

**BOHRLOCHGEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN IM
LOCKERGESTEINSBEREICH
- BESONDERHEITEN, ERGEBNISSE UND PROBLEME -**

J. Schön

Zusammenfassung

Auch im Lockergesteinsbereich ist eine lithologische Gliederung des Profils anhand von Bohrlochmessungen mit hoher Aussagesicherheit möglich; dabei sind die sinnvolle Einordnung der Bohrlochmessung in den Erkundungsprozeß und eine komplexe Interpretation aller vorliegenden Informationen entscheidend für den Erfolg. Die digitale Registriertechnik ermöglicht eine rationelle rechnergestützte Bearbeitung, die auch statistische Methoden einzubeziehen gestattet. In Verbindung mit der Entwicklung auf dem Gebiet der Sensortechnik werden damit prinzipiell neue Wege und erweiterte Möglichkeiten einer petrographisch bzw. stofflich-strukturellen Charakterisierung des Gesteins eröffnet.

Die Ableitung von Kennwerten aus dem Bohrlochmeßergebnis kann gegenwärtig mit einem der Erdöl-Erdgas-Erkundung vergleichbaren Algorithmus erfolgen. Sie liefert damit in erster Linie Aussagen über die volumen- bzw. massebezogene Zusammensetzung des Gesteins. - Bei der weiteren Entwicklung sind Grundlagenuntersuchungen erforderlich, die der Spezifik des Lockergesteins entsprechen müssen. Sie schließen neben mineralogisch-petrographischen und physikalischen zunehmend auch physikochemische Methoden (z. B. Grenzflächenchemie/-physik) ein. Schlüsselprobleme dürften dabei zunächst

- die verfeinerte Tongehaltsbestimmung und Tonmineralanalyse bindiger Gesteine
- die Untersuchung von Möglichkeiten einer Ableitung der mittleren Korngröße rolliger Gesteine

auf der Grundlage von Bohrlochmeßergebnissen sein.

In das theoretische Grundkonzept zur Petrophysik der Lockergesteine werden dabei künftig auch solche Kategorien wie Porenraumgeometrie/spezifische Oberfläche, Struktur und Bindung stärker zu implizieren und der Spezifik entsprechend zu modifizieren sein.

Einleitung

Der Lockergesteinsbereich ist als Gegenstand geowissenschaftlicher Untersuchungen vor allem unter dem Gesichtspunkt seiner Bedeutung als wichtiger Rohstoff- und Energielieferant, als Baugrund und Umweltfaktor von zunehmendem und besonderem Interesse. Geophysikalische Methoden im allgemeinen und bohrlochgeophysikalische Verfahren im besonderen spielen dabei als Mittel zum effektiven Gewinn geowissenschaftlich relevanter Informationen eine wesentliche Rolle und sind bereits von der Aufgabenstellung her engstens verknüpft mit geologisch-lagerstättenwirtschaftlichen, hydro- und ingenieur-geologischen und geotechnischen Disziplinen.

Für die Deutsche Demokratische Republik stellt die im Tagebaubetrieb gewonnene Braunkohle heute und bis über das Jahr 2000 hinaus den Hauptenergielieferanten dar. Erkundung und Gewinnung von Kohle und Begleitkomponenten und die Gestaltung der Folgemaßnahmen stellen dabei erhöhte Anforderungen an geowissenschaftliche Aussagen und Informationen, die

- einen engen Bezug zu den mit dem Bergbau verbundenen Fragestellungen haben und damit bis in technisch-technologisch verwertbare Kennwerte reichen,
- schnell verfügbar sind und mit rationellen Mitteln gewonnen und verarbeitet werden können.

Die Bohrlochgeophysik hat sich dabei seit ihrer Einführung zu Beginn der 60er Jahre als ein besonders effektives und entscheidendes Instrumentarium des Informationsgewinns erwiesen. Eingeordnet in die Gesamtaufgabe hat sich dabei eine komplexe Methodik der Lockergesteins erkundung unter dem besonderen Aspekt der Braunkohlenerkundung entwickelt.

Bezogen auf die bei vielen geologischen Untersuchungen und Programmen im Mittelpunkt stehenden Fragen nach dem tieferen Untergrund sei hinsichtlich des Lockergesteinsbereiches einleitend noch die folgende Bemerkung gestattet: In vielen Fällen bilden Lockergesteine die oberste Bedeckung der Kruste. Stets ist das Vordringen mit unseren von der Oberfläche angesetzten Verfahren in tiefere Bereiche mit dem Blick durch einen Schleier oder ein Filter vergleichbar, das H. Stille einmal sehr drastisch als den "Dreck, der die Geologie verhüllt" bezeichnete. Wie dem auch sei: Die Kenntnis der Eigenschaften des Filters "Lockergestein" ist unerlässlich für die Konstruktion jedes Abbildes der darunter verborgenen geologischen Objekte und auch aus diesem Grund lohnender Gegenstand wissenschaftlicher Arbeit.

1. Aufgaben bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen im Lockergesteinsbereich (unter besonderer Beachtung ihres Einsatzes in der Braunkohlenerkundung)

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen im Lockergesteinsbereich sind vor allem auf folgende fünf in Bild 1 schematisch erläuterte Aufgaben ausgerichtet:

1. Physikalische Dokumentation des gesamten Bohrprofils

Geophysikalische Bohrlochmeßkurven sind objektive Abbilder der physikalischen Verhältnisse im Bohrloch (Steinbrecher 1983). Sie liefern eine im allgemeinen lückenlose Dokumentation. Als Folge analog oder digital vorliegender Meßwerte unterliegt diese Dokumentation keiner zeitlichen Veränderung und gestattet damit auch eine erneute Bearbeitung des Meßmaterials nach längerer Zeit; dies kann bedingt sein durch eine spätere zusätzliche geologische Aufgabenstellung, durch neue Möglichkeiten der Interpretation mit zwischenzeitlich weiterentwickelten Methoden oder durch eine zusammenfassende (regionale) Bearbeitung am Ende einer Untersuchungsetappe.

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen im Lockergesteinsbereich
- Aufgaben

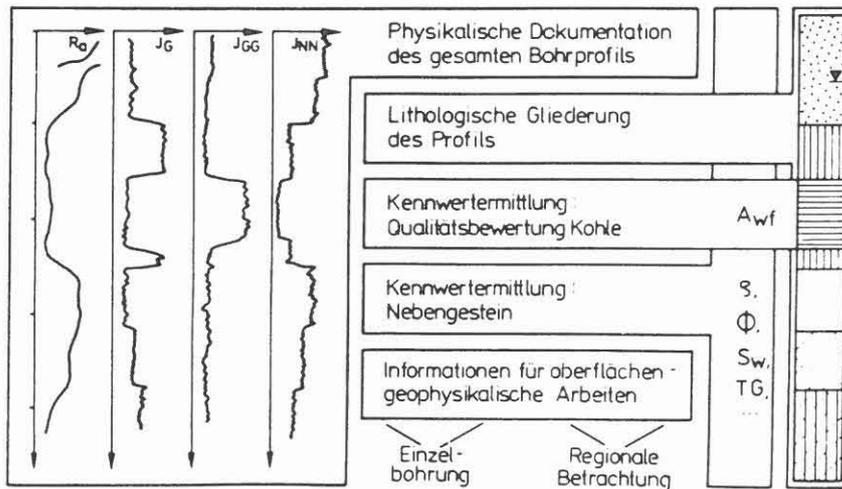


Bild 1

2. Lithologische Gliederung des Profils

Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Lockergesteinsarten führen zu charakteristischen Indikationen oder Merkmalen im Meßkurvenbild. Typische Merk-

malkombinationen sind die Grundlage der lithologischen Identifikation anhand der Meßkurve, deren Ergebnis die lithologische Gliederung des Profils darstellt.

