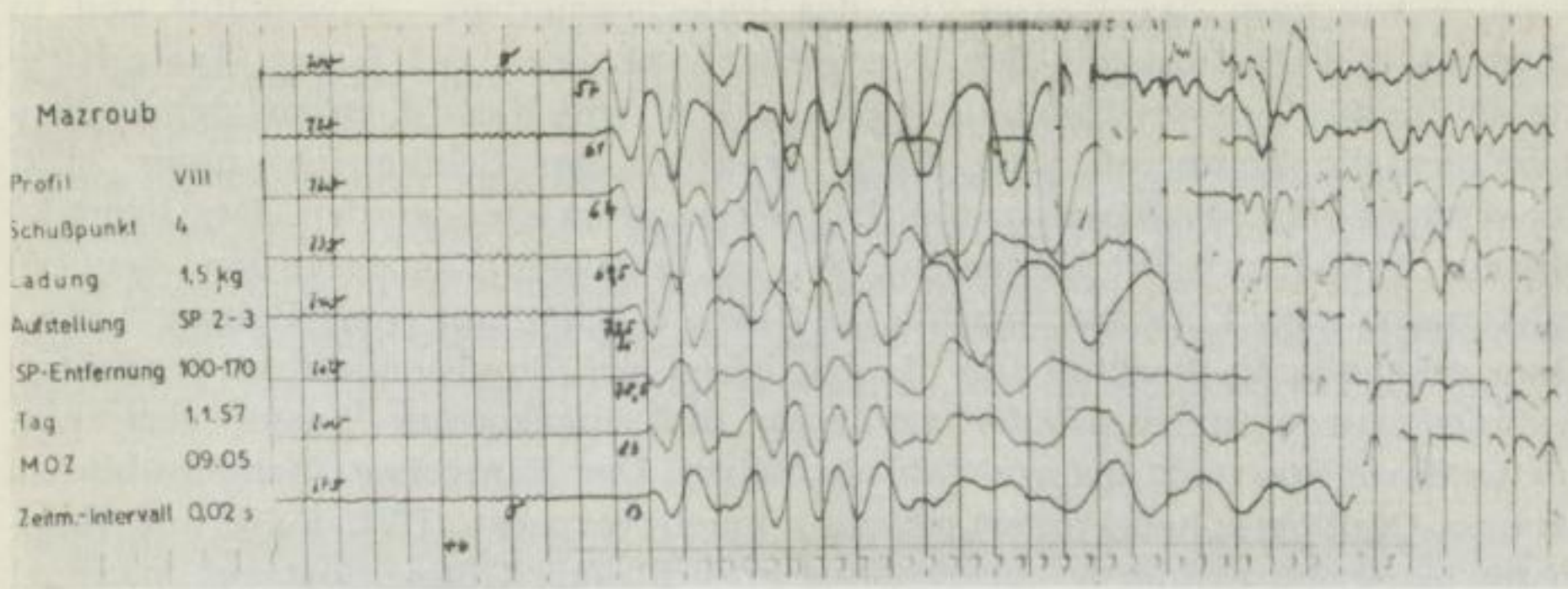


Bild 21. Beispiel für starke Dämpfung und flauhe Einsätze der L-Welle

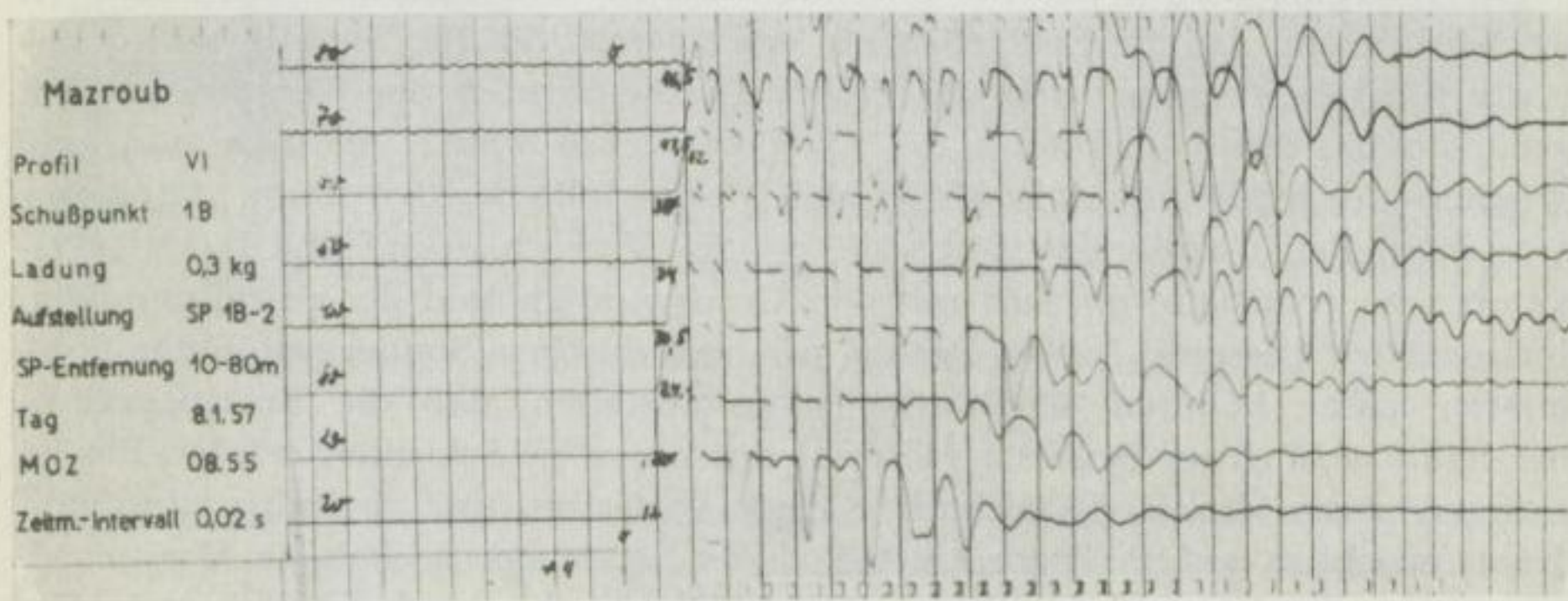


Bild 22. Seismogramm (Nahaufstellung) durchschnittlicher Qualität

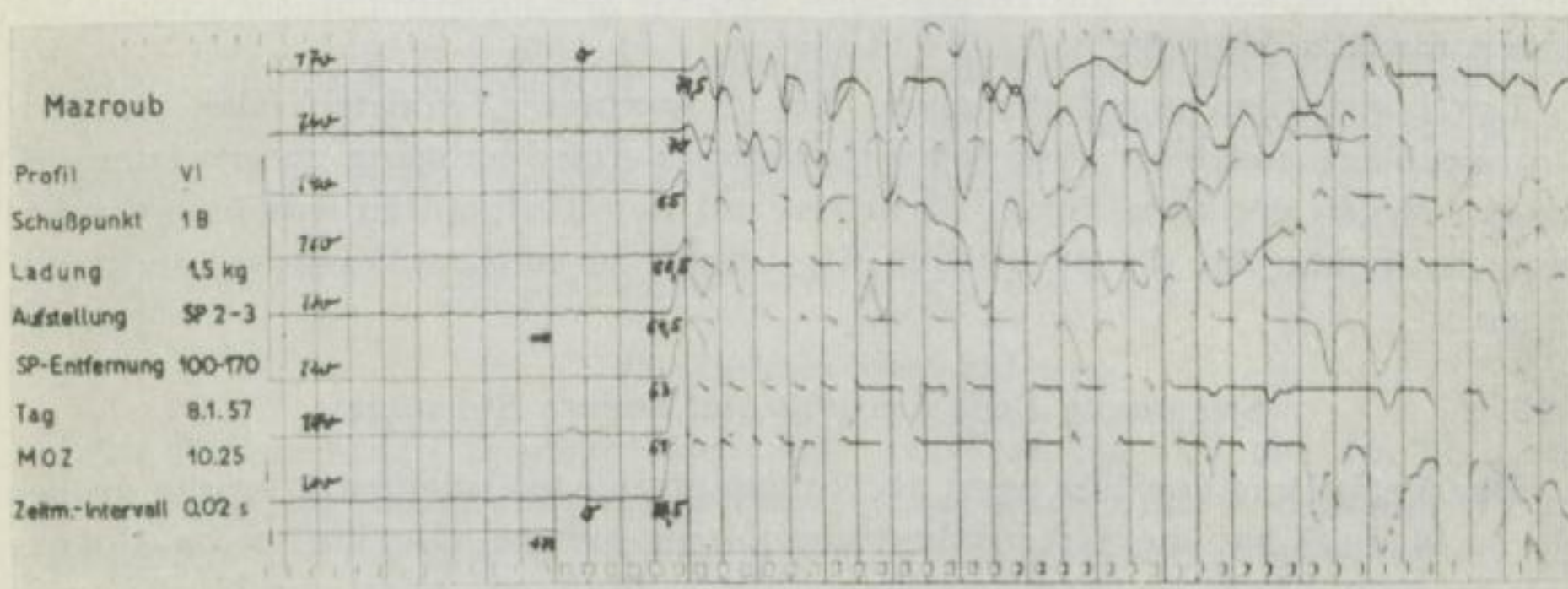


Bild 23. Seismogramm (Weitaufstellung) durchschnittlicher Qualität

dann — wie auch das Wasser für das Unterbrecherbad — abgekühlt und in Thermosgefäße gefüllt, die den Tagesbedarf von je ca. 5 l fassen. Trotz Hitze von 50 bis 60° C in der Kabine konnte durch öfteres Nachfüllen aus den Isolierbehältern die Temperatur der Bäder während des Feldbetriebs unter 25° C gehalten und fotochemisch in üblicher Weise gearbeitet werden. Der handelsübliche Agfa-Repro-Entwickler wurde in normaler Konzentration benutzt. Härtezusatz zum Fixierbad machte die Filme brüchig, auf seine Beigabe wurde ohne erkennbaren Nachteil für die Festigkeit der Emulsionsschicht verzichtet. Anfangs wurde für die Bäder gefiltertes und abgekochtes Wasser verwandt, später davon als nicht erforderlich abgesehen. Der Filmvorrat (handelsübliches Mimosa-Oszillographen-Papier) wurde doppelt verpackt (PVC-Folie und Holzkiste) in einer Lehmhütte gelagert, wo er sich ohne Güteverlust auf maximal 28° C erwärmte.

3.14

Energieverhältnisse

Die Energieabnahme der L-Welle mit wachsender Schußpunktentfernung ist beträchtlich und hat die Feldarbeit oft erschwert (Bild 21). Sie läßt sich quantitativ nicht bestimmen, weil die Empfindlichkeitsstufen der Verstärker nicht genau definiert und überhaupt die Einzelkanäle so wenig identisch sind, daß zwischen ihnen kein Amplitudenvergleich angestellt werden kann. An dieser instrumentellen Unzulänglichkeit scheitert der Versuch, spezifische Dämpfungsfaktoren zu ermitteln, die sich mit den Geschwindigkeiten der refraktierenden Horizonte zu besserer Interpretation petrographischer Sonderausbildung korrelieren lassen könnten. Qualitativ ist festzustellen, daß die Energieextinktion hauptsächlich im lockeren Material der obersten Schichten erfolgt. Sie ist geringer, wenn die Deckschichten stärker verfestigt und tonhaltig sind und nimmt erheblich auf Profilabschnitten ab, in denen der seismische Horizont *E* in geringen Teufen ansteht. Offensichtlich führen aber auch ungenügende Ladungsverdämmung und die Vielzahl brechender Grenzen im Untergrund dazu, daß die L-Welle häufig aufgespalten und der Hauptteil ihrer Anfangsenergie in andere Wellenarten überführt wird. Diese treten, soweit in den Registrierungen unterscheidbar, mit Amplituden auf, die ein Mehrfaches von denen der ersten Einsätze betragen.

