

**UNTERSUCHUNG VON KORRELATIONSBEZIEHUNGEN ZWISCHEN DER DICHTEN
UND DER SEISMISCHEN GESCHWINDIGKEIT MIT HILFE DER DATENBANK
DABACOS**

T. Büttgenbach, J. Richter, F. M. Neubauer, K.-M. Strack

Zusammenfassung

Zur Untersuchung von Korrelationen zwischen geophysikalischen Parametern in kristallinen Gesteinen wurde die Datenbank DABACOS aufgebaut, die zur Zeit ca. 2 000 Datensätze enthält. Damit werden Korrelationen speziell zwischen der Dichte und der seismischen Geschwindigkeit untersucht und, wenn nötig, neu hergeleitet. So zeigte sich bei ersten Untersuchungen, daß die Gardner-Formel (GARDNER et al. 1974) nur sehr eingeschränkt auf kristalline Gesteine anwendbar ist. Nach Überprüfung und Anpassung der Korrelationsformeln auf das Kristallin können diese Relationen bei der Auswertung der Bohrlochschweredaten zur Einschränkung der Mehrdeutigkeit der Interpretation genutzt werden.

1 Einleitung

Bei den KTB-Bohrungen soll die Dichteverteilung in der Bohrlochumgebung mit dem Gamma-Gamma-Log und dem Bohrlochgravimeter vermessen werden. Die Auswertung wird allerdings durch die grundsätzliche Vieldeutigkeit von Schweremessungen erschwert. Um diesen Nachteil einzuschränken, wird am Institut für Geophysik der Universität Köln ein interaktives Programmpaket entwickelt, das Ergebnisse weiterer Meßmethoden miteinbezieht. So werden nicht nur Aussagen der Seismik über die Lage der Schichtgrenzen genutzt, sondern auch a priori Informationen für die Inversion der Schweredaten, die mit Hilfe von Korrelationsformeln zwischen der seismischen Geschwindigkeit und der Dichte gewonnen werden können.

Um bekannte, für das Sediment entwickelte Korrelationsformeln auf ihre Übertragbarkeit auf das Kristallin zu überprüfen und um die Herleitung neuer Beziehungen auf eine breite Datenbasis zu stellen, haben wir die Datenbank DABACOS (Data Base for Correlation Studies) auf der Basis des Datenbanksystems SIR (Scientific Information Retrieval) aufgebaut. Im jetzigen Ausbaustadium enthält DABACOS ca. 2000 Datensätze aus der Literatur über kristalline Gesteine. Bei der ständigen Erweiterung um neue Daten werden zunehmend auch Ergebnisse aus Bohrlochmessungen berücksichtigt.

Erst durch die Einführung der Datenbank konnte eine schnelle und effektive Abfrage der vorhandenen Parameter in beliebiger Kombination erreicht werden. Daneben bietet das Datenbanksystem noch die automatische Erstellung von Systemdateien für die mächtigen Statistikpakete BMDP und SPSS an.

Im folgenden wird die Struktur der Datenbank und ihre Anwendung bei ersten Korrelationsuntersuchungen näher erläutert.

2 Beschreibung von DABACOS

Die Datenbank umfaßt zur Zeit sieben Dateien (siehe Abb. 1). Dabei wurden die an den Gesteinsproben vermessenen physikalischen Parameter in zwei Gruppen geteilt. Eine Datei enthält die häufig gemessenen Größen, eine andere die Parameter, die in der Literatur seltener genannt werden. Durch diese Trennung ist eine schnelle Datenabfrage bei hoher Speicherplatzersparnis möglich.

Eine weitere Datei enthält Angaben, die speziell bei Bohrlochmessungen auftreten. So ist es zum Beispiel möglich, den Typ des bei der Messung eingesetzten Logs oder die geologische Altersbezeichnung der durchteuften Schichten anzugeben.