Methodik und Technik dieser lithologischen Interpretation reichen dabei von der aus visueller Betrachtung abgeleiteten und vor allem für operative Entscheidungen notwendigen "Erstaussage" bis zu numerischen Bearbeitungsverfahren unter Anwendung wahrscheinlichkeitstheoretischer Prinzipien und Algorithmen (siehe Abschnitt 2).

Die lithologische Ansprache beinhaltet neben ihrer geologischen bereits auch wesentliche geotechnische und hydrologische Informationen.

Die lithologische Gliederung des Profils gibt darüber hinaus die Möglichkeit

- der Korrelation zu benachbarten Bohrungen und damit der Ableitung einer räumlichen Modellierung,
- der Zuordnung zu stratigraphischen Einheiten bei Vorliegen eines "Normalprofils" (lithostratigraphische Interpretation).

3. Kennwertermittlung zur Qualitätsbewertung der Kohle

Ausgehend von dem markanten Unterschied in der Dichte der (aschefreien) Kohle und der Dichte der aschebildenden Substanzen kann aus dem Ergebnis der Gamma-Gamma-Dichtemessung der Aschegehalt der wasserfreien Kohle (A_{wf}) als ein entscheidender Qualitätsparameter bestimmt werden.

Gestützt auf theoretische und experimentelle Untersuchungen wurde diese Grundmethode zu einem leistungsfähigen Routineverfahren rechnergestützter Interpretation von Bohrlochmeßdaten entwickelt (siehe auch Christalle, H., Steinbrecher, D. 1982).

- ④ Kennwertermittlung zur Charakterisierung der Eigenschaften des Nebengesteins (vorrangig zur Unterstützung geotechnischer und hydrogeologischer Arbeiten)

Die quantitative Interpretation des Nebengesteins und damit der gesamten Folge der Kiese, Sande, Schluffe, Tone, Mergel und aller ihrer Mischsysteme stellt gegenwärtig den problematischsten Teil der Gesamtbearbeitung dar. Während für die Bestimmung von Kennwerten, die die stoffliche und volumenmäßige Zusammensetzung charakterisieren (z. B. Tongehalt, Porosität, Sättigungsgrad) mit einer inhaltlichen Anlehnung an bewährte Interpretationsmethoden in der Erdöl-Erdgas-Erkundung (Fricke, 1985) geeignete Algorithmen entwickelt wurden, sind direkte Aussagen zu geomechanischen oder hydrogeologischen Kennwerten gegenwärtig nicht mit ausreichender Verallgemeinerungsfähigkeit und Sicherheit möglich.

- ⑤ Informationen für oberflächengeophysikalische Arbeiten

Die mit dem Bohrlochmeßergebnis gegebene Kenntnis des Betrages petrophysikalischer Parameter und ihrer Abhängigkeit von der Tiefe liefert für die Interpretation oberflächengeophysikalisch gewonnener Meßwerte wichtige Ansatzpunkte. Kombinationen wie z. B. der Gamma-Gamma-Bohrlochmessung und gravimetrischer Messungen führen nicht nur zu eindeutigeren Interpretationsergebnissen der Gravimetrie, sondern liefern auch die mit der Bohrlochmessung nicht bzw. nur eingeschränkt mögliche Aussage über den lateralen Verlauf von Schichtgrenzen.

2. Besonderheiten des Lockergesteinsbereiches

Geophysikalische Bohrlochmessungen und ihre Interpretation im Bereich der Lockergesteine weisen gegenüber solchen im Bereich der konsolidierten Erdöl-Erdgas-Speichergesteine eine Reihe von Besonderheiten auf, die wesentlichen Einfluß sowohl auf die technisch-technologische Gestaltung als auch auf die Aussagekraft ihrer Ergebnisse haben:

- a) geringe Bohrteufe (Flachbohrung) mit häufig nur geringer Standzeit des unverrohrten Bohrloches
- b) Notwendigkeit meist unmittelbar verfügbarer Ergebnisse einer Sofortinterpretation unter dem besonderen Gesichtspunkt ihrer Funktion für operative technologische Entscheidungen
- c) Spezifika in den physikalischen Eigenschaften der Lockergesteine, verbunden mit einem generell geringem Repertoire gesicherter Interpretationsalgorithmen mit hohem Verallgemeinerungsgrad.

Den beiden erstgenannten Besonderheiten wird mit der für den Flachbohrbereich besonders mobilen und autonomen Bohrlochmeßapparatur und einer entsprechenden Meß- und Bearbeitungstechnologie entsprochen. Dabei haben sich 2 Grundtypen von Apparaturen bewährt

- die komfortable, rechnergesteuerte und mehrkanalige digitale Maßapparatur, deren integrierter Rechner eine automatische Sofortinterpretation gestattet,
- die einfache tragbare, häufig einkanalige Apparatur, deren als Meßkurve sofort verfügbares Ergebnis eine visuelle und teilweise eine quantitative Sofortinterpretation erlaubt.

Die unter c) angesprochenen petrophysikalischen Spezifika resultieren aus folgenden Tatsachen:

- ◆ Die Gerüst- oder Matrixeigenschaften unkonsolidierter Lockersedimente werden gegenüber denen konsolidierter Sedimentgesteine in wesentlich stärkerem Maße von den Eigenschaften des Korn-Korn-Kontaktes (kohäsionslose Gesteine) bzw. physiko-chemischen Grenzflächenphänomenen (kohäsive Gesteine) geprägt. Daraus resultiert z. B. auch die starke Tiefen- bzw. Druckabhängigkeit petrophysikalischer Parameter der Lockergesteine.
- ◆ Der Lockergesteinsbereich ist in der Regel durch Süßwasserführung gekennzeichnet. Das hat vor allem Einfluß auf die elektrischen Eigenschaften und die Anwendbarkeit elektrischer Bohrlochmeßverfahren: Der meist nur geringe und häufig ungenügend sicher erfaßbare Kontrast in den Konzentrationen von Spülung und Schichtwasser schränkt die Anwendbarkeit des Eigenpotentialverfahrens (SP-log) stark ein. Die geringe Leitfähigkeit des Porenwassers führt generell zu relativ hohen Widerständen auch im Bereich wassergesättigter Kiese und Sande. Mit dieser geringen Leitfähigkeit des Porenwassers verbunden ist eine hohe Sensitivität gegenüber anderen Leitfähigkeitskomponenten, die an Grenzflächenphänomene gebunden sind und bereits bei geringen Tonanteilen spürbar werden. Bei extrem niedriger Schichtwassersalinität läßt sich auch im Korngrößenbereich der Sande ein Einfluß der Oberflächenleitfähigkeit nachweisen (Repsold, 1976; Schön, 1983) und mit der Korngröße korrelieren (Börner u. Schön, 1985; Schön, 1984).
- ◆ Der Lockergesteinsbereich ist meist durch das Auftreten von Mischtypen (z. B. Sand, schluffig-tonig) gekennzeichnet, die neben der Angabe zutreffender Matrixparameter auch eine scharf definierte lithologische Aussprache (siehe Abschnitt 3) problematisch gestalten können. Der Wechsel in Lithologie bzw. stofflich-mineralogischer und lagerungsstruktureller Ausbildung erfolgt dabei auf kurze räumliche Abstände sowohl vertikal (Schichtfolgen) als auch horizontal (insbesondere in pleistozän beeinflussten Gebieten).