Durch Schießen aus Bohrungen, die in feuchtere Schichten oder bis zum Grundgebirge abgeteuft sind, wäre besserer Energiedurchgang zu erwarten gewesen. Wegen geringen Bohrfortschrittes mit den Testgeräten war jedoch während der Feldarbeit die praktische Möglichkeit zu solchen Versuchen nicht gegeben.

3.15

Seismische Bodenunruhe und andere Störungen

Das Verhältnis von Störpegel zu Nutzamplitude ist ungünstig, häufig größer als 1 : 10, und hat die Laufzeitbestimmung erschwert. Die seismische Bodenunruhe zeigt einen gewissen Tagesgang. Mit Aufkommen böartiger Winde steigt sie gegen 09.00 MOZ sprunghaft an und geht etwa vier Stunden später wieder

zurück. Sie läßt sich auf Profilabschnitten, die über nacktes oder mit Kurzgras bewachsenes Gelände führen, wirksam dadurch unterdrücken, daß die Oberkante der Geophone handbreit unter die Erdoberfläche gebracht und mit festgetretenem Sand bedeckt wird. In der Nachbarschaft von Akazienbüschen liegen die Frequenzen durch Wind angeregter Bodenschwingungen um 45 Hz, so daß sie in den Eigenfrequenzbereich der Geophone geraten und ihre Amplituden bevorzugt verstärkt werden (Bild 24, Spuren 3 und 4). Karawanenzüge und

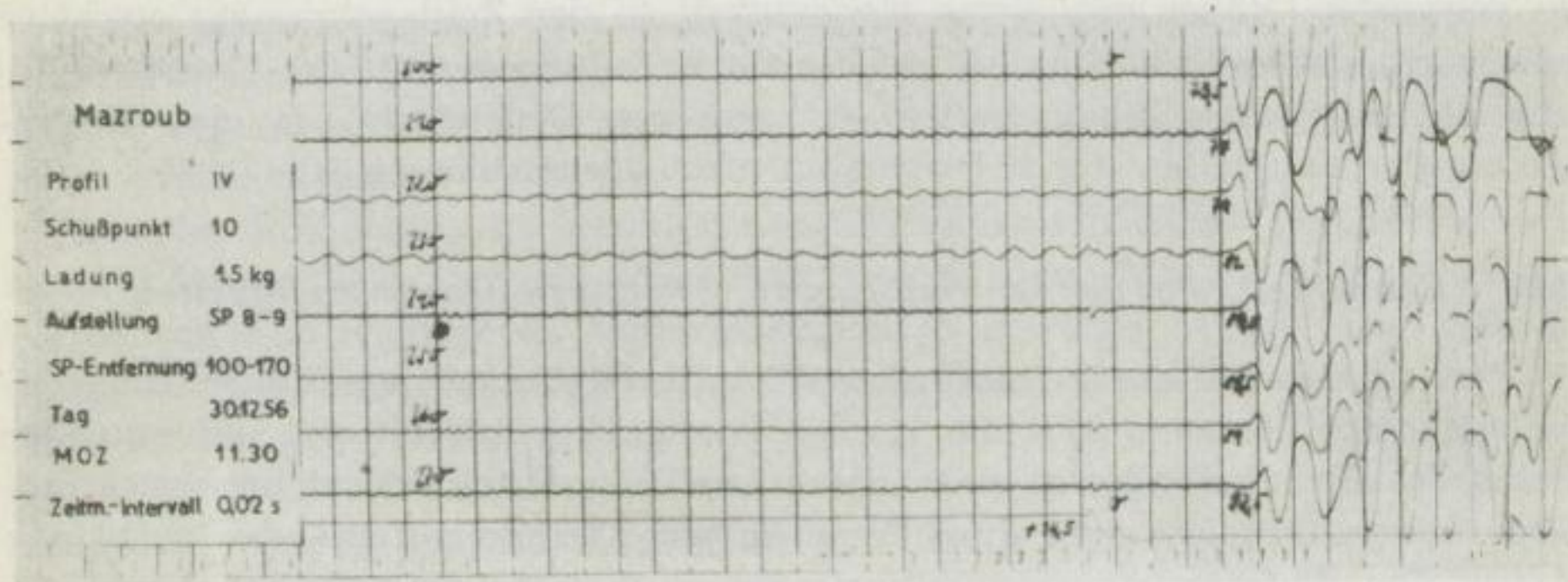


Bild 24. Seismogramm mit Bodenunruhe, Eigenstörungen der Apparatur und schwacher Abrißinduktion

weidende Herden, vor denen das Meßgelände nie völlig abgesperrt werden kann, vor allem dichte Ansammlungen von Menschen und Tieren im Brunnenfeldbereich sind weitere Ursachen empfindlicher Bodenunruhe.

Zur äußeren Unruhe treten periodische Eigenstörungen der Apparatur, hauptsächlich Einstreuungen des Umformers und des Filmtransportmotors. Durch eine 150-Hz-Komponente wird die Registrierung sehr beeinträchtigt, weniger durch höherfrequente Anteile (Bild 24).

Abrißinduktionen sind öfter aufgetreten, teils durch Mängel in Abschirmungen hervorgerufen, teils dadurch erklärt, daß die Zentralpunkt-Erdung der Apparatur im extrem trockenen Boden unwirksam ist.

3.2 Probleme der Auswertung

3.21 Laufzeitbestimmung

Die Auswertung der seismischen Feldergebnisse hat sich auf das klassische Prinzip der Laufzeitbestimmung erster Einsätze beschränkt. Von geringen Horizontteufen und damit Laufzeitdifferenzen ganz abgesehen, fehlten für die Anwendung der Korrelationsmethode gebrochener Wellen instrumentelle Voraussetzungen wie Filtereinrichtungen und weitgehende Identität der Einzelkanäle bezüglich Empfindlichkeit und Frequenzgang.

Obwohl mit 35 m s^{-1} Registriergeschwindigkeit eine Ablesegenauigkeit von $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ erreicht wird, sind die Laufzeiten nur auf $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ genau bestimmt worden, weil dies der eigentlichen Meßgenauigkeit entspricht und für die praktische Weiterführung der Auswertung unter den gegebenen Verhältnissen ausreicht. Außerdem sind, wie erwähnt, die Einsätze oft schwach und bei hohem Störpegel ohnehin nicht ganz exakt festzulegen. Teilweise müssen Phasenvergleich der ersten Schwingungsextrema benachbarter Spuren und in Einzelfällen der allgemeine Verlauf zugehöriger Laufzeitkurven herangezogen werden, um undeutliche Einsätze besser erkennen und fixieren zu können oder als unsicher zu verwerfen. Höher getriebene Genauigkeit in der Zeitbestimmung erscheint auch nicht sinnvoll im Hinblick auf die starke Inhomogenität des Untergrundes und die elastischen Eigenschaften der sandigen Deckschicht, da eine Verfälschung der Laufzeiten durch Dispersion nicht ausgeschlossen ist.

3.22 Charakteristika der Laufzeitkurven. Seismische Geschwindigkeiten

Fast alle Laufzeitkurven sind über 170 m Aufstellungslänge mindestens fünfmal geknickt (Anlagen 8, 9, 10, 11). Im letzten Ast spiegelt sich das unruhige Relief des Grundgebirges in einer unregelmäßigen Aufeinanderfolge erster Einsätze wider, die sich nicht durch eine längere Gerade miteinander verbinden lassen. Die Anfangsäste sind teilweise kurz, ihre Neigungswinkel durch nur wenige Punkte belegt. Mitunter ist zweifelhaft, wohin genau Knickpunkte zu legen und ob Kurvenäste reell sind. Soweit nicht Gegen- bzw. Überlappungsschüsse entscheiden, können in derartigen Fällen auch Laufzeitkurven benachbarter Profilabschnitte, überschlägige Tiefenberechnungen und geologische Plausibilität in engen Grenzen zur Klärung herangezogen werden. Jedenfalls ist es nicht angebracht, Laufzeitkurven ohne gewissenhafte Einzeldiskussion aus sehr großzügig zwischen die Meßwerte gelegten mittleren Geraden zu konstruieren, weil dadurch Untergrunddetails verwischt würden, auf die im Rahmen der gestellten Erkundungsaufgabe Wert gelegt werden mußte.

Das Grundgebirge wird meist mit Aufstellungsentfernungen zwischen 80 und 120 m erreicht, und der zugehörige Knickpunkt erscheint dicht beiderseits der Naht zwischen den Hälften der aus „Nah-“ und „Weitschuß“ zusammengesetzten Laufzeitkurve. In einigen ungünstigen Fällen liegt er in der Meßlücke bei 90 m und kann dann allenfalls im Gegenschuß gesucht werden. Liegt in der Naht kein Knick, fügen sich die LZK-Hälften stetig oder mit nur kleinen Sprüngen aneinander. Letztere lassen sich so erklären, daß die Bedingungen für den Wiederholungsschuß in derselben Schußgrube durch Zerstörungsvorarbeiten verändertes Schüsse verändert worden sind.

Die Gegenzeiten stimmen vielfach nicht überein, wahrscheinlich wegen Inhomogenitäten im Untergrund, wie sie schon an der Differenz zwischen den Hin- und den Rückschuß-Geschwindigkeiten der obersten Schicht zu erkennen sind. Darum ist von Parallelverschiebung der Kurvenäste bis zur Gleichheit der Gegenzeiten abgesehen worden.

Die Laufzeitkurven liefern Scheingeschwindigkeiten, aus denen die wahre Geschwindigkeit weder für das Basement noch für die einzelnen Horizonte des Deckgebirges mit befriedigender Genauigkeit ermittelt werden kann. Denn außer Schichtgeschwindigkeit, Tiefenlage und Einfallswinkel gehen in die Scheingeschwindigkeiten in erheblichem Maße noch horizontale Unterschiede in der Verfestigung und petrographischen Beschaffenheit als unbestimmte Parameter ein, für die keine weiteren physikalischen Bestimmungsgrößen vorhanden sind. (Auf die apparativ bedingte Unmöglichkeit, Dämpfungsfaktoren zu ermitteln, ist bereits hingewiesen worden. Das gilt wegen Verzerrungen ebenso für Frequenzbestimmungen.) Man muß sich mit mittleren Geschwindigkeiten als Ersatz für die wahren begnügen und kann im einzelnen über petrographische Ausbildung, fazielle Besonderheiten und Feuchtigkeitsgehalt der Schichten seismisch nichts aussagen.