DABACOS - DATA BASE STRUCTURE

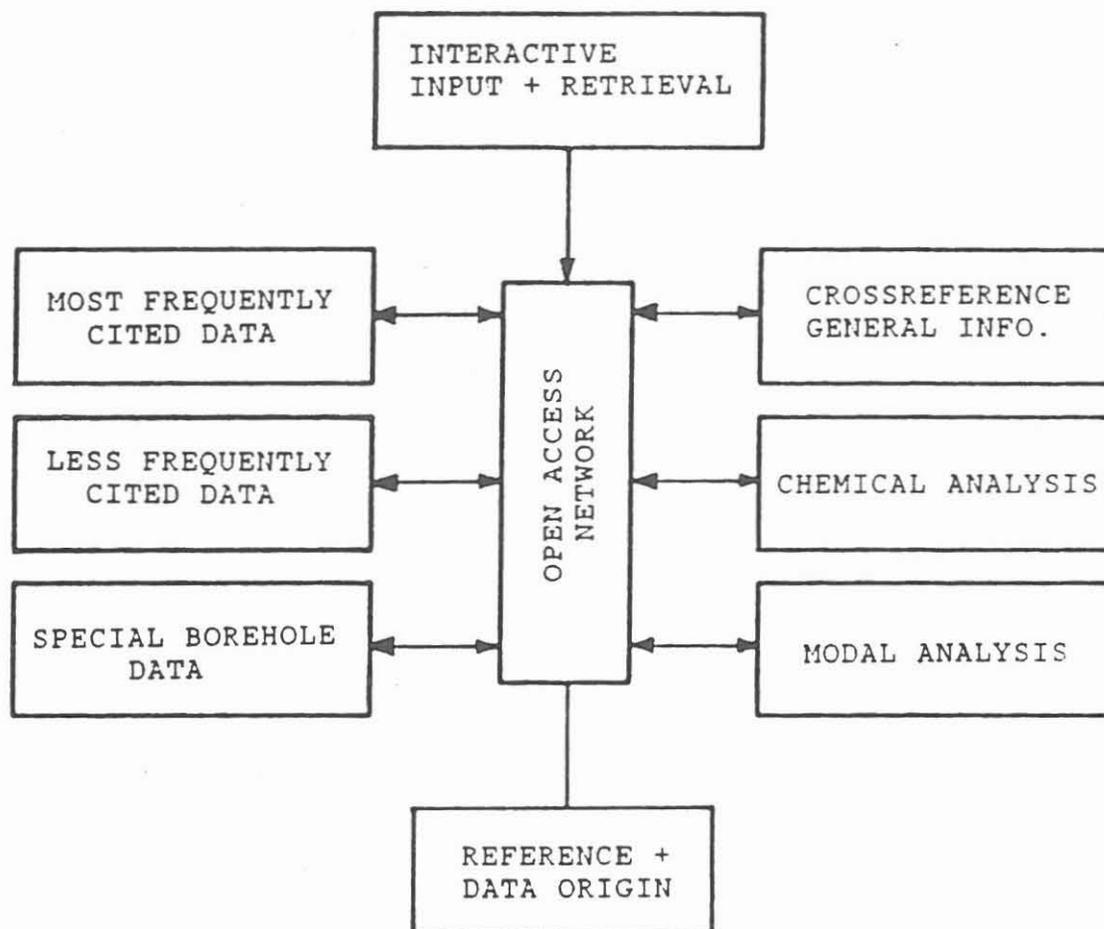


Abb. 1 Struktur der Datenbank DABACOS . Sechs Dateien sind über ein Netzwerk miteinander verknüpft. Der Zugang zu der Datei mit den Quellenangaben ist hierarchisch organisiert. Die Dateneingabe und Datenmanipulation kann mit einem interaktiven Programm abgewickelt werden.

Zur petrographischen Beschreibung der Gesteinsproben wurde jeweils eine Datei für die chemische Analyse und für die Modalanalyse eingerichtet. Diese Angaben können zum Beispiel von Bedeutung sein, wenn zurückverfolgt werden soll, wie weit einzelne Mineralkomponenten die seismische Geschwindigkeit beeinflussen, oder bei der Berechnung des mittleren Atomgewichtes.

Um eine Übersicht über die Datensätze zu erhalten, wurde zusätzlich eine Kreuzreferenztabelle eingerichtet, die darüber Auskunft gibt, in welchen der Dateien Informationen für eine Probe abgespeichert sind.

Darüber hinaus enthält die Datenbank noch ein Literaturverzeichnis, in dem alle Quellen, von denen Gesteinsdaten stammen, erfaßt werden.

Insgesamt ist zur Zeit die Abspeicherung folgender Parameter möglich:

- physikalische Parameter
Druck, Dichte, Temperatur, seismische Geschwindigkeiten, Anisotropie der seismischen Geschwindigkeiten, elektrische Leitfähigkeit, Kompressibilität, dielektrische Konstante, thermische Leitfähigkeit, mittleres Atomgewicht
- Gesteinsparameter
Porosität, Permeabilität, Wassergehalt, chemische Analyse, Modalanalyse
- Gesteinsklassifikation
Gesteinsart (Metamorphit, Vulkanit usw.),
Gesteinsgruppe (Gneis, Granit usw.),
spezieller Gesteinsname, Fundort, Bohrlochlokation
- Zusatz-Informationen
Teufenbereich, geologische Beschreibung des durchteuften Gesteins,
geologisches Gesteinsalter,
Art der Messung (Labor oder in situ),
Meßfehler für die meisten physikalischen Parameter,
Meß- oder Berechnungsmethode für V_s , V_p , Anisotropie,
Meßkorrekturen, Anzahl der Messungen an einer Probe
- Quellenangabe (Literaturverzeichnis).

Alle Dateien, ausgenommen die Tabelle der Literaturangaben, sind untereinander voll vernetzt. Somit können mehrere von ihnen bei der Datenabfrage gleichzeitig angesprochen werden. Dadurch ist es auch möglich, beliebige Kreuzverbindungen zwischen den einzelnen Dateien einzurichten.

Die Struktur der Datenbank erlaubt außerdem, jederzeit die einzelnen Dateien um neue Parameter zu erweitern und neue Dateien hinzuzufügen. Dies war eine Vorgabe bei dem Aufbau der Datenbank, um auf neue Anforderungen flexibel reagieren zu können.

Die Abfrage der Daten kann einmal interaktiv über die relationale Sprache SQL (Structured Query Language), zum anderen über eine eigenständige Programmiersprache durchgeführt werden. Dabei sind mit letzterer selbst hochkomplexe Abfragen realisierbar. Darüber hinaus bietet das System SIR die Möglichkeit, von externen Programmen, wie zum Beispiel von unserem Interpretationsprogramm für die Bohrlochschweremessungen, direkt auf die Datenbank zuzugreifen.

Die Dateneingabe geschieht entweder in Form eines "Batch-Jobs" oder mit Hilfe eines interaktiven Datenerfassungsprogramms. Mit letzterem können auch die bereits in der Datenbank abgespeicherten Daten interaktiv abgefragt und geändert werden.

In den Abbildungen 2 und 3 sind Beispiele der Eingabemasken zur Datenerfassung für die Dateien der am häufigsten gemessenen physikalischen Parameter und der Modalanalyse wiedergegeben. In Abb. 2 sind zudem noch Beispiele für "Hilfs"-Informationen zu den einzelnen Parametern abgebildet, die man während der interaktiven Eingabe abrufen kann. Der Wert -1 in Abb. 3 für den Anteil der Chlorite an der Mineralzusammensetzung des Gesteins steht dafür, daß der Autor keine Angaben darüber macht, ob bei der veröffentlichten Modalanalyse diese Komponente mitberücksichtigt wurde. Dieser Wert ist gleichzeitig als Fehlwert deklariert, eine der Besonderheiten, über die das Datenbanksystem SIR verfügt. Damit erkennt das System, daß hier ein expliziter Wert fehlt, der Parameter aber mit einer Bedeutung belegt ist.

Zusätzliche Informationen können in jeder Datei in einer Kommentarzeile frei formatiert eingegeben werden. Außerdem sind Kontrollen gegen falsche Eingaben eingebaut. So wird nach Eingabe der Modal- oder chemischen Analyse die Summe der Werte daraufhin überprüft, ob sie 100 % übersteigt.

3 Erste Korrelationsuntersuchungen an kristallinen Gesteinen

Mit den ca. 2000 Datensätzen, die zur Zeit in der Datenbank abgespeichert sind, konnten wir bereits erste Korrelationsuntersuchungen für kristalline Gesteine durchführen.