◆ Die vorgenannten Besonderheiten und Schwierigkeiten sowie der international geringere Kenntnisstand über physikalische Eigenschaften von Lockergesteinen speziell des terrestrischen Bereiches* führen dazu, daß für die quantitative Interpretation von bohrlochgeophysikalischen Meßergebnissen im Lockergesteinsbereich gegenwärtig nicht allgemeingültige Algorithmen oder Gleichungen als Fundament genutzt werden können, die etwa der Anwendungsbreite einer ARCHIE-Gleichung (Archie, 1942) oder "time-average-relation" (Wyllie u. a., 1956) vergleichbar wären.

3. Lithologische Gliederung des Profils

Im einfachsten Falle erfolgt die lithologische Gliederung nach Bohrlochmeßergebnissen anhand bestimmter, für einen Gesteinstyp charakteristischer Merkmale (Merkmalskombination, Merkmalsvektor). Die Kenntnis dieser Merkmale in ihrer Zuordnung zu Gesteinstypen ist notwendige Voraussetzung einer sicheren Interpretation und stellt in den meisten Fällen den aus einem Vergleich von Kernansprache und zugehöriger Meßkurvenindikation für bestimmte regionale und stratigraphisch begrenzte Komplexe gewonnenen Erfahrungsschatz des Bearbeiters dar.

Abbildung 2 zeigt den Ausschnitt aus einer mit dem einfachen "Braunkohlenmeßprogramm" (bestehend aus Kaliber Kb, kleiner und großer Normale KN 0,25 m, gN 1,0 m, Gamma- und Gamma-Gamma-Messung G, GG) vermessenen Braunkohlenbohrung und das Interpretationsergebnis. Nach der Festlegung der Grenzen zwischen Homogenbereichen bzw. Schichten kann hier unmittelbar

- die Ausgliederung des Kohleflözes anhand der GG-Kurve

*für marine Sedimente liegen teilweise sehr umfangreiche experimentelle Ergebnisse vor

- die Untergliederung und Ansprache des übrigen Profils anhand der G- und Widerstands-Kurven vorgenommen werden.

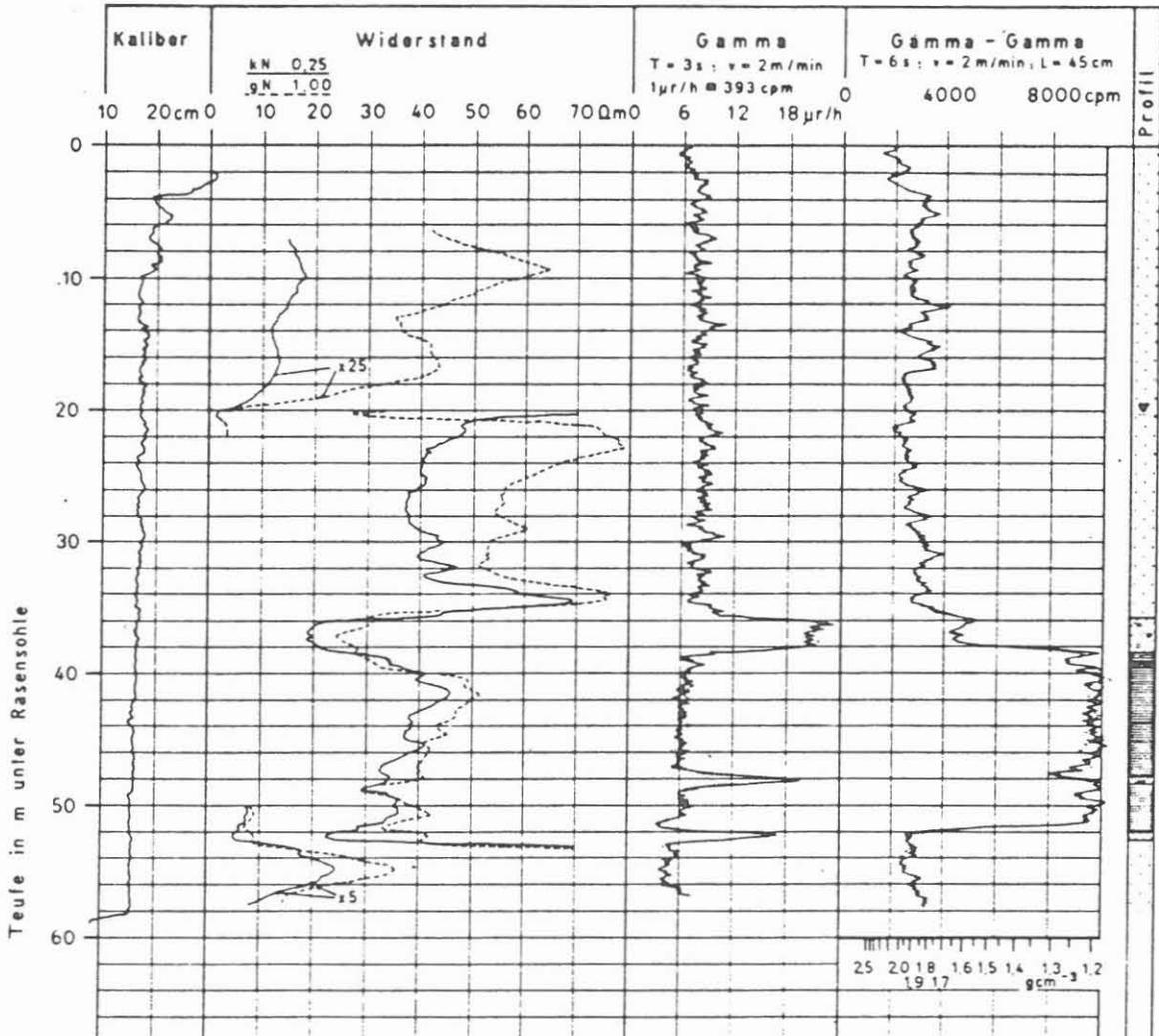


Bild 2 Ausschnitt aus einer Braunkohlenmessung mit Ergebnis der lithologischen Gliederung (einfaches Meßprogramm)

Ein "erweitertes Braunkohlenmeßprogramm", das zusätzlich beispielsweise eine Neutron-Neutron- und eine synthetische Laterolog-Kurve (Siegel u. a. 1982) vorsieht, liefert zusätzliche Indikationen zur Erhöhung der Aussagesicherheit

und quantitativer Interpretationsschritte (siehe Abschnitt 4). Das Zusammenführen dieser Merkmalskombinationen zu einer Entscheidungsmatrix liefert die Grundlage für einen Algorithmus zur automatischen lithologischen Gliederung durch den Bordrechner der digital registrierenden Bohrlochmeßapparatur. Eine derartige Praxis gestattet vor allem angesichts der gerade bei der Braunkohlenerkundung erforderlichen hohen Zahl von zu vermessenden Bohrungen und der schnellen Interpretation der Meßergebnisse eine überaus rationelle Arbeitsweise.