Aus der Reihe aller gemessenen Geschwindigkeiten heben sich Werte zwischen 5000 und 6000 m s^{-1} , die dem Grundgebirge zugehören, deutlich durch eine Lücke von den niedrigeren Geschwindigkeiten getrennt heraus. Die anderen gehen kontinuierlich ineinander über. Eine Statistik ihrer Verteilung um markante Häufungswerte (Anlage 12) zeigt jedoch, wie sie zu verschiedenen, jeweils einen seismischen Horizont repräsentierenden Geschwindigkeitsgruppen zusammengefaßt werden können. In Zweifelsfällen kann über entsprechende Einordnung einzelner Geschwindigkeiten nach der Tiefe ihres Auftretens entschieden werden. Diese Gruppenbildung ergibt für die sechs refraktierenden Horizonte, deren geologische Deutung in 2.42 diskutiert worden ist, folgende Geschwindigkeiten [9]:

Horizont	Streubereich [m s^{-1}]	Häufungswerte [m s^{-1}]
A	350 ... 850	500, 600
B	700 ... 1100	750, 1000
C	1000 ... 1800	1300
D	1700 ... 2800	1900, 2400
E	2800 ... 3400	3400
F	5000 ... 6000	—

3.23

Tiefenbestimmung der Deckgebirgshorizonte

Die komplizierten Untergrundbedingungen des Meßgebietes bestimmen Art und Genauigkeit der Tiefenberechnung. Zu den oben angeführten Ursachen, die keine Berechnung wahrer Geschwindigkeiten zulassen, kommt noch, daß im erkundeten Bereich durch Wechsellagerung von Tonen und Sanden die Voraussetzung einer Geschwindigkeitszunahme mit der Tiefe ungenügend erfüllt ist und außerdem dünne Schichten überschossen worden sein können. Von Anwendung gebräuchlicher Verfahren, die unter diesen Umständen versagen bzw. trotz erheblichen Zeitaufwandes doch ziemlich ungenau werden, ist abgesehen worden. Die Tiefenberechnung wurde statt dessen unter Rückführung auf ein Zweischichten-Problem mit horizontaler Grenzfläche für jeden refraktierenden Horizont des Deckgebirges näherungsweise durchgeführt.

Die Tiefen sind mit Hilfe der halben Knickpunktentfernung nach der einfachen Beziehung

$$h_n = \frac{x_n}{2} (v_n - v_{n-1})^{\frac{1}{2}} \cdot (v_n + v_{n-1})^{-\frac{1}{2}}$$

berechnet und darin Entfernungen auf 1 m, Geschwindigkeiten auf 50 bzw. 100 m s⁻¹ genau eingesetzt worden. Für v_n ist jeweils die zum Schußpunkt gehörige Scheingeschwindigkeit, die sich aus der Neigung des Astes zwischen x_n und x_{n+1} ergibt, genommen worden, für v_{n-1} eine mittlere Geschwindigkeit, die der Anstieg der Verbindungsgeraden zwischen Schußpunkt und der Laufzeit zu x_n liefert.

Geländekorrekturen sind nicht erforderlich, ebenso kann die Ladungstiefe vernachlässigt werden, weil ihr Effekt kleiner ist als die Berechnungsgenauigkeit.

Im vertikalen Profilschnitt sind die auf 0,5 m genau berechneten Tiefen bei halber Knickpunktentfernung als horizontale refraktierende Elemente eingetragen und durch Verbinden dieser Elemente die Horizonte konstruiert worden. Die sich aus dieser Interpolation ergebenden Neigungen der Horizontabschnitte stimmen qualitativ fast immer mit den Differenzen der Hin- und Rückschuß entsprechenden Scheingeschwindigkeiten überein. Sprünge in LZK-Ästen sind selten und unbedeutend, sie sind ebenfalls nur qualitativ bei Konstruktion der Horizonte berücksichtigt worden (Anlagen 8, 9, 10, 11).

3.24

Tiefenberechnung für das Grundgebirge

In gleicher Weise wie oben für die Horizonte des Deckgebirges beschrieben, wurden für das Grundgebirge „Anfangstiefen“ berechnet, d. h. Tiefen, die sich aus Geschwindigkeitssprung und Knickpunktentfernung x_g ergeben. Als v_{n-1} wurde eine mittlere Scheingeschwindigkeit v_d genommen, die dem Anstieg der Verbindungsgeraden vom Schußpunkt zum Knick bei x_g entspricht, als v_n der Mittelwert v_g . Dieser ergibt sich, wenn man mit einer Geraden durch Anfangs- und Endpunkt des letzten Astes der einzelnen Laufzeitkurven mittlere Scheingeschwindigkeiten v_g des Grundgebirges festlegt und alle v_g eines Profils unter Auslassung extrem hoher Werte mittelt. Das bringt praktisch einen im gesamten Meßgebiet annähernd konstanten Wert $\bar{v}_g \sim 5500 \text{ m s}^{-1}$. Die so berechneten Grundgebirgstiefen wurden im Vertikalprofil nicht bei $\frac{x_g}{2}$, sondern unter einem Punkt eingezeichnet, der durch Vergleich gegenläufiger Laufzeitkurven gefunden wurde und meist bei $x = x_g - 10 \text{ m}$ liegt.

Da der Erkundungsauftrag möglichst genaue Abbildung des Grundgebirgsreliefs verlangt, muß der Horizont zwischen den „Anfangstiefen“ mit Hilfe der unregelmäßig aufeinanderfolgenden Laufzeiten des letzten LZK-Astes weiterverfolgt werden. Bekannte Verfahren der refraktionsseismischen Auswertung können meist nicht zeitlich rationell angesetzt werden, zumal ihre Genauigkeit durch notwendige Vernachlässigungen herabgesetzt wird. Es wurde deshalb ein sehr einfaches Auswerteverfahren benutzt, das mit befriedigender Genauigkeit

die schrittweise Tiefenberechnung mit Hilfe von Neigungselementen des Horizontes ermöglicht und folgendermaßen kurz entwickelt worden ist:

Für den geneigten Zweischichten-Fall mit den wahren Geschwindigkeiten v_0 und v_1 und Einfallswinkel φ gilt

$$\frac{v_0}{v_1'} = \sin(i \mp \varphi), \quad (1)$$

worin v_1' die Scheingeschwindigkeit ist. Mit

$$v_1' = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

folgt aus (1)

$$\sin(i \mp \varphi) = v_0 \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (3)$$

Weiter gilt

$$\sin i = \frac{v_0}{v_1}. \quad (4)$$

Wählt man für Δx den relativ kurzen seismischen Abstand – im vorliegenden Falle also 10 m – und entnimmt der LZK das zugehörige Δt , dann kann näherungsweise $v_0 = v_d$ und $v_1 = \bar{v}_g$ gesetzt werden, so daß (4) einen Näherungswert für i liefert und damit (3) den Neigungswinkel φ , der zum Abschnitt Δt gehört. Dann lassen sich die einzelnen Teufendifferenzen

$$\Delta h = \Delta x \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

berechnen und können in Schritten von Δx , angehängt an die entsprechenden „Anfangstiefen“, als Folge von Tiefenlagepunkten in das Vertikalprofil eingetragen werden.

Da das Verfahren für alle Laufzeitkurven durchgeführt wird, ergeben sich durch Verbinden der Tiefenlagepunkte Kurven, die sich zwei- bis dreifach überlagern. Sie fallen praktisch zusammen, wenn die Anfangstiefe richtig bestimmt wurde. Das ist stets der Fall, wenn sie sich auf ein horizontales oder nur schwach geneigtes Flächenelement des Horizontes bezieht. Auf Oberflächen mit stärkerer Neigung ($\varphi > 20^\circ$) bezogene Anfangstiefen sind unsicher; an sie angehängte Kurven werden daher in der Höhe bis zur Deckung mit überlappenden Teilen anderer Kurven verschoben. Teilweise ist auch seitliche Verschiebung um wenige Meter erforderlich und vertretbar. Zeigt sich im Gesamtverlauf aller Kurven eines Profils, daß dem Anstieg in einer Richtung nicht der Abstieg in der Gegenrichtung entspricht – also $(-\varphi_{\text{hin}}) \neq (+\varphi_{\text{rück}})$ – dann genügt offensichtlich die Näherung für i nicht. Durch geeignete Wahl von \bar{v}_g muß sie verbessert und die Berechnung für das gesamte Profil wiederholt werden. Praktisch sind solche Fälle kaum aufgetreten. Die Kurven decken sich so weit, daß sie selten mehr als 3 m in der Teufe voneinander abweichen, und es war stets möglich, den Tiefenverlauf der Grundgebirgsoberfläche ausreichend genau anzugeben. Das Verfahren versagt erst bei etwa $\varphi > 30^\circ$. Daher konnten die tiefliegenden Soh-

len einiger steilflankiger, enger Senken nicht erfaßt und für sie nur Mindesttiefen angegeben werden (Anlagen 8, 9, 10, 11).

3.25 *Vergleich der seismischen Horizonte mit Bohrprofilen*

In Anlage 13 werden die Tiefen seismischer Horizonte mit den Schichtprofilen von Bohrungen verglichen, die auf bzw. dicht neben seismisch vermessenen Linien stehen (vgl. Anlage 1).

Bei Gegenüberstellung ist zu berücksichtigen, daß die Bohrschichtenverzeichnisse nach Probenahmen mit der Schlammbüchse aufgestellt und die Angaben nicht absolut zuverlässig sind. Möglich ist, daß Schichtgrenzen teilweise übersehen oder verwischt und verschiedene Schichten nicht petrographisch exakt bezeichnet worden sind. Angaben über Verfestigungsgrad oder Feuchtigkeitsgehalt liefern derartige Bohrproben ohnehin nicht, und ihre Teufenmessungen schließen eine Unsicherheit von ± 1 m ein.

Trotzdem stimmen Bohr- und seismische Befunde in der Teufenlage der Basementoberfläche gut überein, abgesehen von B 7/55, B 1/56 und B 1/57, in denen entweder Bohrung oder Seismik bzw. beide das Grundgebirge nicht erreicht haben. Die auf Bohrangaben bezogene mittlere relative Abweichung der seismischen Tiefenberechnung beträgt 3,5 %, wenn man B 9/56 und B 2/56 ausschließt, weil in diesen vom Bohrmeister offensichtlich ein Geröllhorizont als „Fels“ angesprochen worden ist.

Mit den im Deckgebirge durchteuften Schichten lassen sich die seismischen Horizonte nur teilweise gut korrelieren. Gut stimmt die Tiefenlage des Horizontes E mit den Bohrprofilen B 9/56, B 1/57, B 1/56 und B 7/55 überein, befriedigend Horizont D mit B 7/56, B 5/55, B 9/56 und B 1/57, ebenfalls Horizont B mit B 17/56 [9].

3.3 Technische und allgemeine Bemerkungen

3.31 *Refraktionsapparatur*

Daß die seismische Ausrüstung im Sudan schwer beschädigt eintraf und unter schwierigen Bedingungen instandgesetzt wurde, ist schon erwähnt worden. Während der Feldarbeit haben sich dann noch öfters Leitungs-, Kontakt- und Röhrenfehler als latente Reste der Transportschäden eingestellt. Weitere Betriebsstörungen sind vor allem im Registriergerät dadurch eingetreten, daß verletzte Oszillographenschleifen und Glieder der Optik behelfsmäßig justiert und mitverwandt werden mußten.

Von diesen durch außergewöhnliche Einflüsse bedingten Störungen abgesehen, hat die Apparatur befriedigend gearbeitet und sich im Tropeneinsatz grundsätzlich bewährt. Vertaubung einiger Elektrolytkondensatoren und rasches, die Kollektorstörungen vergrößerndes Heißlaufen der Umformer sind als einzige Auswirkungen der hohen Umgebungstemperatur festgestellt worden. Verschmutzung und Verschleiß bewegter Teile durch den Quarzstaubgehalt der Luft sind in erträglichen Grenzen geblieben, der Paßsitz der Filmkassetten hat sich allerdings zunehmend verschlechtert.