Abb. 4 gibt eine Zusammenfassung über einen Teil dieser Datensätze. Es handelt sich um 1200 Labormessungen an kristallinen

MAIN PHYSICAL properties

```
1) sourcecode MANGHNANI74
2) main rock name GNEISS
3) identification nr 25301

4) pressure in kbar (10**8 Pa) .003
5) if pressure range: upper limit .....
6) density in (g*cm**-3) 2.702
7) Vp in (km*s**-1) 4.5890
8) Vs in (km*s**-1) 2.7670
9) lower limit of temperature in °C 21.0
10) upper limit of temp. in °C .....
11) measuring error or dev. of pressure .....
12) of density .053
13) of Vp .6400
14) of Vs .1000
15) of temperature .....
16) anisotropy of Vp in % 24.38
17) anisotropy of Vs in % 7.02
18) meas.- or calc.- method of : Vp, Vs 12
19) of anisotropy 1
20) corrections by measurement 1
21) nr of measurements 3
comments 7:Vmax=5.225/8:Vmax=2.85/7:+8:xyz,3S/7:+8:xyz,3S/
add. comment .....
```

RAREPHYS ?
BOREHOLE ?
CHEMIC ?
MODAL ?
INDEX ?

Beispiele für zusätzliche
"Hilfs"-Informationen zu den einzelnen Parametern

R18. MA , 19) of anisotropy
1: $A = (V_{max} - V_{min}) * 100 * (V_{max})^{** - 1}$
2: $A = (V_{max} - V_{min}) * 100 * (V_{average})^{** - 1}$

R19. CORR , 20) corrections by measurement
1: Laenge und Dichte Korrekturen

Abb. 2 Beispiel der Bildschirm-Maske aus dem interaktiven
Datenerfassungsprogramm für die Datei MAINPHYS.
Diese Datei enthält die Parameter die sehr häufig
vermessen werden.

MODAL analysis

1) sourcecode	MANGHNANI74
2) main rock name	GNEISS
3) identification nr	25301
4) vol % of quartz	24.300
5) of plagioclas	47.200
6) of alkalifeldspar
7) of amphibol	6.900
8) of pyroxen	7.500
9) of olivin	-1.000
10) of garnet	10.300
11) of mica	1.900
12) of serpentine	-1.000
13) of chlorite, -1: not regarded	-1.000
14) one additional mineral	opal=.7/
15) six additional mineral
16) one additional mineral
17) comments	8:ortho=5.2,clino=2.3/11:biotite/

INDEX

?

Abb. 3 Beispiel der Bildschirm-Maske aus dem interaktiven Datenerfassungsprogramm für die Datei MODAL. Diese Datei enthält die Modalanalyse der Gesteine.

Kristall. Gesteine (0-320 °C, bis 1GPa)

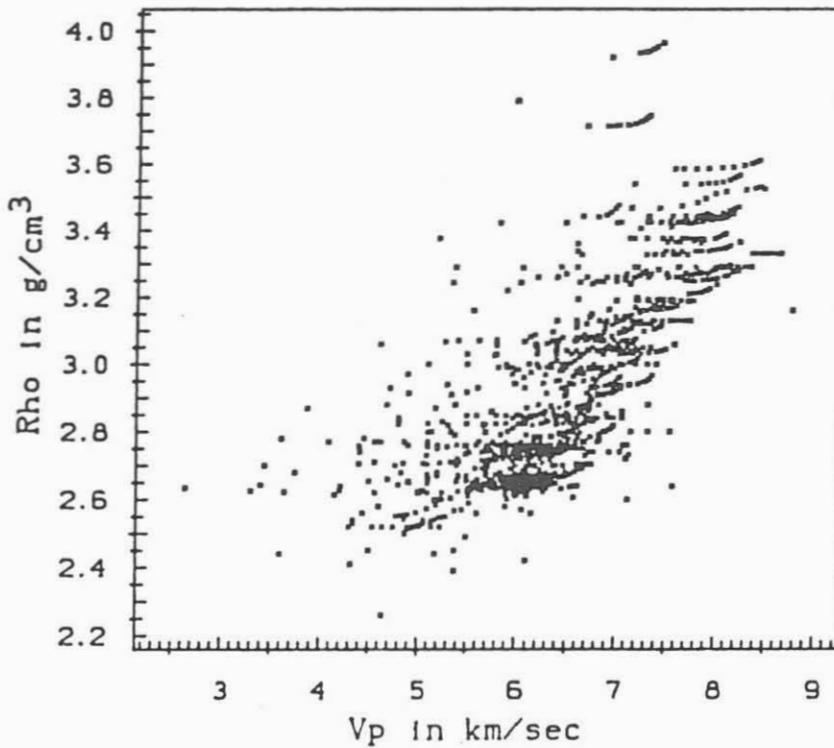


Abb. 4 Dichte in kristallinen Gesteinen in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit V_p bei Drucken bis 1GPa und Temperaturen bis 320 °C.

Kristall. Gesteine (20-30 °C, bis 1MPa)

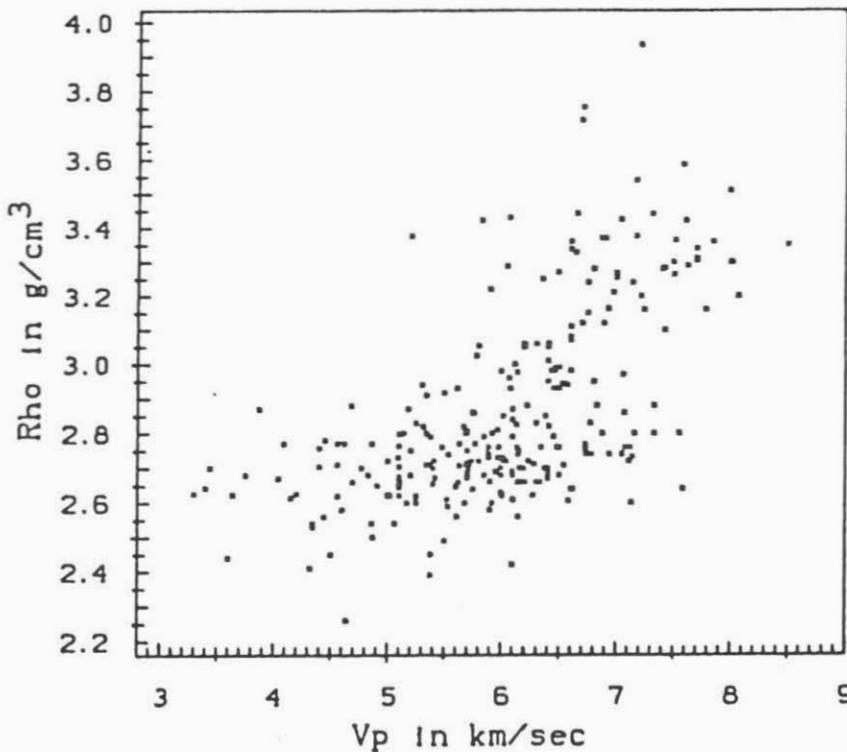


Abb. 5 Dichte in kristallinen Gesteinen in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit V_p bei Drucken bis 1MPa und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