Das Vorliegen einer großen Zahl von Meßdaten in digitaler Form und ihre Verarbeitungsmöglichkeit im Computer gestattet das Implizieren von statistischen bzw. wahrscheinlichkeitstheoretischen Arbeitsweisen in die Interpretation. Derart gestaltete Interpretationskonzepte wie sie z. B. von Fricke (1985), Szendrö (1981), Harff und Peschel (1974) vorgestellt werden entsprechen bereits in der Betrachtung des eines Lithotyps bzw. einer Gesteinsklasse zugeordneten Merkmals in Form einer Verteilung der physikalischen Realität wesentlich besser als der Wertebereich (Band bzw. Parametergrenzen) oder gar der nur in wenigen Fällen (z. B. dichte porenfreie Evaporite) anwendbare für ein Gestein definierte Einzelwert für einen Parameter (z. B. Steinsalz: Dichte= $2,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ Laufzeit= $220 \mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$). Abbildung 3 zeigt schematisch diesen Übergang zur Kombination von Werteverteilungen einzelner Parameter bzw. Merkmale (z. B. spezifischer Widerstand, Intensität der natürlichen Gammastrahlung) innerhalb einer Ge-

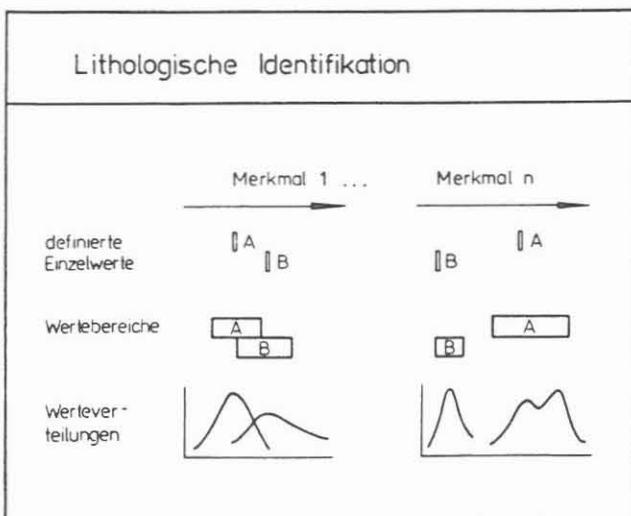


Bild 3 Grundtypen von Merkmalen zur lithologischen Gliederung

steinsklasse als Grundlage der lithologischen Identifikation. Mit den Abbildungen 4 und 5 werden Beispiele für Wertebereiche (Abb. 4) bzw. Häufigkeitsverteilungen (Abb. 5) aus dem Lockergesteinsbereich gegeben.

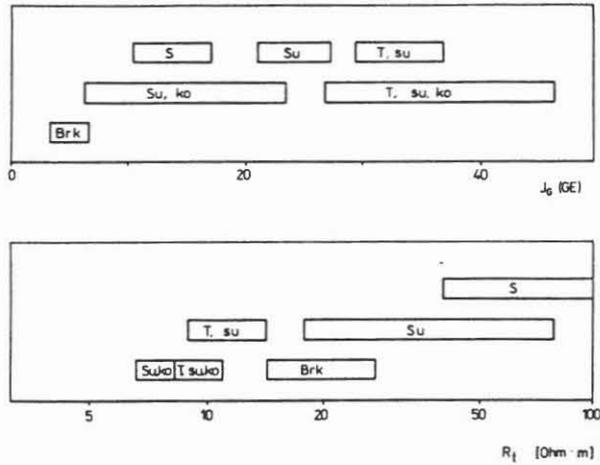


Bild 4 Wertebereiche der Intensität der natürlichen Gammastrahlung I_G und des spezifischen elektrischen Widerstandes R_t für die Gesteinsklassen
 S - Sand; Su - Schluff; T - Ton; Brk - Braunkohle
 su - schluffig, ko - kohlig
 (ungezeichnet nach Fricke, 1985)

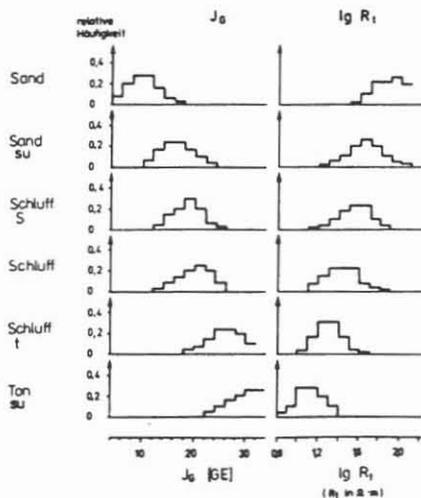


Bild 5 Häufigkeitsverteilungen der Größen I_G und $lg R_t$

Die Meßwerte für bestimmte Gesteinsklassen sind nach Funktionen statistisch verteilt; im Erwartungswert besitzen sie ein Maximum der Wahrscheinlichkeit. Die Verteilungsfunktionen der petrophysikalischen Parameter x_j werden für die zu identifizierenden Lithotypen bzw. Gesteinsklassen φ_k empirisch ermittelt; aus diesen Verteilungsfunktionen werden in dem von Fricke (1985) dargestellten Programm LITHOLOG die Wahrscheinlichkeiten $p(x_j/\varphi_k)$ berechnet.

Nach dem Theorem von BAYES ergeben sich die gesuchten bedingten Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Gesteinsklasse φ_k unter der Bedingung, daß der Vektor der petrophysikalischen Parameter x_j im Resultat der Messung bekannt ist:

x_j petrophysikalische Parameter ($j=1,\dots,m$)

φ_k Gesteinsklasse ($k=1,\dots,r$)

$$p(\varphi_k/x) = \frac{p(\varphi_k) \prod_{j=1}^m p(x_j/\varphi_k)}{\sum_{l=1}^r p(\varphi_l) \prod_{j=1}^m p(x_j/\varphi_l)} \quad (1)$$

Theorem von BAYES

$p(\varphi_k)$ a-priori - Wahrscheinlichkeit

mit $k = 1, \dots, r$ Gesteinsklassen
 $j = 1, \dots, m$ Parametern

Das Programm ermittelt die Gesteinsklasse φ_k für einen bestimmten Vektor der petrophysikalischen Parameter x , für die $p(\varphi_k/x)$ ein Maximum wird (Fricke, 1985). Bild 6 zeigt den Ausschnitt aus einer Ergebnisliste des Rechenprogramms für eine Braunkohlenbohrung. Die Vorteile dieser Methodik bestehen gegenüber der manuellen Bearbeitung in einer Objektivie-

rung der Ergebnisse und der (vor allem bei größerer Anzahl von Bohrungen in einem Gebiet vergleichbarer lithologischer Ausbildung) Rationalisierung der Interpretation. Es ist als generelle Arbeitsweise weiter entwicklungsfähig, wobei die möglichst genaue Kenntnis der Verteilungsfunktion stets von fundamentaler Bedeutung ist.