Alle Reparaturen können natürlich nur am Einsatzort, unter sehr primitiven Verhältnissen und mit beschränkten, feldmäßigen Hilfsmitteln durchgeführt werden. Im Lande selbst ist Ersatzmaterial praktisch nicht zu beschaffen. (Z. B. mußten Nägel mit aufgeschnittenem Gewinde fehlende Schrauben M 3 notdürftig ersetzen.) Damit die Zeit für Instandsetzungsarbeiten minimal bleibt und die Einsatzbereitschaft unter allen Umständen aufrechterhalten werden kann, ist unerlässlich, daß die Ausrüstung ein sorgfältig ausgewähltes Reserve-sortiment von kompletten Teilgeräten bis zu vorgeprüften Röhren und einfachsten Bauelementen einschließt, selbstverständlich auch reichhaltige Sätze von feinmechanischen bis zu Schlosserwerkzeugen, Meßgeräte und technische Unterlagen. (Da dem Trupp beispielsweise ein Tonfrequenzgenerator fehlte und auch Normalfrequenzen von Rundfunksendern nicht zu empfangen waren, blieb unsicher, ob die Steuerfrequenz des Zeitmarkengebers durch mechanische Beanspruchung auf dem Hintransport verändert worden ist. Wie erst später festgestellt werden konnte, ist das nicht der Fall gewesen.) [10].

3.32

Kraftfahrzeuge

Die beiden Kraftfahrzeuge des Trupps sind ohne nennenswerte Ausfallzeiten ständig gelaufen und haben allen Anforderungen des Einsatzes genügt. Der LKW „Granit“ erwies sich als genügend geländegängig, doch war seine Maschine für Sandfahrten mit normaler Last zu schwach. Er konnte praktisch nur mit Zwischengetriebe und nie länger als etwa eine halbe Stunde ohne Pause gefahren werden, da die Luftkühlung selbst bei gemäßigten Nachttemperaturen nicht ausreicht. Für die kurzen Strecken im Meßgebiet und den täglichen Anmarschweg ist dies nicht ins Gewicht gefallen, und auf größere Fahrten ist der Kabinenwagen während laufender Feldarbeiten zur Schonung der eingebauten Refraktionsapparatur nicht geschickt worden. Für den Versorgungsverkehr zwischen El Obeid und Mazroub wurden Mietfahrzeuge eingesetzt.

Um bei einem derartigen Erkundungsunternehmen mit so beschränkter Kraftfahrzeugausstattung diese erforderlichenfalls elastischer einsetzen zu können, erscheint es günstiger, die Apparatur in einem geeigneten leichten 2-Rad-Hänger unterzubringen. Man kann dann Feldbetrieb und Versorgungsfahrten selbst bei längerem Ausfall eines Motorfahrzeuges immerhin noch mit dem anderen allein durchführen, und es wäre auch besser gesichert, daß der halbe Tagesreisen und weiter von Nachrichtenmitteln und ärztlicher Hilfe abgesetzte Trupp immer über wenigstens ein Kraftfahrzeug verfügt, das für einen Not-einsatz rasch entlastet werden kann.

3.33

Organisation der seismischen Arbeit

Beschränkte Personalstärke des seismischen Trupps und Umfang der anfallenden Arbeit haben spezielle Einteilung von Zeit und Kräften erforderlich gemacht. Wie erwähnt, konnte die problematische Auswertung mit dem Fortgang der Geländearbeiten schwer Schritt halten, auch hat die Instandhaltung der

Apparatur viel Zeit beansprucht. Erfahrungsgemäß war folgende Arbeitsteilung die günstigste:

An drei Tagen der Woche wurde mit zwei Mann im Gelände geschossen, während der Truppleiter vorwiegend mit Auswertung beschäftigt im Lager blieb. Über täglich sechsstündige Arbeitszeit im Gelände hinaus, die unter den klimatischen Bedingungen als Höchstmaß auch für Europäer gilt, ist – teils erst nach Einbruch der Dunkelheit – weitere Zeit an Auswertung, dringende kleinere Reparaturen und Arbeitsvorbereitungen für den nächsten Schießtag gewandt worden. Die zweite Wochenhälfte wurde für restliche Auswertung und größere Instandsetzungsarbeiten freigehalten. Der Schießmeister führte währenddessen Versorgungsfahrten nach El Obeid zum Nachholen von Sprengstoff und Versorgungsgütern durch oder beaufsichtigte Einmessen und Ausheben von Schußgruben. Um die Erkundungsarbeit möglichst schnell voranzutreiben, wurde in den ersten Einsatzmonaten auch an den meisten Wochenruhe- und Feiertagen gearbeitet. Diese Regelung brachte optimalen Arbeitsfortschritt.

Mit allgemeinen Verwaltungsaufgaben und Besetzung der Nachschubbasis in El Obeid waren die Truppangehörigen nicht belastet. Ein völlig auf sich allein gestellter seismischer Meßtrupp müßte dagegen personell um wenigstens zwei Mann stärker und so universell zusammengesetzt sein, daß in Krankheitsfällen bzw. bei Unfällen Ersatz für jede Spezialfunktion innerhalb des Trupps vorhanden ist. Die mit derartigen Erkundungseinsätzen verbundene erhöhte gesundheitliche Gefährdung macht es außerdem erforderlich, daß sich ein Arzt beim Trupp selbst oder in seiner Nähe befindet.

Das eingeborene Hilfspersonal zählte zunächst neun Mann, später sechs, die voll ausgelastet waren. Es war günstig, daß der Trupp bei der Anwerbung auf Leute zurückgreifen konnte, die bereits von der wasserwirtschaftlichen Arbeitsgruppe für tauglich befunden und als Bohrarbeiter beschäftigt worden waren. Denn obwohl Hilfskräfte sich in großer Zahl anbieten, ist über Auswahl der Bestgeeigneten schwierig zu entscheiden, solange man noch nicht zu tieferem Verständnis für die andersgeartete Lebensweise und Mentalität der sudanesischen Menschen und ihrer spezifischen Leistungsfähigkeit gelangt ist. Für technische Vorgänge und Einrichtungen besitzen sie lebhaftes Interesse, doch beschränkt verständlicherweise der Bildungsstand der meisten ihre Verwendbarkeit auf unkomplizierte manuelle Tätigkeit. Diese wurde ihnen erleichtert, indem jedem Einzelnen ganz bestimmte Verrichtungen fest zugeteilt und einexerziert waren. Den Schriftunkundigen halfen Farbmarkierungen an Kabeln und Geophonen, zwischen den seismischen Kanälen zu unterscheiden. Ständige Kontrolle der Arbeitsleistung und geeignete Auswahl in Verbindung mit einer Menschenbehandlung, die vom Verständnis für nationale und religiöse Empfindungen der Sudanesen getragen und durch Aneignung von Grundkenntnissen der arabischen Sprache sehr gefördert wird, haben für den Trupp einen Stamm eingeborener Mitarbeiter gewonnen, der seine Aufgabe erfüllt, die nach landläufigem Begriff sehr ausgedehnte sechsstündige Arbeitszeit durchgehalten und dem deutschen Personal herzliche Anhänglichkeit bewiesen hat.

Die vorliegende Arbeit behandelt den Sondereinsatz eines refraktionsseismischen Erkundungstrupps im Hochland des Kordofan (Republik Sudan), der nach üblichen Methoden, aber unter außergewöhnlichen Bedingungen zur Wasserfindung in Trockengebieten durchgeführt worden ist.

Zum Verständnis der Verhältnisse, die diesen Erkundungsauftrag begründet und ihm das besondere Gepräge gegeben haben, wird ein Überblick über die Situation in diesem Lande und die natürlichen Voraussetzungen des Meßgebietes vorangestellt. Auch vorausgegangene Wasserprospektionen und geophysikalische Untersuchungen werden behandelt, soweit Informationen darüber vorgelegen haben.

Vorbereitung und Durchführung der refraktionsseismischen Untersuchungen werden in Berichtform beschrieben, ihre Ergebnisse bis zu den hydrologischen Konsequenzen für das wasserwirtschaftliche Objekt diskutiert und in Tiefenlageplänen der refraktierenden Horizonte festgehalten.

Spezielle Abschnitte sind Besonderheiten der Geländearbeit gewidmet und der Problematik der Auswertung, die die Anwendung vereinfachter Näherungsverfahren notwendig gemacht hat. Typische Laufzeitkurven werden als Beispiele vorgelegt. Es wird gezeigt, daß die Gegenüberstellung von seismischen Befunden und vergleichbaren Bohrprofilen relativ gute Übereinstimmung und eine weitere Bestätigung dafür liefert, daß das refraktionsseismische Verfahren mit Erfolg angewandt worden ist. Die Einzelbetrachtungen werden mit einigen ergänzenden Bemerkungen zur technischen Ausrüstung und Arbeitsorganisation abgeschlossen.

Der Abschluß vorliegender Arbeit gibt dem Verfasser willkommene Gelegenheit, den besonderen Dank auszudrücken, zu dem er sich seinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. phil. O. MEISSER, Direktor des Instituts für Angewandte Geophysik der Bergakademie Freiberg, für wissenschaftliche Förderung und allseitige praktische Hilfe verpflichtet weiß.

Dankend sei auch erwähnt, daß Mitarbeiter seines Instituts und Frl. Müller die technische Fertigstellung der Arbeit unterstützt haben und Herr Ch. KNOTHE seine Sondierungsergebnisse freundlicherweise zur Verfügung stellte. Herrn Dr. H. RISCHE ist der Verfasser für Mitteilung fachlicher Erfahrungen, Beiträge persönlichen Materials und die in allen Situationen des afrikanischen Lebens bewiesene Kameradschaft in herzlicher Dankbarkeit verbunden.