Gesteinen innerhalb eines Temperaturbereiches von 0 - 320 °C und eines Druckbereiches von 0 - 1 GPa. Daraus können nun beliebige Ausschnitte gewählt werden, um spezielle Untersuchungen durchzuführen.

Ein einfaches Beispiel ist in Abb. 5 zu sehen. Hier sind alle Daten über kristalline Gesteine bei Zimmertemperatur und einem Druck bis zu 1 MPa zusammengestellt. Trotz der erkennbar großen Streuung ist die Tendenz einer Korrelation der Dichte mit zunehmender Kompressionswellengeschwindigkeit zu erkennen. Das schlägt sich auch in dem Wert des zugehörigen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,7$ nieder. Die große Streuung der Daten liegt wohl unter anderem an der Positivität der Gesteine, die sich besonders bei geringen Drücken auf die Geschwindigkeits- und Dichtewert stark auswirkt.

Um zu klären, welcher Gesteinstyp die Streuung und welcher die Korrelationstendenz verursacht, haben wir in Abb. 6 und 7 die Punktwolke noch einmal in Werte für Plutonite und Metamorphite aufgespalten. Obwohl die Daten der Metamorphite stärker streuen als die der Plutonite, ist bei beiden Gesteinstypen die Tendenz zur Korrelation zwischen V_p und der Dichte gleichermaßen erkennbar.

Als Beispiel für entsprechende Untersuchungen an einzelnen Gesteinsgruppen sind in den Abbildungen 8 und 9 nur Daten von Graniten und Serpentiniten wiedergegeben. Während bei den Graniten kaum mehr von Korrelation gesprochen werden kann ($r = 0,26$), ist bei den Serpentiniten diese relativ stark ausgeprägt ($r = 0,88$). Insgesamt geben die Gesteinsgruppen bei diesen Druck- und Temperaturbedingungen kein einheitliches Bild wieder. Wählt man jedoch Werte, die bei einem höheren Druck gemessen wurden, wird die Korrelation zwischen Dichte und seismischer Geschwindigkeit allgemein deutlicher. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 10 wiedergegeben. Die bei 20 - 30 °C und 50 MPa gemessenen Werte weisen einen deutlich besseren Korrelationskoeffizienten ($r = 0,94$) als die vergleichbaren Daten bei Normaldruck und Raumtemperatur auf. Dies bedeutet, daß für größere Tiefen und bei nicht zu großen Temperaturgradienten eine zunehmende Korrelation zwischen der Dichte und V_p zu erwarten ist.

Für die Geraden- und Kurvenanpassungen an die beschriebenen Labordaten haben wir die Mittelwerte mit den zugehörigen Standardabweichungen der einzelnen Gesteinsgruppen berechnet, um eine Überwichtung einiger Gruppen zu vermeiden. In Abb. 11 (kristalline Gesteine bei Drücken bis 1 MPa) sind dazu eine angepaßte Gerade, ein angepaßtes Polynom 2. Grades und eine Potenz-Funktion eingezeichnet. Bei letzterer Kurve (untere Kurve in der Abbildung) handelt es sich um die für Sedimentgesteine hergeleitete Gardner-Formel (GARDNER et al. 1974).

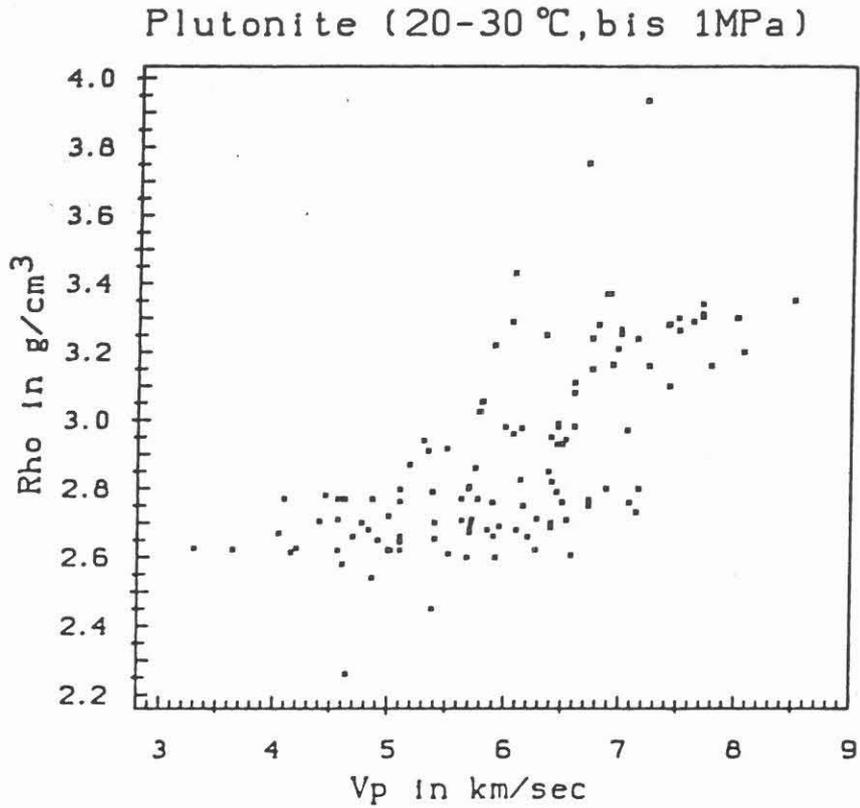


Abb. 6 Dichte von Plutoniten in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit Vp bei Drucken bis 1MPa und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