I	TEUFE [M]	H[M]	SH[M]	GESTEINSTYP	WAHRSCHEIN- LICHKEIT [%]
1	73,5- 75,2	1,7	1,7	SAND	91,7
2	75,2- 75,9	0,7	0,7	SAND	73,1
3	75,9- 77,5	1,6		SCHLUFF, TONIG, KOHLIG	52,5
4	77,5- 78,2	0,7		SCHLUFF, TONIG, KOHLIG	52,5
5	78,2- 79,8	1,6	3,9	SCHLUFF, TONIG, KOHLIG	54,4
6	79,8- 81,4	1,6		SAND, SCHLUFFIG	55,9
7	81,4- 83,2	1,8		SAND, SCHLUFFIG	52,8
8	83,2- 83,4	0,2	3,6	SAND, SCHLUFFIG	54,0
9	83,4- 84,4	1,0	1,0	SAND	76,3
10	84,4- 84,9	0,5	0,5	SCHLUFF, SANDIG, KOHLIG	75,1
11	84,9- 85,2	0,3	0,3	SCHLUFF, SANDIG	53,2
12	85,2- 85,7	0,5	0,5	SAND	58,3
13	85,7- 88,0	2,3	2,3	SCHLUFF, TONIG, KOHLIG	52,5
14	88,0- 88,9	0,9	0,9	SCHLUFF, KOHLIG	88,5
15	88,9- 91,7	2,8	2,8	SCHLUFF, TONIG, KOHLIG	52,5
16	91,7- 93,1	1,4		BRAUNKOHLE	100,0
17	93,1- 94,5	1,4		BRAUNKOHLE	100,0

Bild 6 Ausschnitt aus einer Ergebnisliste des Rechenprogrammes LITHOLOG (Fricke, 1985)

4. Ermittlung von Kennwerten der Lockergesteine

Bei der Ermittlung von Kennwerten - einem oft auch als "quantitative Interpretation" bezeichnetem Arbeitsschritt - ist es zweckmäßig, zwei Aufgaben zu unterscheiden

- die Ermittlung von Kennwerten, die die volumen- bzw. massebezogene Zusammensetzung des Gesteins charakterisieren (z. B. Porosität, Wassergehalt, Tongehalt),

- die direkte Ermittlung von Berechnungskennwerten der Bodenmechanik und Hydrologie (z. B. Verformungsmoduln, Scherfestigkeit, hydraulische Permeabilität).

Ausgangspunkt für die Lösung der erstgenannten Aufgabe ist die Wahl eines geeigneten Modells für die Darstellung der Gesteinszusammensetzung (Bild 7).

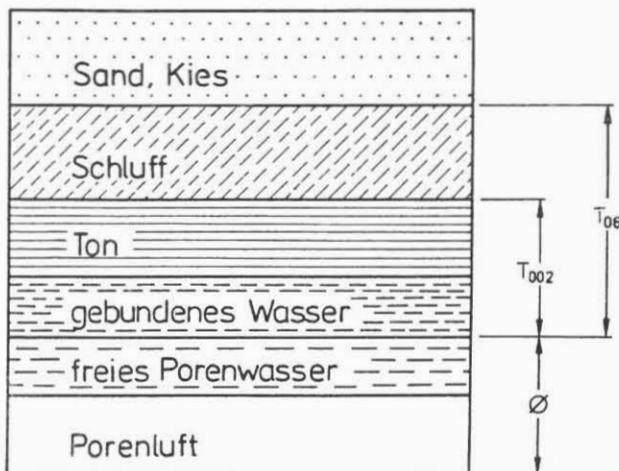


Bild 7 Modellverstellungen zur Ableitung volumenz- bzw. massebezogener Kennwerte

Es enthält als Hauptbestandteile

- Sand/Kies (Korndurchmesser $d_K > 0,063$ mm)
- Schluff bzw. Pelit (Korndurchmesser $0,063 > d_K > 0,002$ mm)
- Ton (Korndurchmesser $d_K < 0,002$ mm)
- gebundenes Wasser (im Modell an die Tonfraktion gebunden)
- freies Porenwasser
- Porenluft (tritt praktisch nur im Bereich rolliger Gesteine auf).

Unterschiedliche Volumenanteile der Sand- und Tonfraktion charakterisieren die beiden Grundtypen "rollig" (bzw. kohäsionslos) und "bindig" (bzw. kohäsiv).

Der Interpretationsalgorithmus lehnt sich den aus der Erdöl-Erdgas-Speichergesteinsinterpretation bekannten Methoden weitgehend an und ist in seiner von Fricke u. a. 1985 entwickelten Form in Bild 8 dargestellt. Es zeigt die Verknüpfung der mit den Meßverfahren ermittelten petrophysikalischen

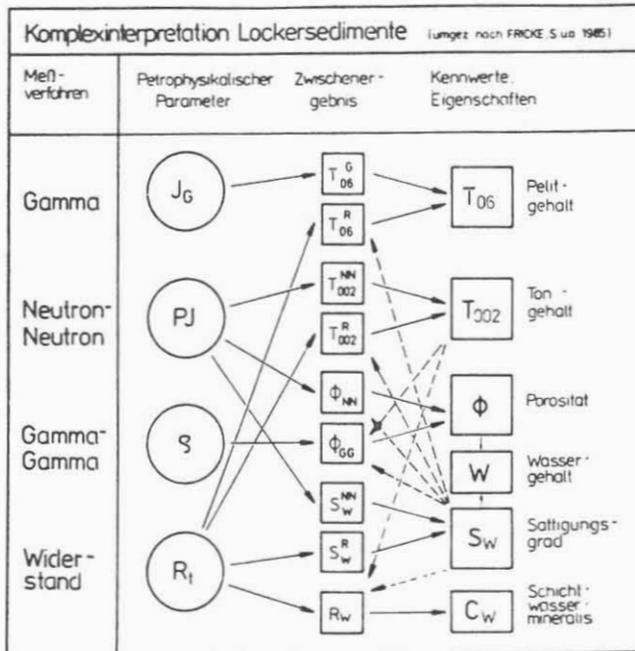


Bild 8

A u s g a n g s p a r a m e t e r J_G (Intensität der natürlichen Gammastrahlung), PJ (Porositätsindex), ρ (Dichte) und R_t (spezifischer elektrischer Widerstand) und der E r g e b n i s s e T_{002} (Tongehalt), T_{06} (Pelitgehalt), ϕ (Porosität), w (Wassergehalt), S_w (Wassersättigungsgrad) und C_w (Schichtwassermineralisation).

An mehreren Parametern (T_{06} , T_{002} , ϕ , S_w) werden Doppelbestimmungen vorgenommen; die wechselseitige Verknüpfung der Kennwerte bzw. Zwischenergebnisse (unterbrochen gezeichnete Linien) erfordert eine iterative Berechnung, die nach dreimaligem Durchlauf praktisch keine Änderungen mehr aufweist und damit das endgültige Interpretationsergebnis vorliegt (Fricke u. a. 1985).

Die bei diesem Interpretationsalgorithmus benutzten Gleichungen beruhen auf

- unmittelbar aus dem Modell ableitbaren Beziehungen (z. B. Beziehung zwischen der Gesteinsdichte und den Dichten sowie Volumenanteilen der Bestandteile),
- empirischen Beziehungen auf der Grundlage statistisch ermittelter Zusammenhänge. Diese Zusammenhänge resultieren entweder aus der Gegenüberstellung von bohrlochgeophysikalischen Schichtwerten (z. B. J_G) und Ergebnissen von Laboruntersuchungen (z. B. T_{002}) oder aus Laboruntersuchungen allein (z. B. Beziehung zwischen Formationsfaktor und Porosität).