Literatur

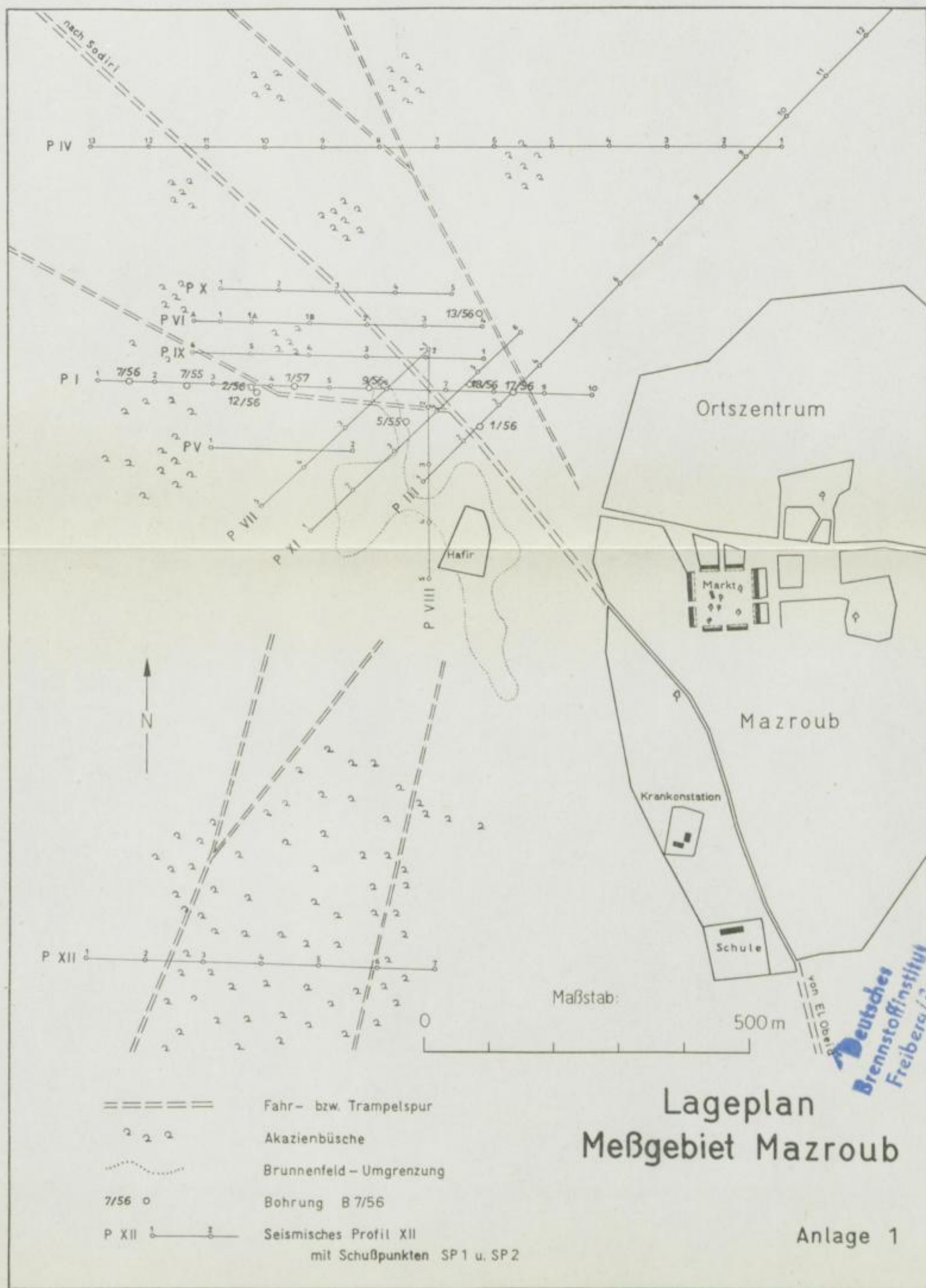
- [1] ANDREW, G.: Geological Survey of the Anglo-Egyptian Sudan, a) Report for 1950—1952, b) Report for 1952—1953. Sudan Government/Geological Survey, Khartoum 1953/54.
- [2] HÜBNER, H.: Landbewässerung und Wasserversorgung im Sudan als Beispiel für die Voraussetzungen für die wirtschaftliche Entwicklung semiarider Gebiete Afrikas. Wasserwirtschaft und Wassertechnik, Berlin 6 (1956) 6, S. 167—177.
- [3] ROST, M.: Grundsätzliches zur allgemeinen und speziellen geologischen Wassererkundung in Darfur und Kordofan (Republik Sudan). Ztschr. f. Angew. Geologie 2 (1956) 5/6, S. 195—211.
- [4] TOTHILL, J. D.: Agriculture in the Sudan, London 1954. Kap. IV: The Vegetation of the Sudan (ANDREWS), Kap. V: The Climate of the Sudan (IRELAND), Kap. VI: Geology of the Sudan (ANDREW), S. 32—128.
- [5] Sudan Almanac 1957. Khartoum 1957.

Unveröffentlicht:

- [6] Summary of Ground-water Work carried out by Geological Survey in the Vicinity of Sodiri. Ministry of Mineral Resources/Geological Survey Department, Khartoum 1956.
- [7] DURHACK, H.; RISCHE, H.: Ergebnisbericht zur Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse im Raum Mazroub, Provinz Kordofan (Vorläufiger Ergebnisbericht). El Obeid 1957.
- [8] KNOTHE, CH.: Geophysikalische Arbeiten im Gebiet Mazroub, 1955.
- [9] RISCHE, H.: Abschlußbericht über refraktionsseismische Untersuchungen im Raum Mazroub/Sudan, 1956/57.
- [10] SCHUSTER, K.: Interne Mitteilungen über Einsatz einer achtspurigen refraktionsseismischen Apparatur vom VEB Geogerätewerk Brieselang im Kordofan/Republik Sudan. El Obeid 1957.

Verzeichnis der Anlagen

- Anlage 1: Lageplan Meßgebiet Mazroub (nach RISCHE [9])
Anlage 2: Tiefenlageplan Horizont F (nach RISCHE [9])
Anlage 3: Ausdehnung und Tiefenlage Horizont E (nach RISCHE [9])
Anlage 4: Ausdehnung und Tiefenlage Horizont D (nach RISCHE [9])
Anlage 5: Ausdehnung und Tiefenlage Horizont C (nach RISCHE [9])
Anlage 6: Ausdehnung und Tiefenlage Horizont B (nach RISCHE [9])
Anlage 7: Flächenverteilung der Geschwindigkeiten im Horizont A
(nach RISCHE [9])
Anlage 8: Laufzeitkurven und refraktierende Horizonte – Profil I
Anlage 9: Laufzeitkurven und refraktierende Horizonte – Profil III
Anlage 10: Laufzeitkurven und refraktierende Horizonte – Profil IV
Anlage 11: Laufzeitkurven und refraktierende Horizonte – Profil XII
Anlage 12: Verteilungsstatistik der Scheingeschwindigkeiten (nach RISCHE [9])
Anlage 13: Vergleich refraktierender Horizonte mit Bohrprofilen
(nach RISCHE [9])



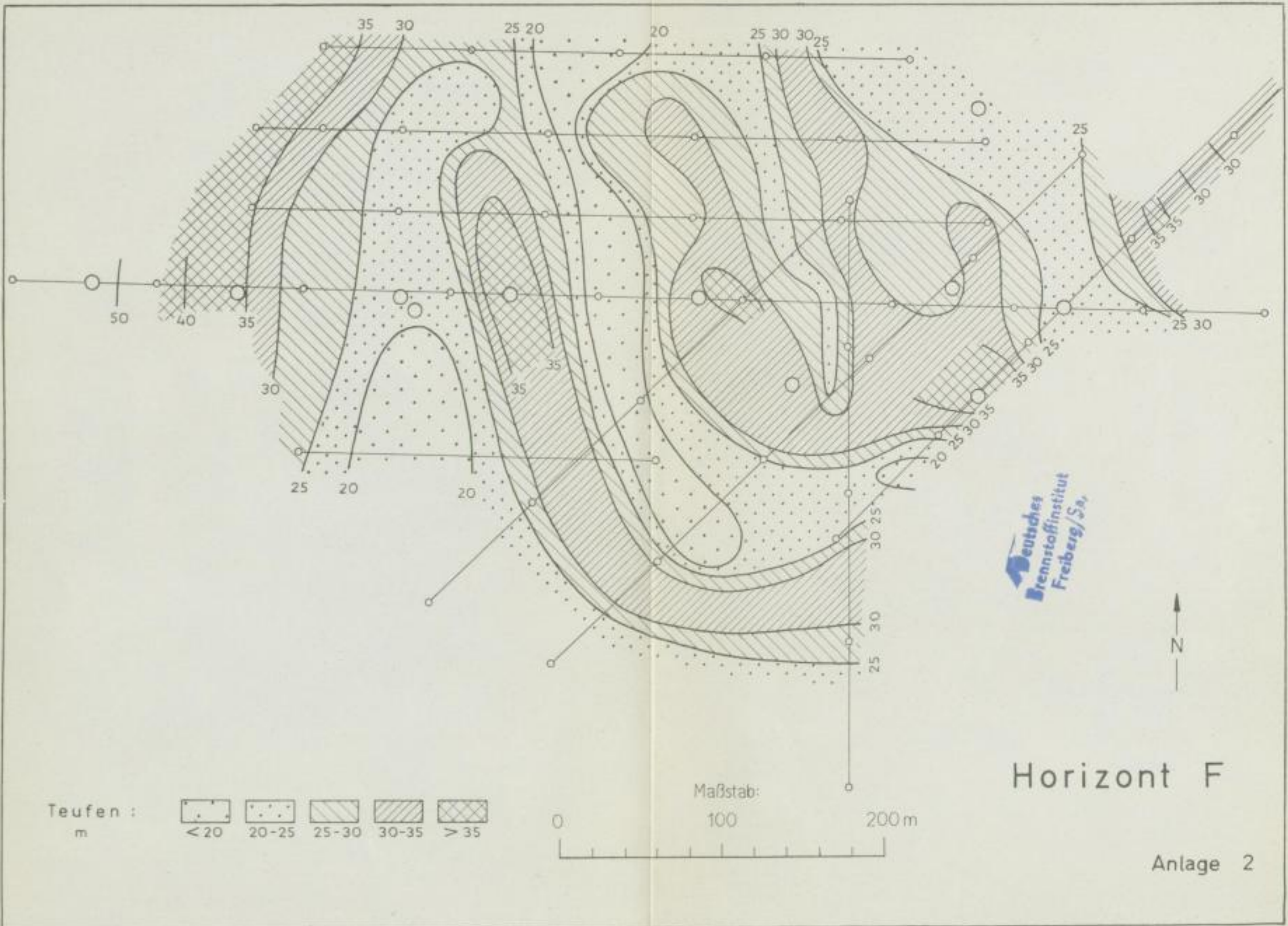
- ==== Fahr- bzw. Trampelspur
- 2 2 2 Akazienbüsche
- Brunnenfeld - Umgrenzung
- 7/56 o Bohrung B 7/56
- P. XII — Seismisches Profil XII
mit Schußpunkten SP 1 u. SP 2

Lageplan Meßgebiet Mazroub

Anlage 1

Faint header text at the top of the page, possibly a page number or title.

Faint, illegible text or markings in the lower-left quadrant of the page.



Deutsches
 Brennstoffinstitut
 Freiberg/Sa.