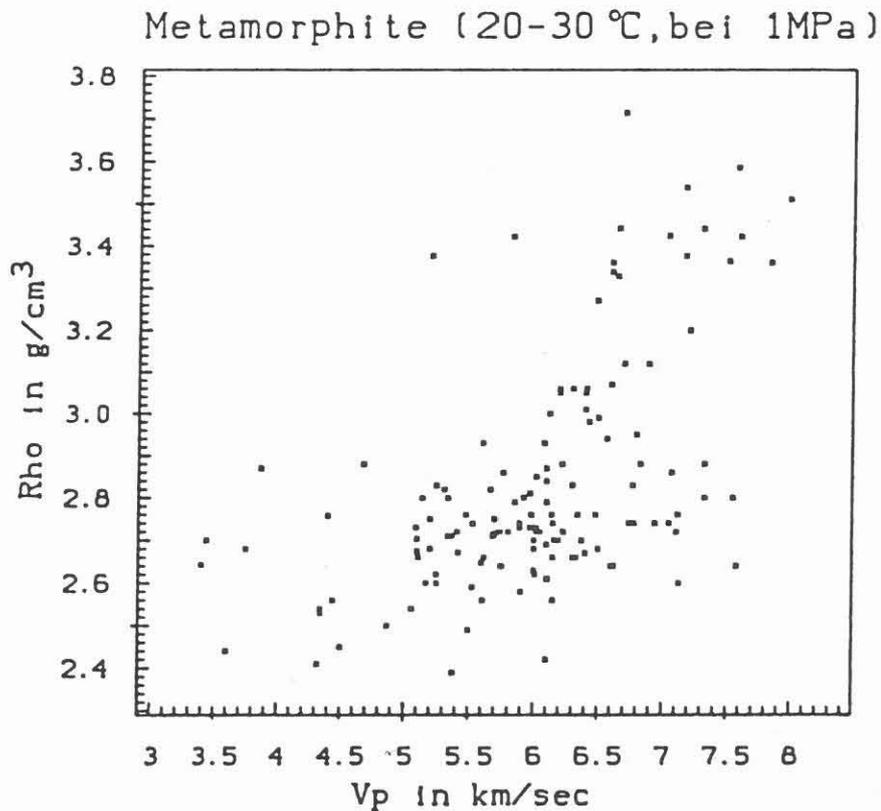


Abb. 7 Dichte von Metamorphiten in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit Vp bei Drucken bis 1MPa und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

Granite (20-30 °C, bis 1MPa)

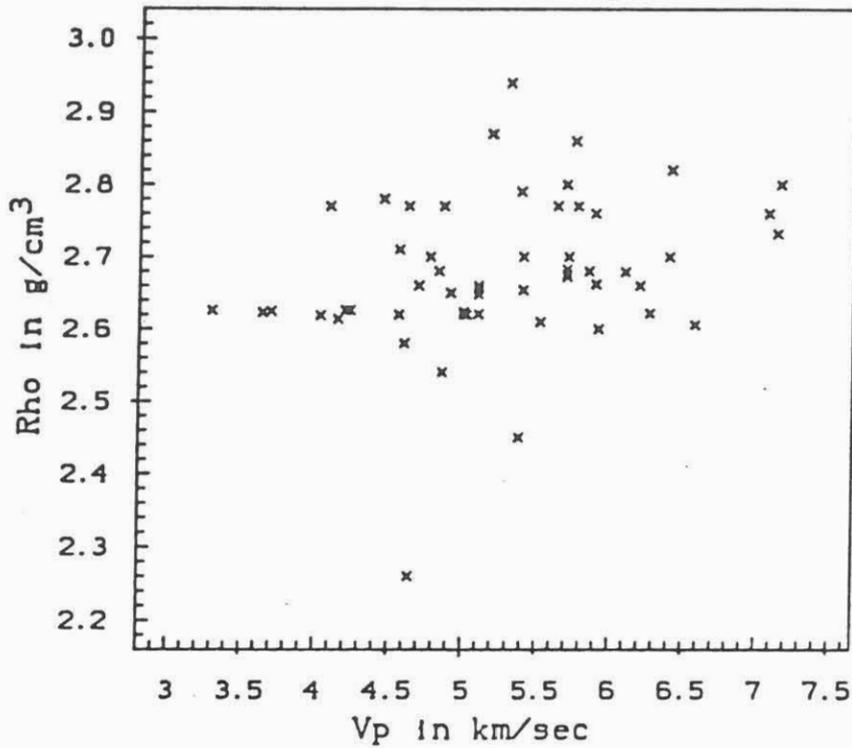


Abb. 8 Dichte von Graniten in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit Vp bei Drucken bis 1MPa und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

Serpentinite (20-30 °C, bis 1MPa)

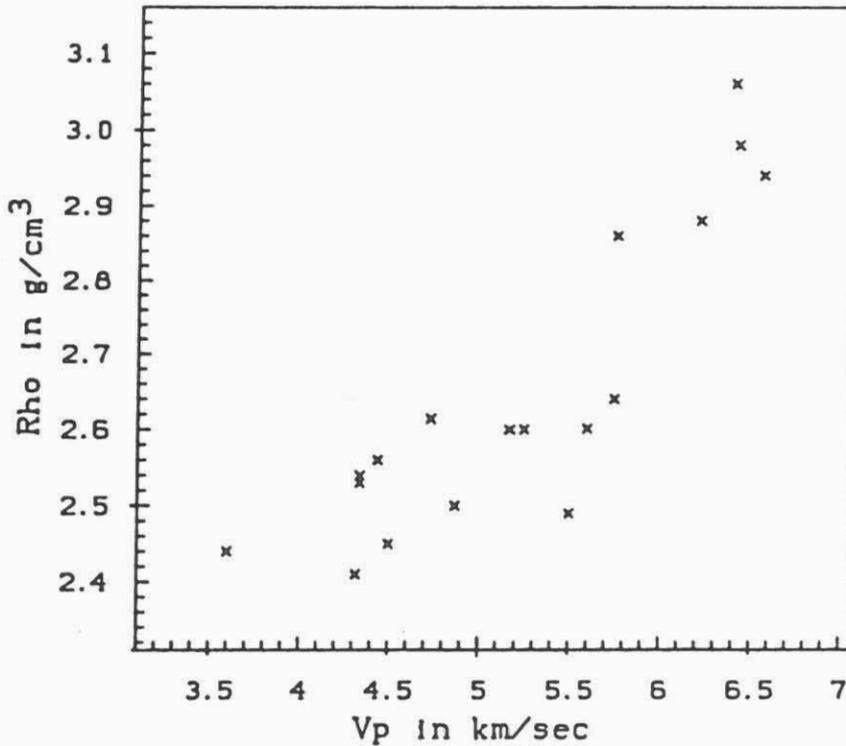


Abb. 9 Dichte von Serpentiniten in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit Vp bei Drucken bis 1MPa und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