Bild 9 a und b zeigt als Beispiele hierzu die Abhängigkeit der Intensität der natürlichen Gammastrahlung J_G und des spezifischen elektrischen Widerstandes R_t vom Pelitgehalt T_{06} für ein Untersuchungsgebiet. Bild 9 c zeigt ein Ergebnis zur Ermittlung der Formationsfaktor-Porositäts-Beziehung.

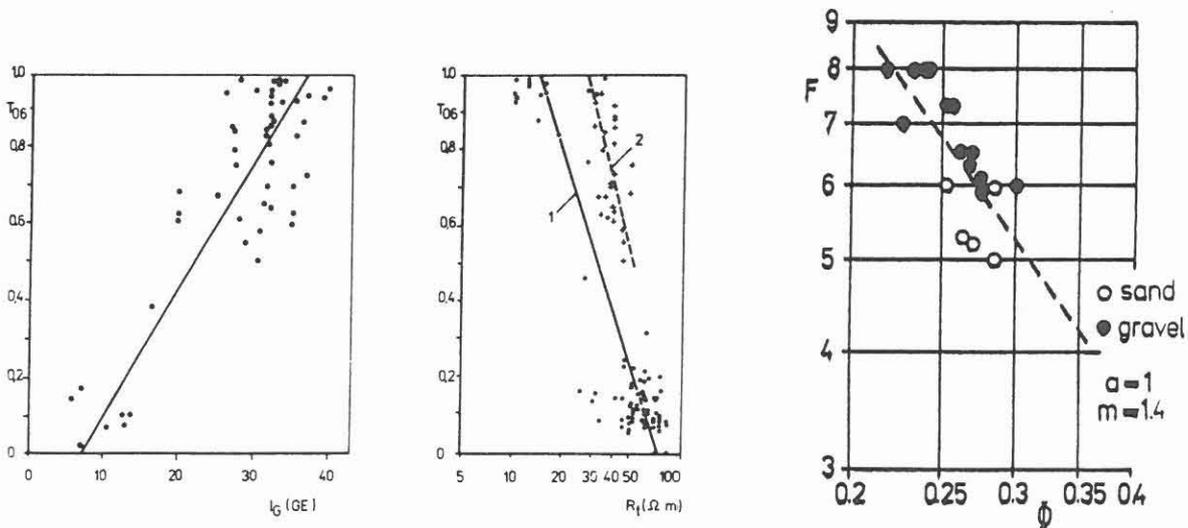


Bild 9 a) b) c)

Beispiele für korrelative Zusammenhänge

- a) Korrelation zwischen I_G und T_{06}
 (ohne Glimmersande)

- b) Korrelation zwischen R_t und T_{06}
1 - Pleistozän bis Tertiär/Rupel
2 - Liegendes des Rupel bis Prätertiär
(nach Fricke u. a. 1985)
- c) Korrelation zwischen F und ϕ an Sand und Kies
(Schön, 1984)

Die zweite Aufgabe - direkte Ermittlung von Berechnungskennwerten der Bodenmechanik und Hydrologie - kann mit Ausnahme der Bestimmung der Rohdichte gegenwärtig nicht mit hinreichender Verallgemeinerung und Zuverlässigkeit gelöst werden. Der sinnvolle und effektive Einsatz der Bohrlochgeophysik im Zusammenhang mit Berechnungen in Bodenmechanik und Hydrologie besteht gegenwärtig in erster Linie darin, mit bohrlochgeophysikalischen Meßergebnissen eine Abgrenzung von physikalisch definierten "Homogenbereichen" vorzunehmen (Steinbrecher u. a. 1983). Auch wenn die exakten Beziehungen zwischen bohrlochgeophysikalisch ermittelten Parametern und den bodenmechanischen bzw. hydrologischen Kennwerten (noch) nicht bekannt sind, kann davon ausgegangen werden, daß derart bestimmte Homogenbereiche auch Bereiche annähernd gleicher bodenmechanisch-hydrologischer Charakteristika sind. Die Abgrenzung von Homogenbereichen gibt damit Hinweise

- für die gezielte Probenuntersuchung im Hinblick auf die direkte Bestimmung bodenmechanischer und hydrologischer Kennwerte,
- für die Festlegung der Gültigkeitsbereiche von an Proben bestimmten Kennwerten.

In dieser Einordnung können auch bohrtechnisch ökonomische Rotary-Spülbohrungen in die bodenphysikalisch-hydrologische Erkundung einbezogen werden (Steinbrecher u. a. 1983).

Eine Erweiterung der Aussagemöglichkeiten bohrlochgeophysikalischer (und ingenieurgeophysikalischer) Untersuchungen erfordert intensive Grundlagenuntersuchungen experimenteller

und theoretischer Art, die der Spezifik des Untersuchungsobjektes Lockergestein Rechnung tragen. Erfolgversprechend sind dabei beispielsweise gammaspektrometrische Untersuchungen im Bereich der bindigen Gesteine (vgl. Abb. 10) z. B. mit einer Differenzierung in quartäre und tertiäre Profilerbereiche oder akustische Untersuchungen im Bereich der rolligen Gesteine. An zwei Problemkreisen der rolligen Lockergesteine sollen im folgenden hierzu Ansatzpunkte dargestellt werden.

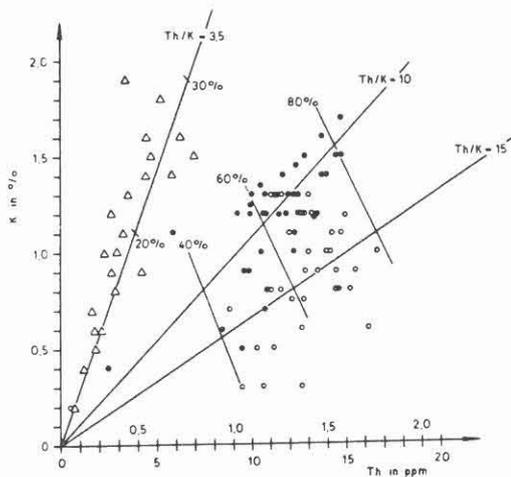


Bild 10 Ergebnisse gammaspektrometrischer Untersuchungen an Lockergesteinen (Kalium- und Thoriumanteile)
Dreiecke - Quartärproben
Kreise - Tertiärproben

a) Modellberechnungen und experimentelle Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften

Auf der Basis eines in seiner Struktur durch einen "Strukturwinkel" α statistisch definierten Kugelmodells kann der Elastizitätstensor und daraus die Geschwindigkeit elastischer Wellen im trockenen Lockergestein berechnet werden (Schön, 1969; Schön, 1983).

$$v = \left\{ f_1 (E_F, \nu_F, S_F) \cdot f_2 (\phi, n) \cdot \sigma^{1/3} \cdot S (\alpha, f) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

Dabei beinhaltet

- der erste Faktor die Eigenschaften (Elastizitätsmodul, Poissonzahl, Dichte) der festen Matrixsubstanz,
- der zweite Faktor den Einfluß von Porosität ϕ und Koordinationszahl n ,
- der dritte Faktor den Einfluß des Druckes σ
- der vierte Faktor den Einfluß von Struktur (Strukturwinkel α) und Kontaktbedingung (Korn-Korn-Kontakt), ausgedrückt durch einen Parameter f .