Horizont F

Anlage 2

1848

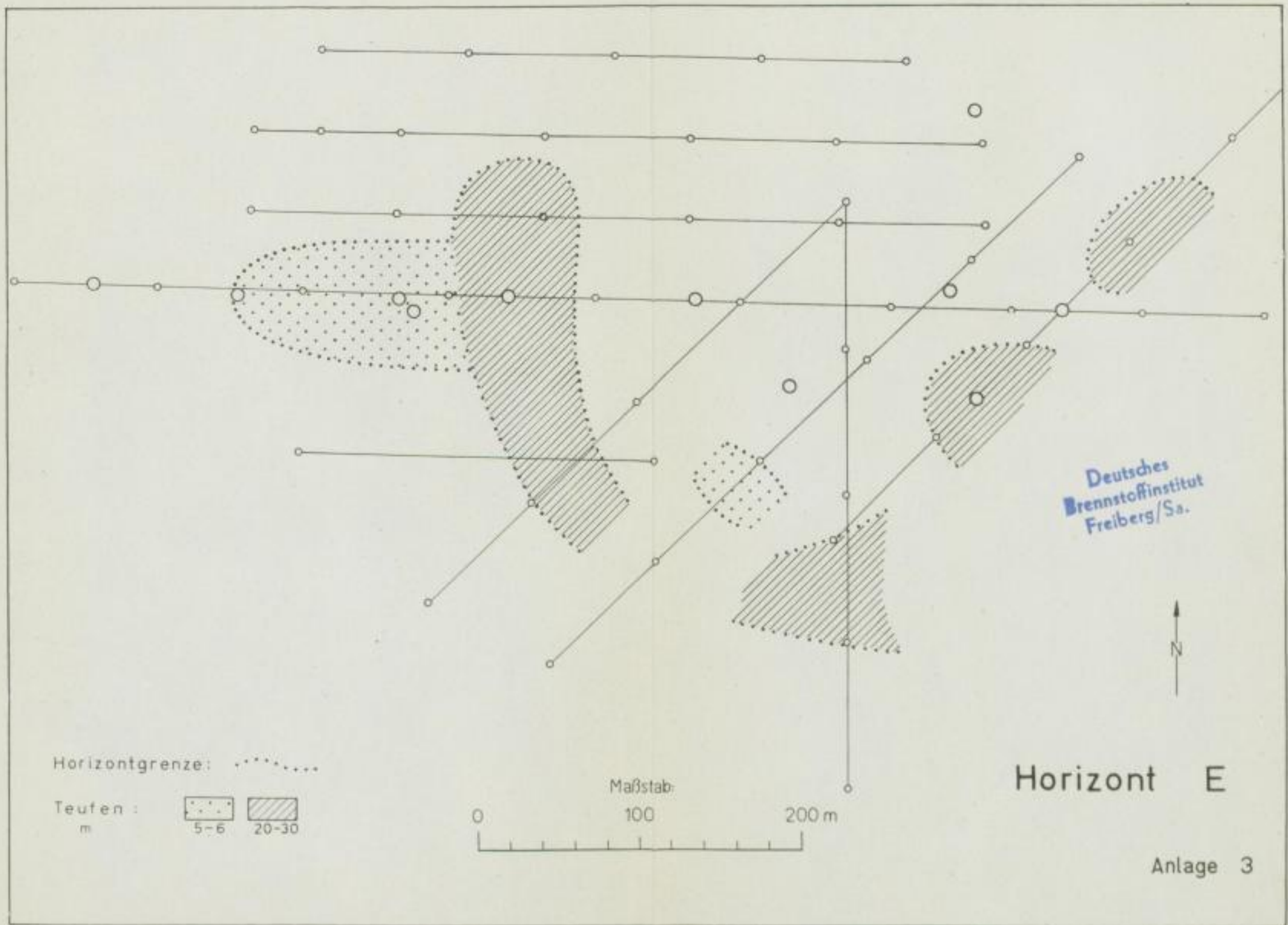


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





Faint, illegible text or markings on the left page of the document.

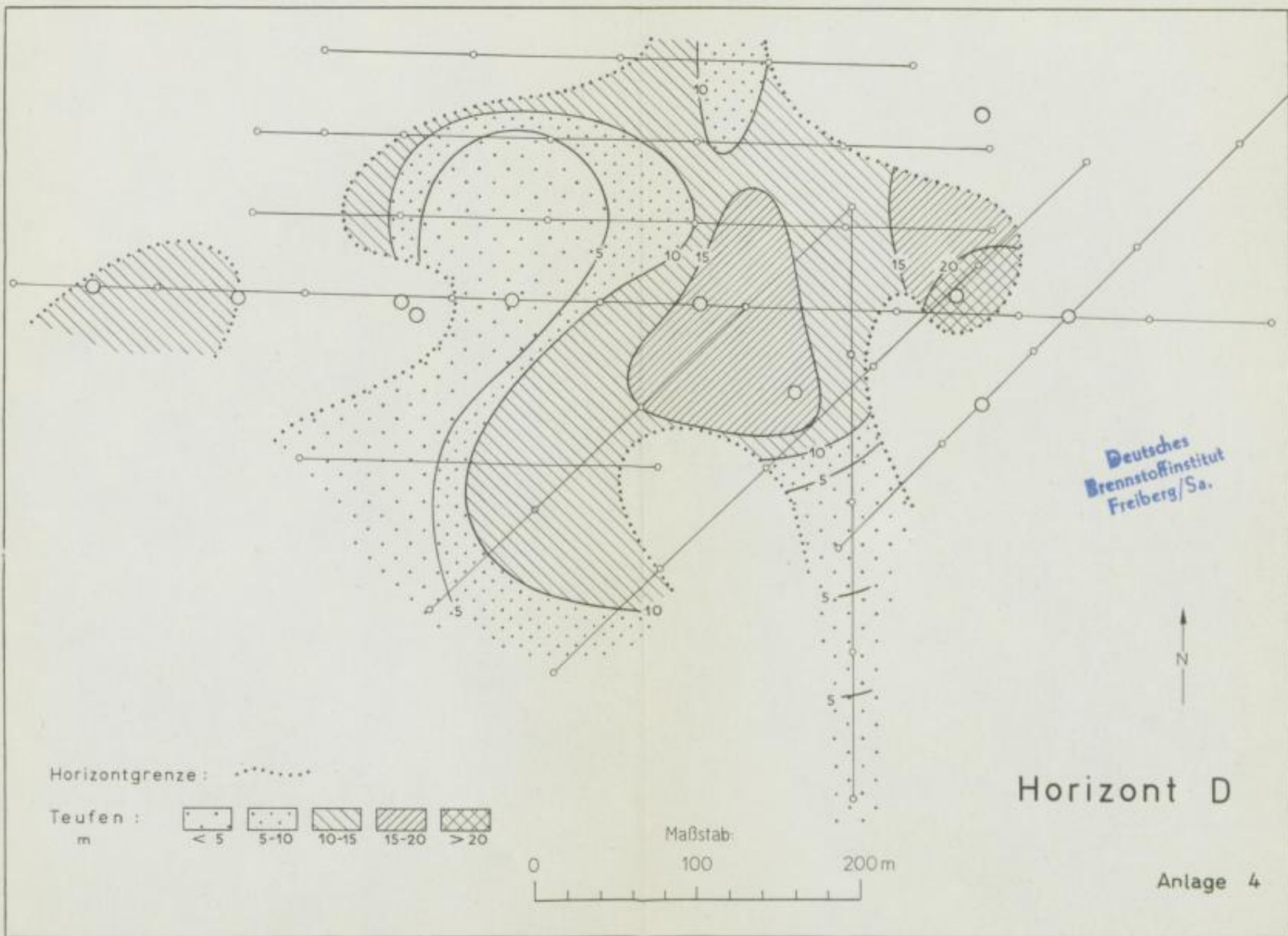


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





[Faint, illegible text]