Kristall. Gesteine (20-30 °C, 50 MPa)

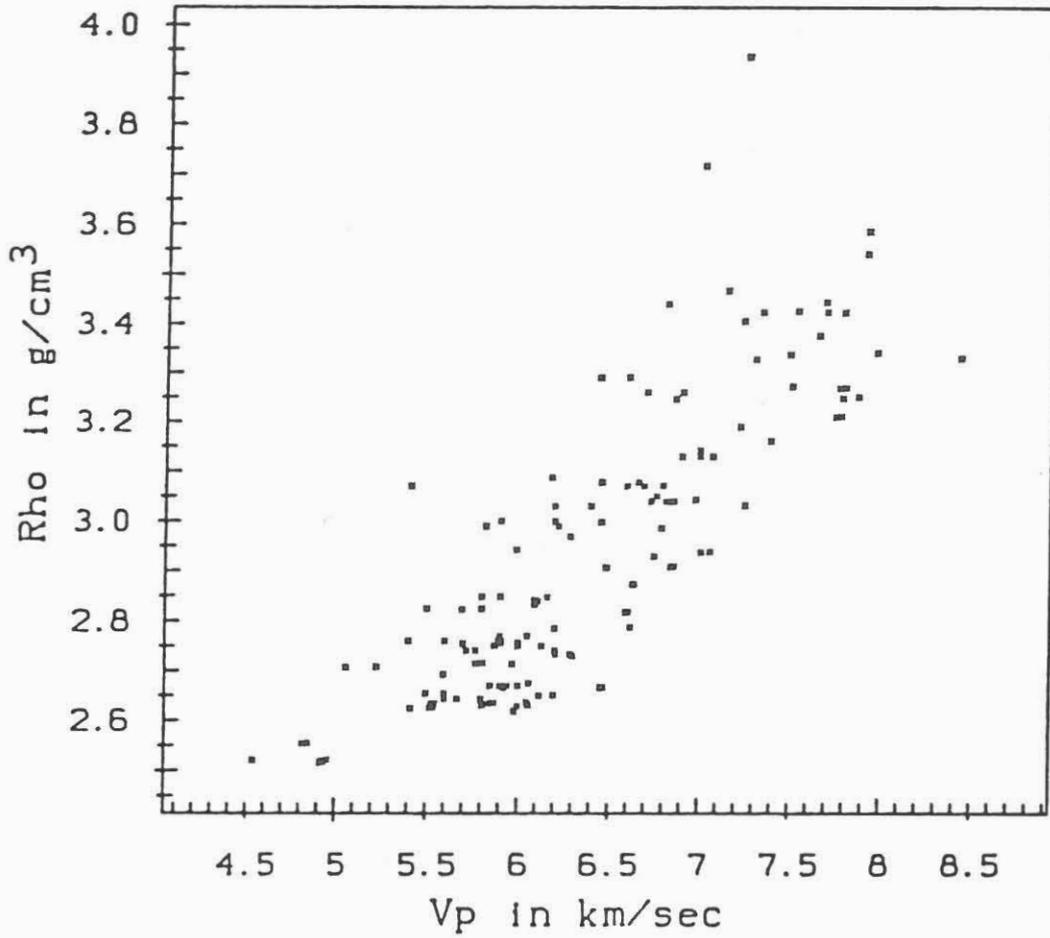


Abb. 10 Dichte von kristallinen Gesteinen in Abhängigkeit von Vp bei einem Druck von 50 MPa und bei Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

Kristall. Gesteine (20-30 °C, bis 1MPa)