Die Größe $S (\alpha, f)$ ist das Element eines Tensors (Strukturtensor); es ist in Abhängigkeit von der interessierenden Ausbreitungsrichtung (vertikal, horizontal) und vom Wellentyp (Longitudinal- oder Transversalwelle) zu wählen. Aus Gleichung (2) geht damit hervor, daß Geschwindigkeitsquotienten (z. B. v_p/v_s) nur von α und f abhängen und damit eine Information über die Struktur und die Korn-Korn-Bindung enthalten. Da Struktur und Korn-Korn-Bindung andererseits solche bodenmechanischen Kennwerte wie den Reibungsbeiwert μ bzw. Winkel der inneren Reibung φ und den Ruhedruckbeiwert λ_0 wesentlich bestimmen (vgl. Bild 11) ist zumindest auf der Grundlage des Modells eine Korrelation zwischen diesen Kennwerten und Geschwindigkeitsquotienten zu erwarten (Bild 12).

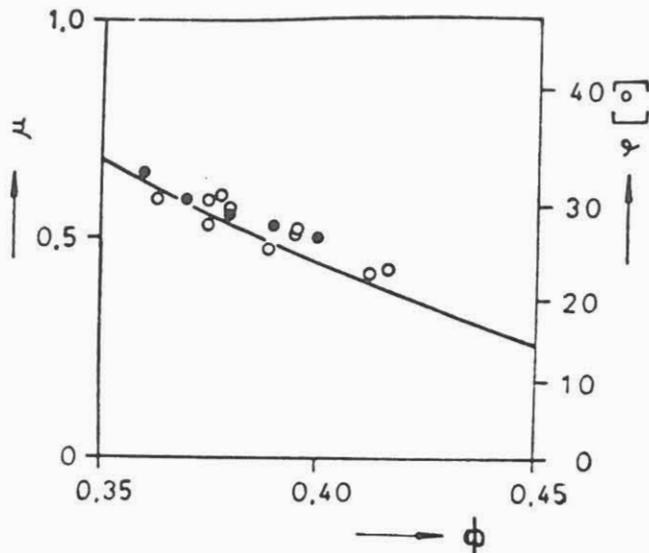


Bild 11 Winkel der inneren Reibung als Funktion der Porosität
 o Glaskugeln
 ● Ottawa-Sand
 Kurve - nach Modellrechnungen (Schön, 1969)

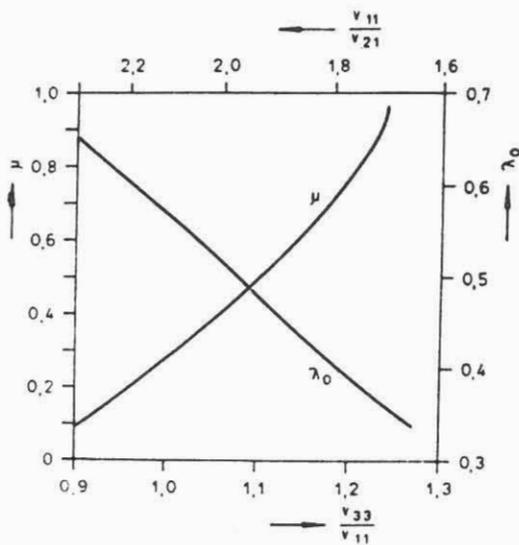


Bild 12 Beziehung zwischen Geschwindigkeitsquotienten und bodenmechanischen Kennwerten (Modellberechnungen) Schön, 1969, 1983

- V_{11} Geschwindigkeit der horizontalen Longitudinalwelle
- V_{33} Geschwindigkeit der vertikalen Longitudinalwelle
- V_{21} Geschwindigkeit der horizontalen Transversalwelle (horizontal polarisiert)
- μ Reibungsbeiwert
- λ_0 Ruhedruckbeiwert

b) Untersuchungen zum Einfluß der Korngröße auf petrophysikalische Parameter

Die mittlere Korngröße d von Sand und Kies ist ein wichtiger Klassifikationskennwert und darüber hinaus häufig Ausgangsgröße einer Berechnung der hydraulischen Permeabilität.

Bereits Sarma und Rao (1962) wiesen bei geringkonzentrierten Porenwässern Abweichungen von der ARCHIE-Gleichung bei Sanden nach, die auf Effekte an den Kornoberflächen zurückzuführen sind. Im Ergebnis von Laboruntersuchungen an Sanden fanden Börner und Schön (1985) einen der WAXMAN-SMITS-Gleichung formal gleichen Aufbau einer Beziehung für die Leitfähigkeit des wassergesättigten Sandes c_o in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit des Porenwassers c_w , dem Formationsfaktor F und der Oberflächenleitfähigkeit c_q

$$c_o = F^{-1} \cdot c_w + c_q \quad (3)$$

Die Oberflächenleitfähigkeit c_q zeigt ihrerseits eine enge Korrelation zur spezifischen Kornoberfläche bzw. zum Korndurchmesser (Bild 13). Hieraus läßt sich eine um den Oberflächenterm erweiterte ARCHIE-Gleichung ableiten (siehe Schön 1984, Schön 1985):

$$c_o = \frac{\phi^m}{a} \cdot c_w + b \cdot (d)^c \quad (4)$$

Dabei ist

ϕ Porosität

a, m empirische Größen der ARCHIE-Gleichung

d mittlerer Korndurchmesser

b, c empirische Größen der $c_q = c_q(d)$ -Beziehung

Diese Resultate belegen, daß bei den elektrischen Verfahren prinzipiell ein Zugang zu korngrößenbedingten Indikationen über Oberflächeneffekte möglich erscheint.

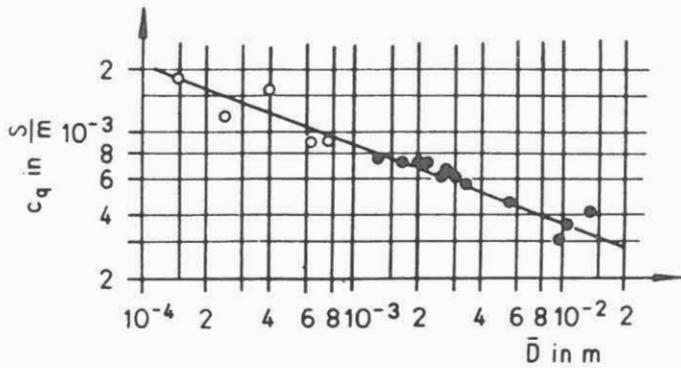
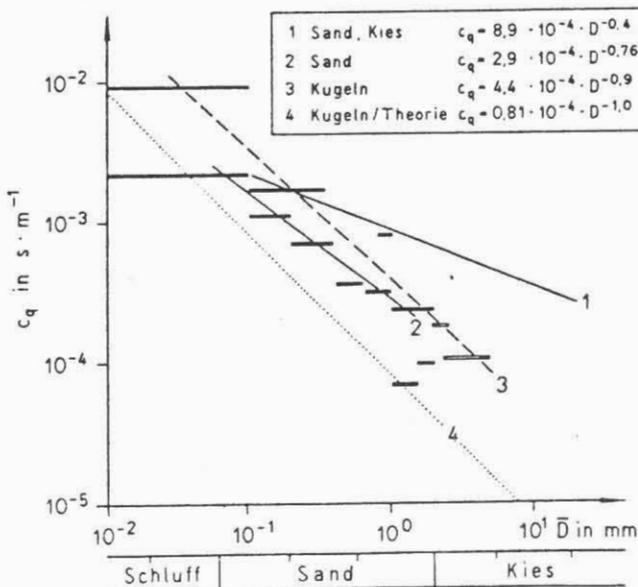