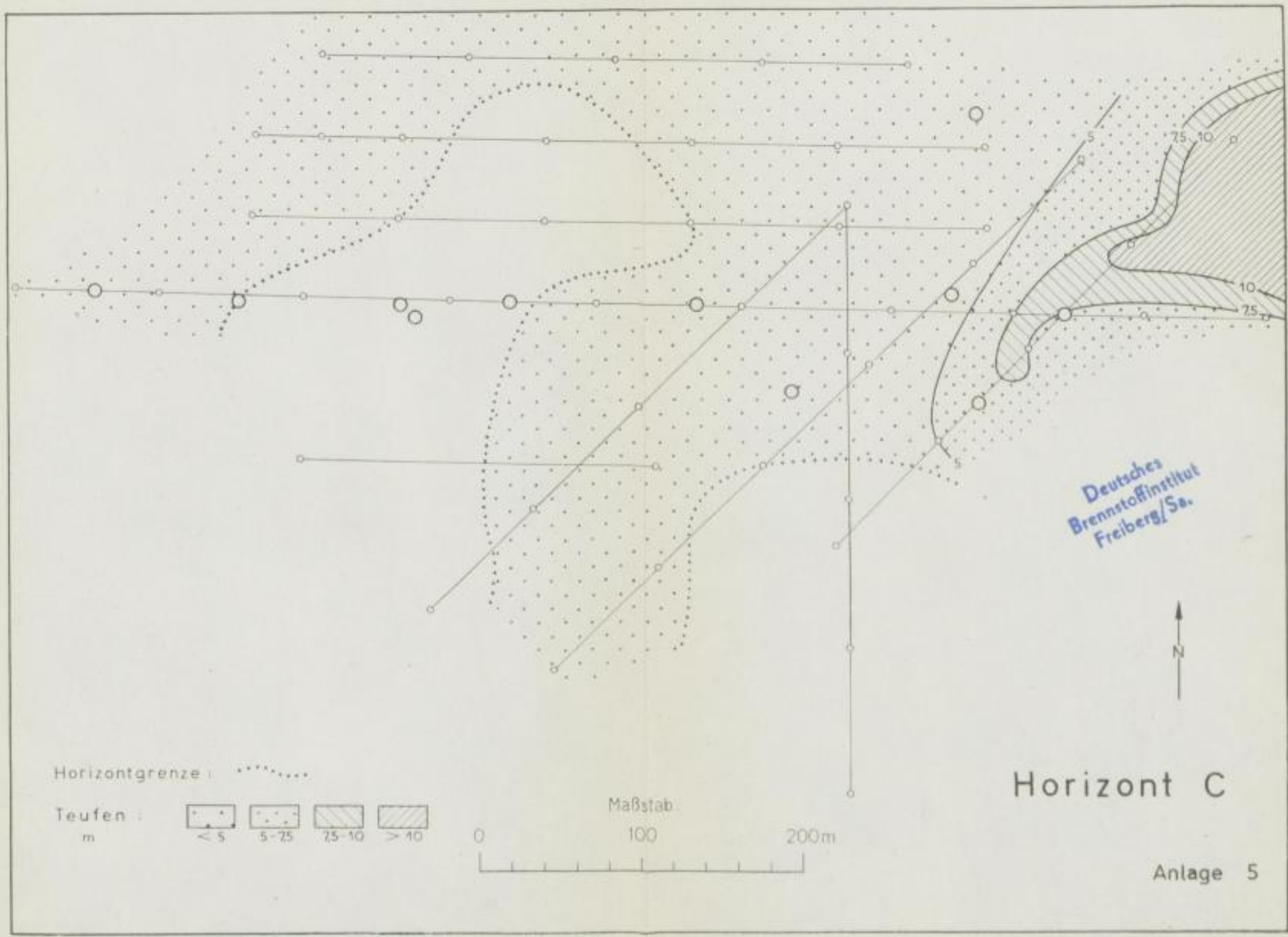


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





Unklar
Sonderausgabe
Freiburg

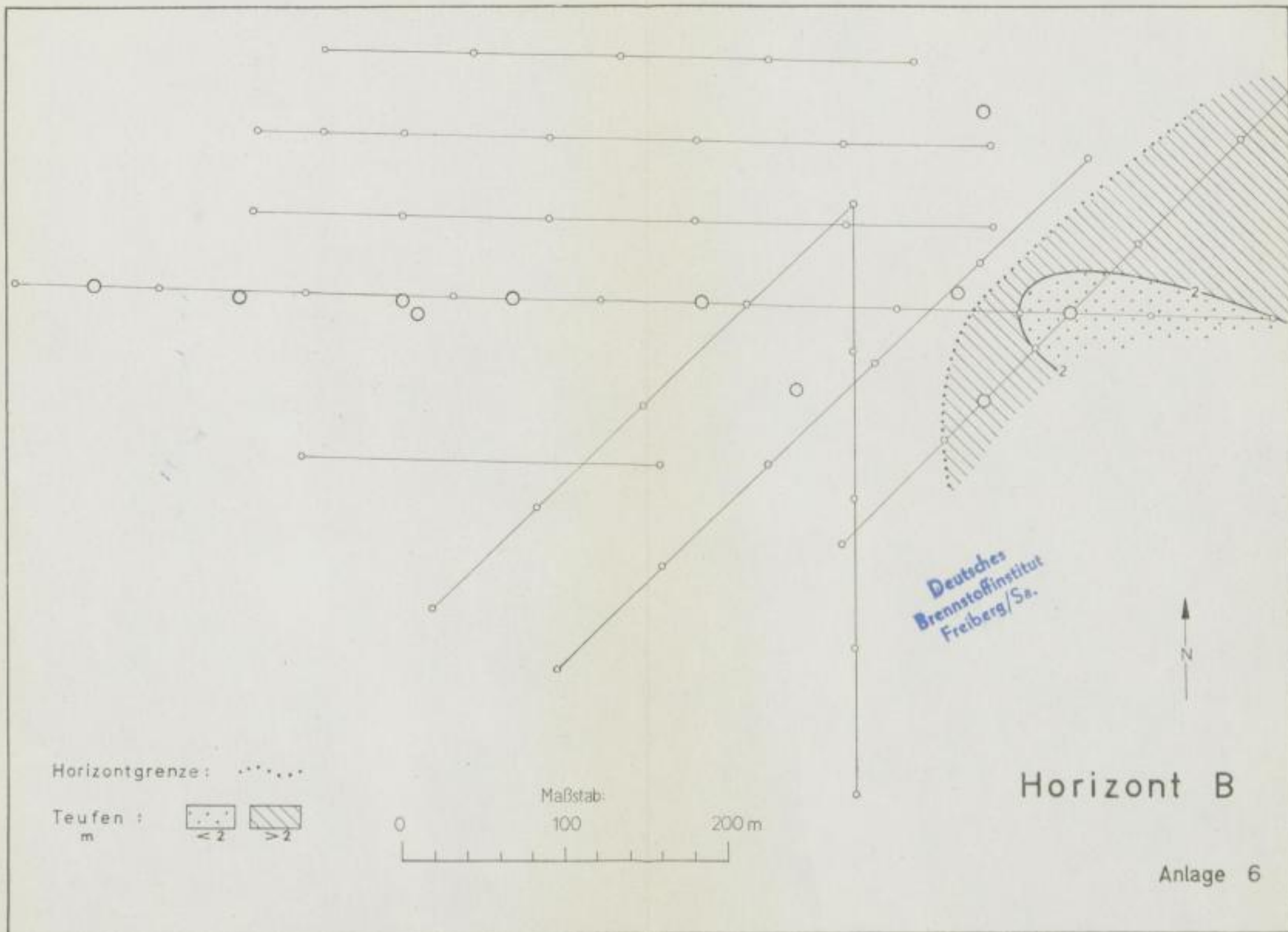


SLUB

Wir führen Wissen.

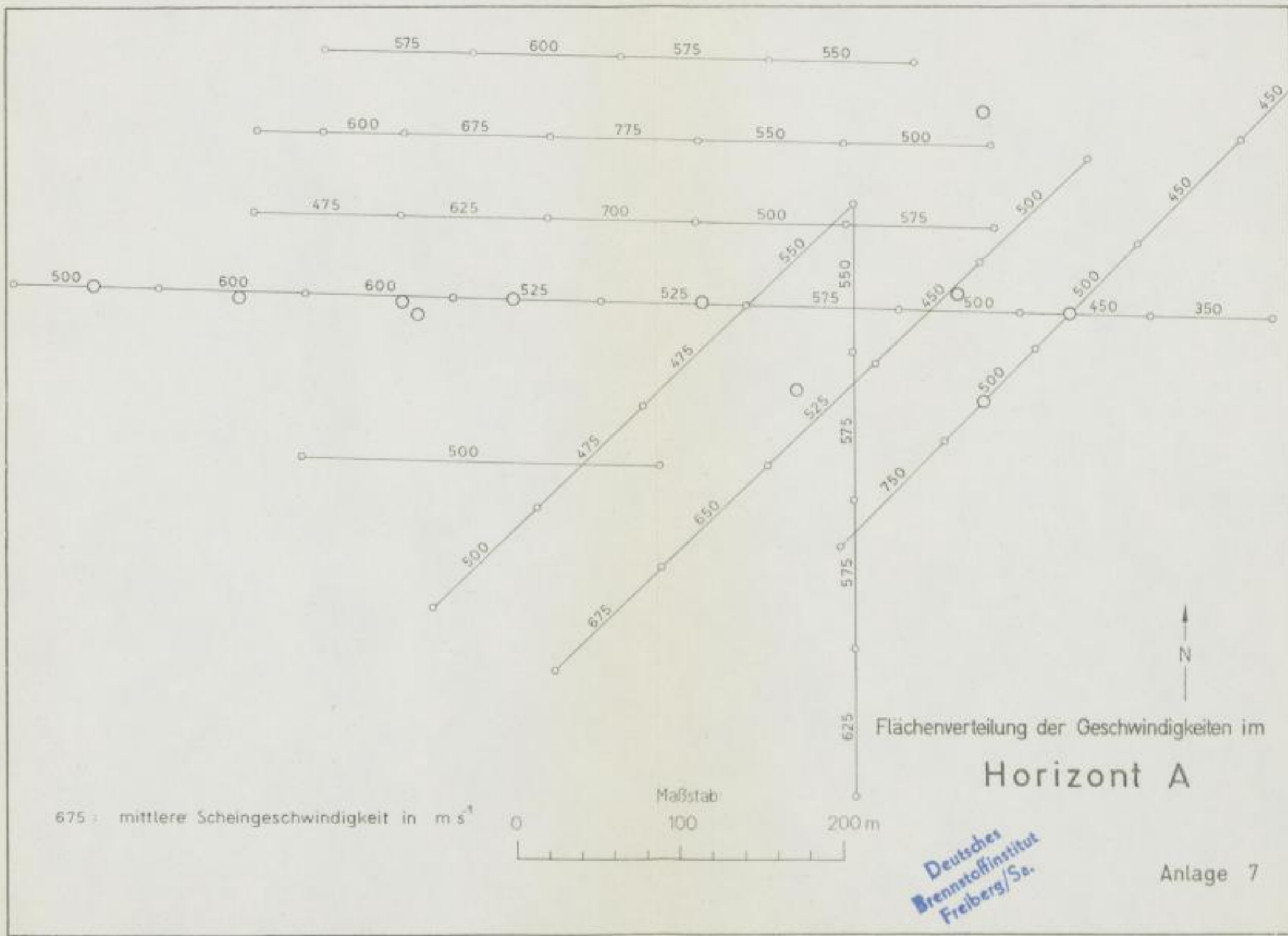
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





Handwritten text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is faint and difficult to decipher but appears to contain several lines of writing.





Faint, illegible markings or bleed-through from the reverse side of the page.