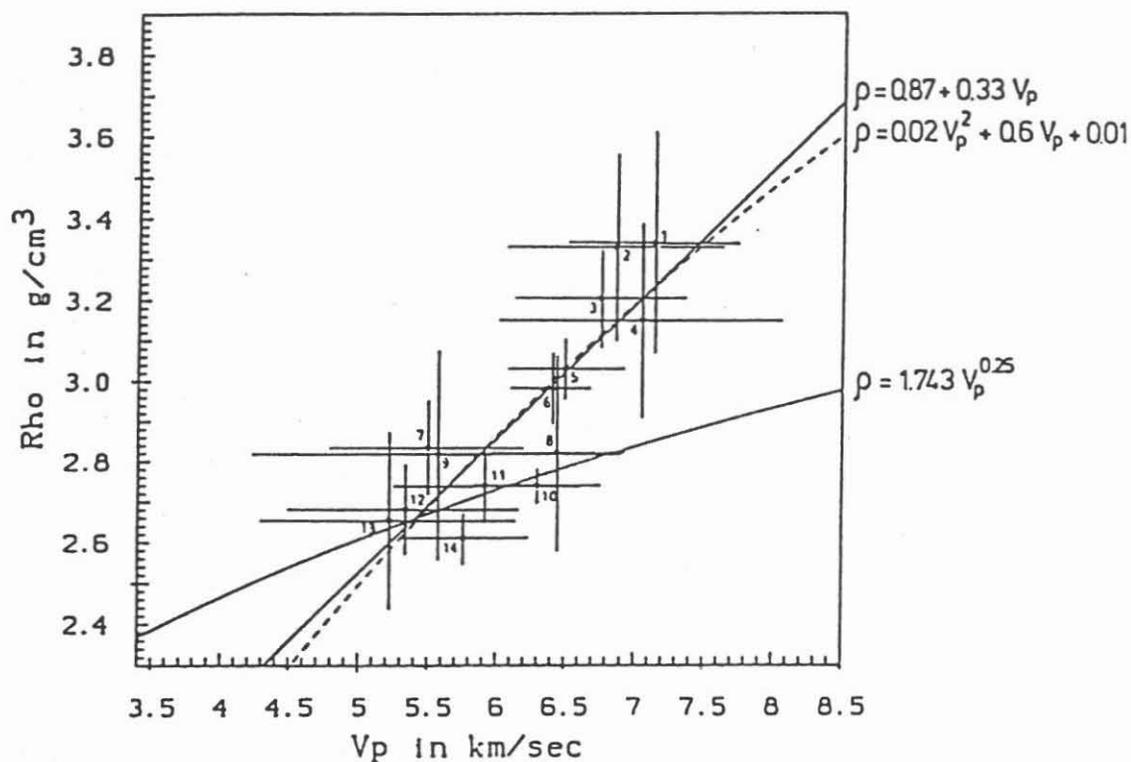


Abb. 11 Mittelwerte der Dichte in Abhängigkeit der Mittelwerte von V_p für kristalline Gesteinsgruppen bei Drucken bis 1 MPa und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C. Die Balken geben die jeweiligen Standardabweichungen wieder. Eingezeichnet sind eine angepasste Gerade (durchgezogene Gerade), ein angepasstes Polynom 2. Grades (gestrichelte Linie) und die Gardner-Kurve (durchgezogene Linie). Folgende Gesteinsgruppen wurden berücksichtigt:

Plutonite	quasi-isotrope Metamorphite
1 Dunit	2 Eklogit
3 Pyroxenit	5 Amphibolit
4 Peridotit	8 Charnokit
6 Gabbro/Norit	9 Gneiss
7 Diorit	11 Marmor
10 Anorthosit	13 Serpentinit
12 Granit	14 Quarzlit

Offensichtlich ist diese nur im unteren Dichte- und Geschwindigkeitsbereich für kristalline Gesteine anwendbar. Eine von uns neu berechnete Regression nach dem Ansatz von Gardner ergibt eine wesentlich verbesserte Anpassung (siehe Abb. 12).

Zwischen dieser Lösung, der linearen Anpassung und dem Polynom 2. Grades ist visuell keine Entscheidung über die Güte der Regression mehr möglich. Die Unterschiede werden erst deutlich, wenn man die Bestimmtheitsmaße r^2 miteinander vergleicht:

modifizierte Gardner-Formel

$$\bar{\rho} = (0,852 \bar{V}_p^{0,676}) \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} r^2 &= 0,72 \\ r &= 0,85 \end{aligned}$$

lineare Regression

$$\bar{\rho} = (0,87 + 0,331 \bar{V}_p) \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} r^2 &= 0,74 \\ r &= 0,86 \end{aligned}$$

Polynom 2. Grades

$$\bar{\rho} = (-0,021 \bar{V}_p^2 + 0,603 \bar{V}_p + 0,009) \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} r^2 &= 0,78 \\ r &= 0,89 \end{aligned}$$

Wie zu erwarten war, weist das Polynom 2. Grades das größte Bestimmtheitsmaß auf. Die Unterschiede fallen aber so gering aus, daß die Gerade als einfachste Lösung vorzuziehen ist.

Im Vergleich dazu sind in Abb. 13 die Daten bei 50 MPa Druck ebenfalls zu Mittelwerten der einzelnen Gesteinsgruppen zusammengefaßt und die dazugehörige Regressionsgerade eingezeichnet. Wie schon vorher bemerkt, ist hier der Korrelationskoeffizient deutlich größer als beim Normaldruck:

$$\bar{\rho} = (0,65 + 0,36 \bar{V}_p) \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} r^2 &= 0,88 \\ r &= 0,94 \end{aligned}$$

Der Vergleich der vorangegangenen Regressionen mit Gleichungen aus der Literatur gestaltet sich schwierig, da meist bei den statistischen Untersuchungen in der Literatur die Dichte als unabhängige und die seismische Geschwindigkeit als abhängige Variable behandelt wird. Für den Vergleich zwischen Dichtemodellen, hergeleitet aus Schweremessungen und aus der Geschwindigkeitsverteilung, wird jedoch die umgekehrte Abhängigkeit benötigt. Für streuende Werte ergeben sich aber für beide Fälle Anpassungen mit unterschiedlichen Faktoren.

Kristall. Gesteine (20-30 °C, bis 1MPa)