Bild 13 Gegenüberstellung von Oberflächenleitfähigkeit c_q und mittlerem Korndurchmesser \bar{d} bzw. \bar{D}

a) Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Sand und Kies (Schön, 1984, 1985)



b) Ergebnisse experimenteller Untersuchungen (Mittelwertskurven und Wertebereiche) sowie Berechnungen (Schön, 1986)

Vergleichbar sind die Ansatzpunkte, die seismische Untersuchungen im Hinblick auf Aussagen zur Korngröße liefern. Aus dem Bereich der marinen Sedimente liegen Ergebnisse zu Korrelationen zwischen Korngröße und Absorption vor (z. B. Hamilton, 1976). - Mit der digitalen Wellenbildregi-

strierung sind Möglichkeiten einer umfassenden rechen-
technischen Analyse des Informationsgehaltes eines Wellenbildes
gegeben. Von Apel (1985) vorgenommene Laboruntersuchungen lie-
ferten u. a. eine deutliche Korrelation zwischen der mitt-
leren Korngröße des Untersuchungsmaterials \bar{d} und der Frequenz
des allein die Longitudinalwelle beinhaltenden Teiles des Wel-
lenzuges f_D (berechnet mit modifizierter Phasenanalyse nach
Frei und Maximum-Entropie-Spektralanalyse). Bild 14 zeigt ein
Beispiel.

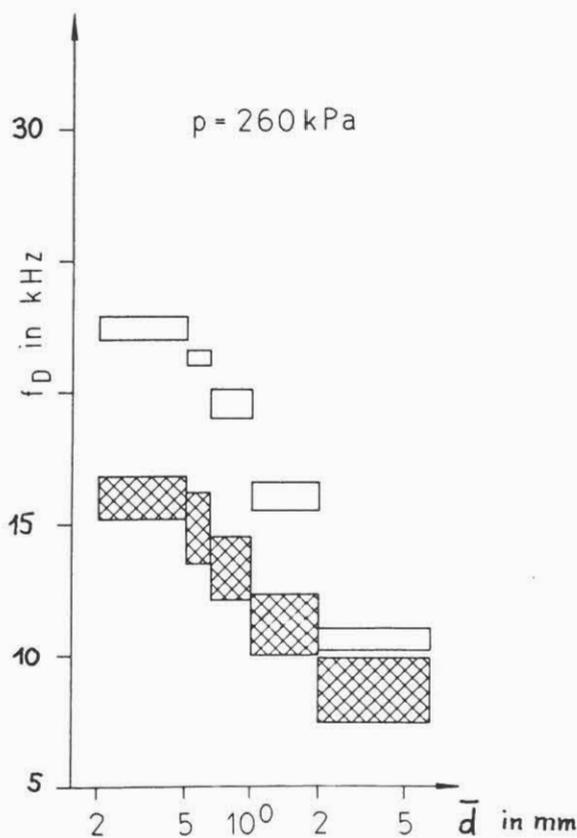


Bild 14 Frequenz des Longitudinalwelleneinsatzes in
Abhängigkeit von der Korngröße (vertikaler Druck
260 kPa; offene Felder - trockenes Sediment,
schraffierte Felder - wassergesättigtes Sediment)
Umgezeichnet nach Ergebnissen von Apel, 1985

Literatur

ARCHIE, G. E. :

The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. Americ. Inst. Mineral. Met. 146 (1942), S. 54-62

CHRISTALLE, H., STEINBRECHER, D.:

Abschätzung von Qualitätsparametern der Braunkohle mit geophysikalischen Bohrlochmessungen
Neue Bergbautechnik 12 (1982) 12, S. 693-695

FRICKE, S.:

Petrographische Profilgliederung an Hand von Bohrlochmessungen mit Computern.
Zeitschr. f. geolog. Wissenschaften 13(1985), 4, S.499-507

FRICKE, S. u.a.:

Grundlagen und Möglichkeiten der quantitativen Interpretation geophysikalischer Bohrlochmessungen im Nebengestein von Braunkohlenlagerstätten
Freiberger Forschungshefte C 408, Leipzig 1985,
S. 45-58

HAMILTON, E. L.:

Attenuation of shear waves in marine sediments.
J. Acoust. Soc. Am. 60 (1976) 2, S. 334-338

HARFF, J, PESCHEL, G.:

Komplexinterpretation geowissenschaftlicher Informationen mit determinierten Kriterien und ihre Anwendung zur Bearbeitung von Tiefbohrungen. - In: Z. angew. Geol. - Berlin 20 (1974) 12. - S. 558-565

REPSOLD, H.:

Über das Verhalten des Formationsfaktors in Lockersedimenten bei schwach mineralisierten Porenwässern.
Geol. Jahrbuch E 9, Hannover 1976, S. 19-39

SARMA, V. V. J., RAO, V. B.:

Variation of electrical resistivity of river sands, calcite and quartz powders with water content.

Geophysics 27 (1962) 470-479; 28 (1963) 310-313

SCHÖN, J.:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen in Lockerböden und ihre Beziehung zu bodenmechanischen Kennwerten. Freiburger Forschungshefte, C 250, VEB Dt. Verl. Grundstoffind. Leipzig 1969.

SCHÖN, J.:

Petrophysik. Berlin: Akademie-Verlag 1983

SCHÖN, J.:

Electrical conductivities in unconsolidated sediments their correlation to other physical and petrographic properties. Trans. 9-th Intern. Formation Evaluation symp., Paris 1984

SCHÖN, J., BÖRNER, F.:

Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit von Lockergesteinen - der Einfluß matrixbedingter Leitfähigkeitsanteile. Neue Bergbautechnik 15 (1985) 6, S. 220-224.

SCHÖN, J., STEINBRECHER, D.:

Die quantitative Interpretation geophysikalischer Bohrlochmessungen - Grundlagen, Stand, Erfordernisse Geophysik und Geologie KMU Leipzig; Berlin Bd. III, H. 3, S. 47-55

SIEGEL, V., SMIGIEL, G., STILLER, D.:

Syntes krivych semielektrodnogo bokovogo karotaša dlja razvedki burogo uglja v GDR

Proc. 27-th. Int. Geophys. Symp. Bratislava 1982, vol. 2, p. 82-93

STEINBRECHER, D., KRESSER, K.-D., HÖNEMANN, G., CHRISTALLE, H.:

Geophysikalische Bohrlochmessungen in der Braunkohlen-
erkundung - Interpretationsmethodik, Aussagemöglich-
keiten, Perspektiven

Z. angew. Geologie 29 (1983) 3, 133-135

SZENDRÖ, D.:

Application of the statistical lithologie method for
the determination of geological formations. -In:Proc.
26th geophys. Symp. - Leipzig 1981. - S. 489-496

WYLLIE, M. R.J., GREGORY, A. R., GARDNER, L. W.:

Elastic wave velocities in heterogeneous and porous
media. Geophysics 21 (1956) 1, S. 41-70