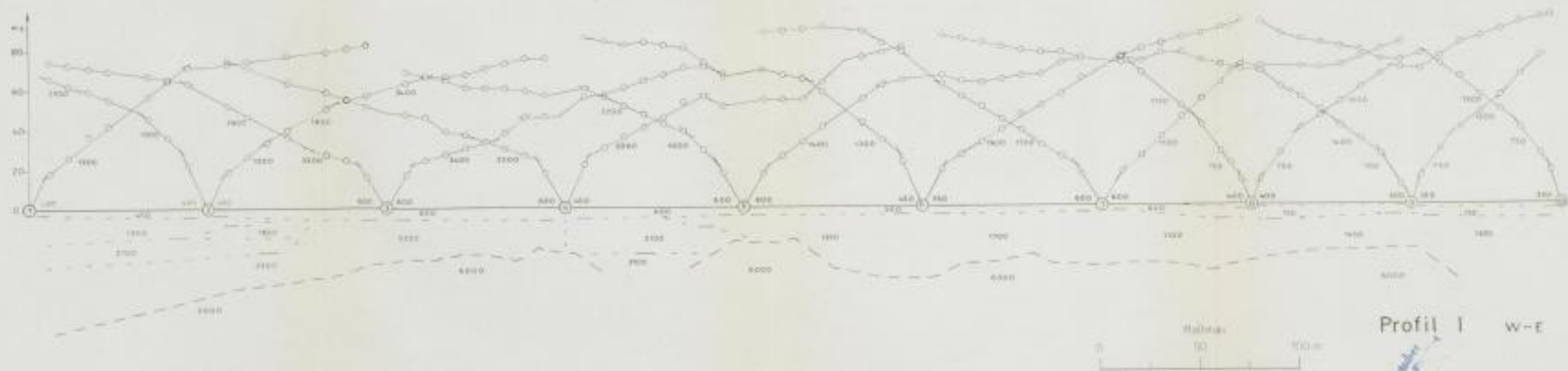


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





Profil I w-t

Anlage 8



SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



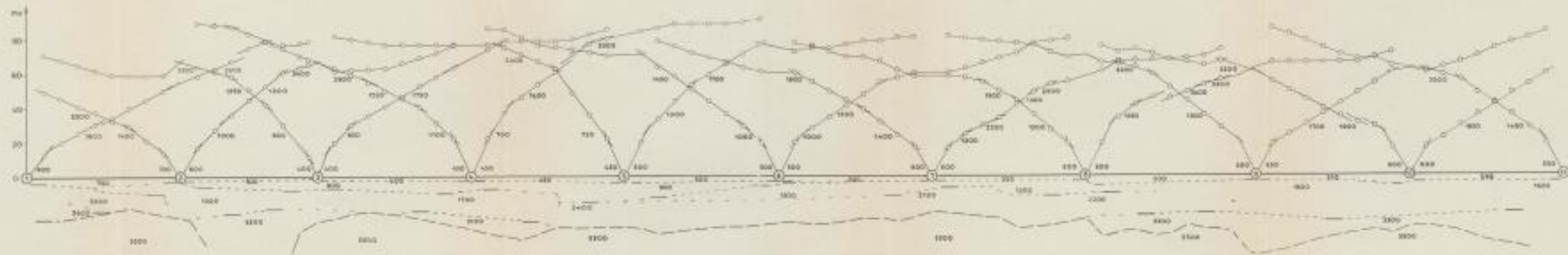


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





Profil III SW-NE



Anlage 9

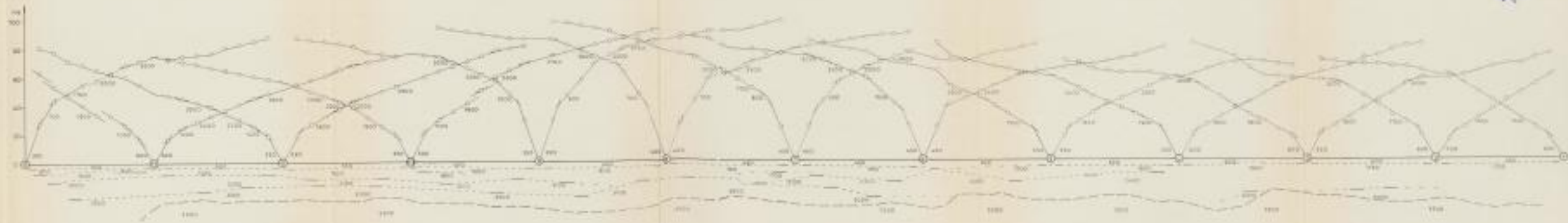


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





Profil IV W-E



Arbeits 10

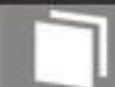


SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





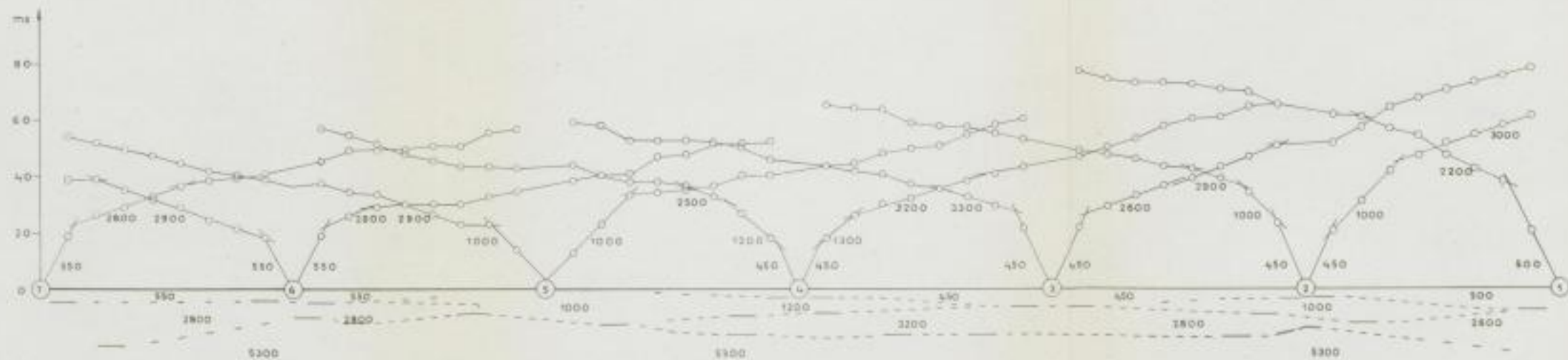
SLUB

Wir führen Wissen.

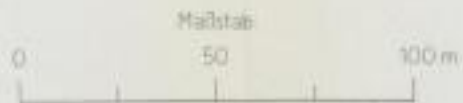
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



Deutsches
Brennstoffinstitut
Freiberg/Sa.



Profil XII w-E



Anlage 11

111

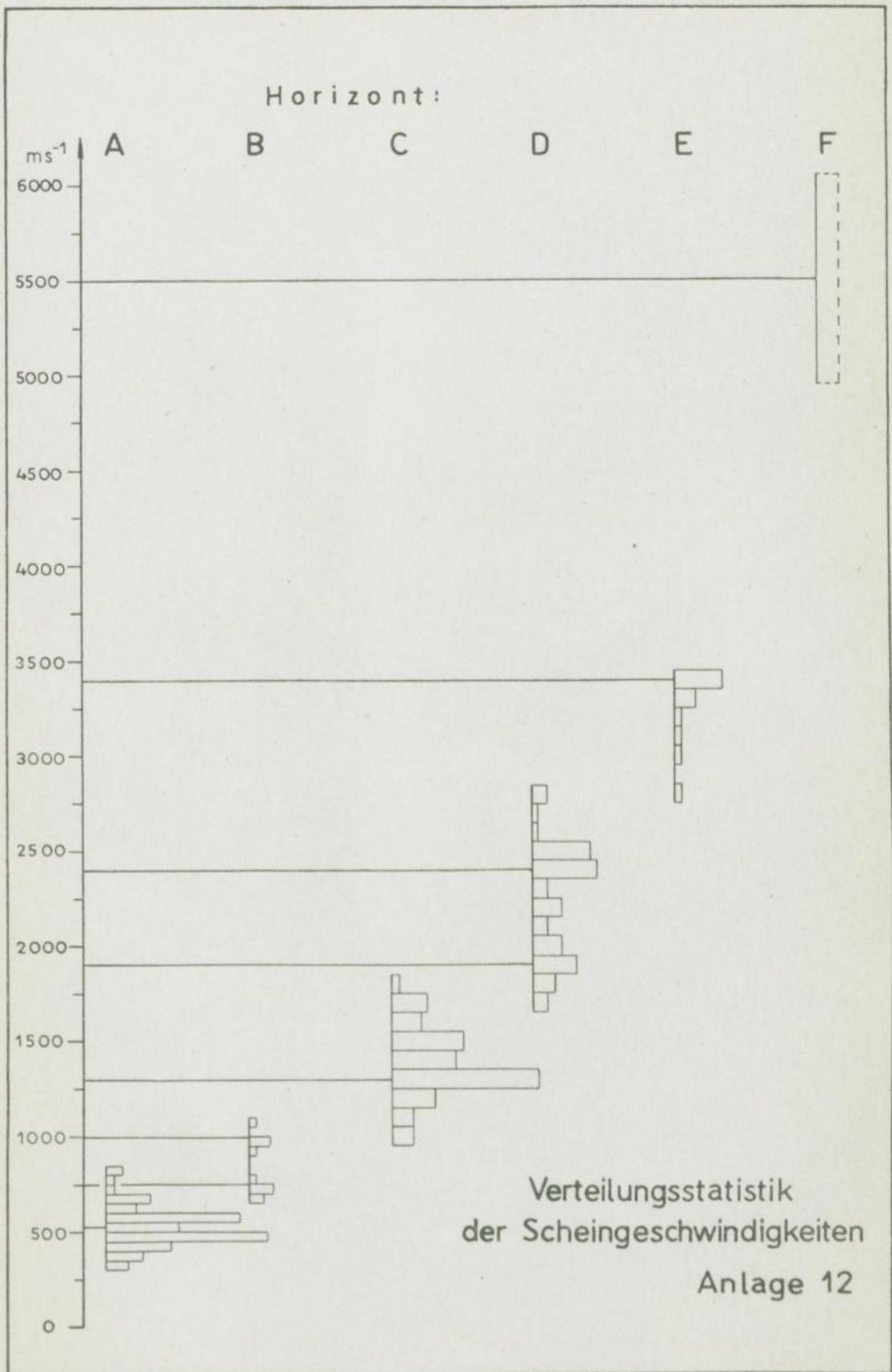


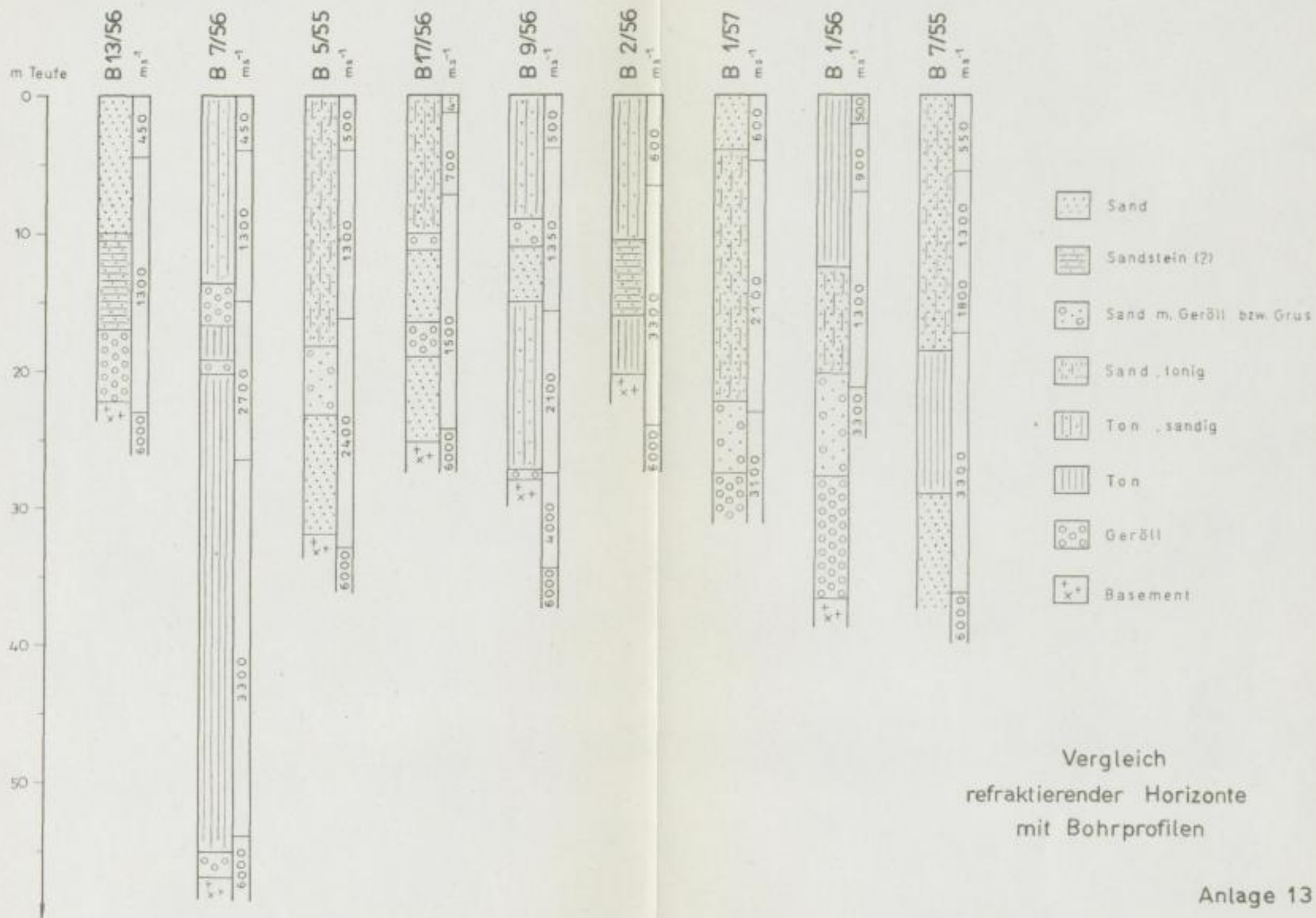
SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG







✓

FRIBERG GOLF TOURNEE

...

...

...

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

C 51

Geophysik

CHRISTIAN TEUPSER

Der Rückwirkungsfaktor bei elektrodynamischen Erschütterungsmessern

Format 17×24 cm — 64 Seiten — 24 Bilder — 9 Tabellen

DM 5,—

Die Rückwirkung der Galvanometerbewegung auf die Seismometerbewegung wird für beliebig abgestimmte elektrodynamische Erschütterungsmesser mit Hilfe der Laplace-Transformation untersucht. Zur Lösung dieses Problems werden anstelle der Eigenfrequenzen und Dämpfungen die Phasenwinkel in die Rechnung eingeführt. Ein höchstzulässiger Rückwirkungsfaktor kann für jede Abstimmung so abgegeben werden, daß die Aufzeichnung des Systems nicht verfälscht wird. Bei Stationsseismographen nach Golizyn hat der Rückwirkungsfaktor den größten Einfluß, während er bei den üblichen elektrodynamischen Geschwindigkeitsmessern stets vernachlässigt werden darf. Methoden zur Bestimmung der Vergrößerung und des Rückwirkungsgrades werden dargelegt und bei der Eichung von zwei Nahbebeninstrumenten angewandt.

A K A D E M I E - V E R L A G · B E R L I N