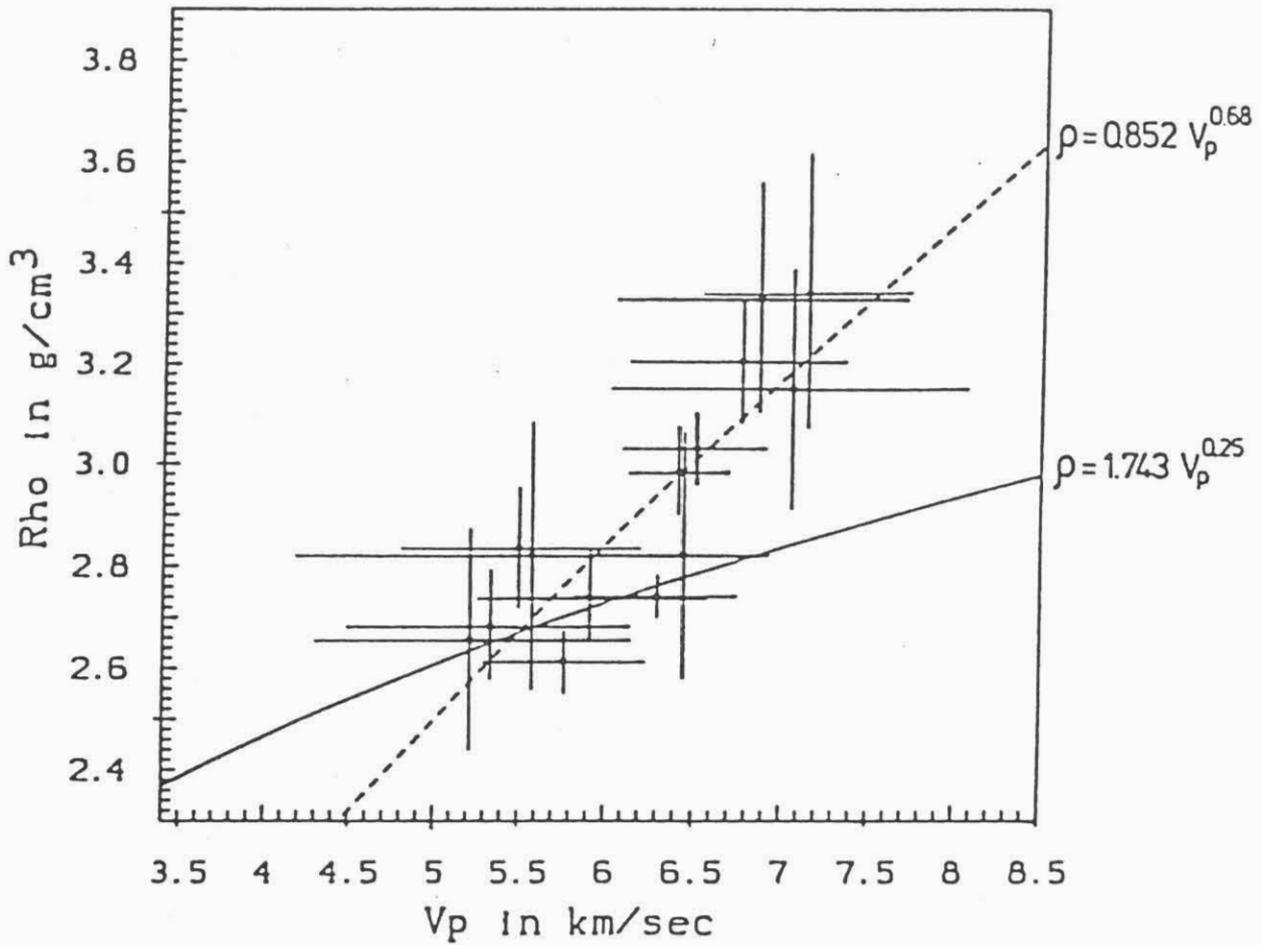


Abb. 12 Wie Abbildung 11, nur fehlt das Polynom und die Gerade. Statt dessen ist eine neue Anpassung nach dem Ansatz von Gardner wiedergegeben (gestrichelte Linie).

CRYSTALLINE ROCKS(20-30 °C, 50 MPa)

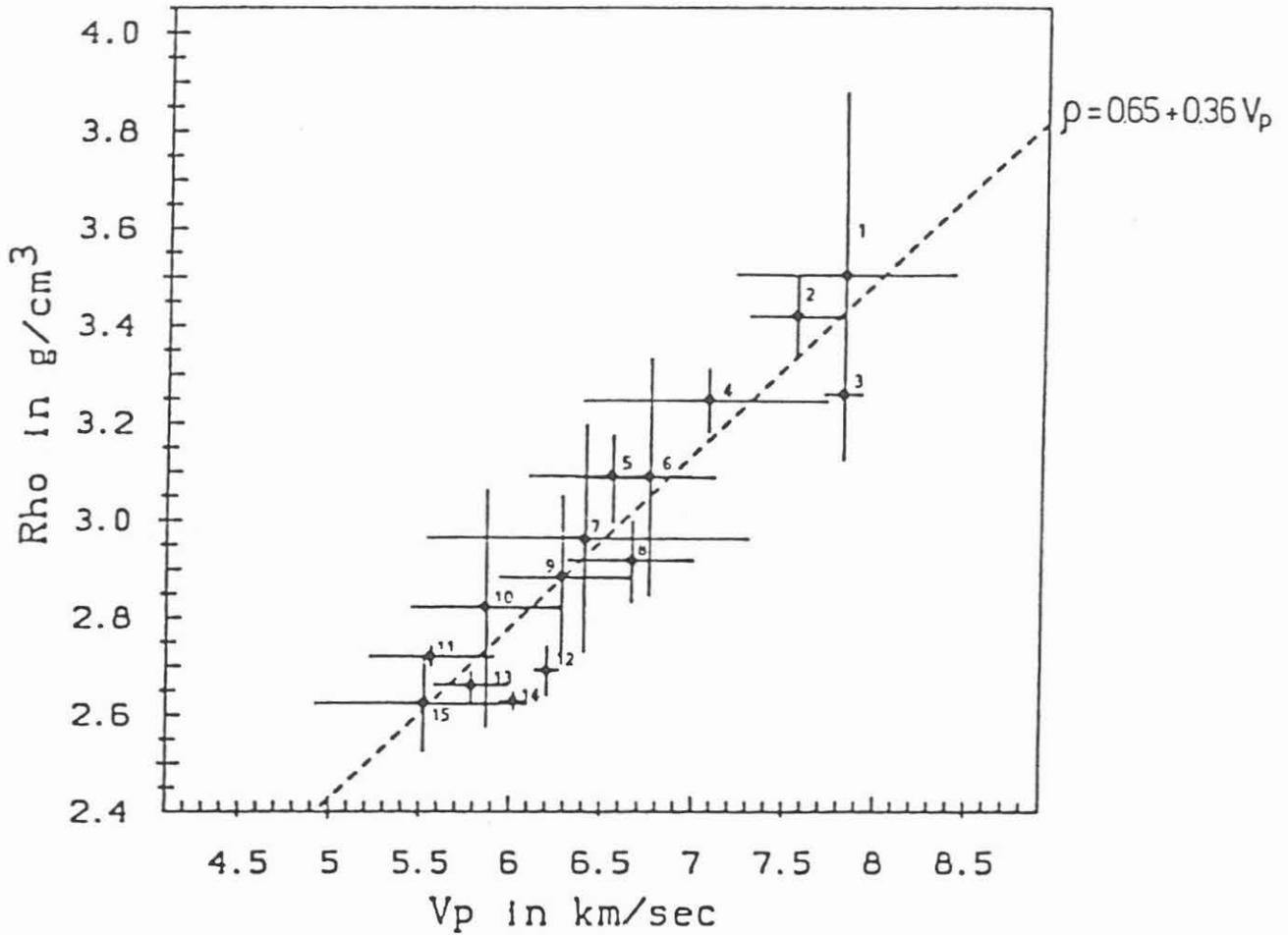


Abb. 13 Mittelwerte der Dichte in Abhängigkeit der Mittelwerte von V_p für kristalline Gesteinsgruppen bei 50 MPa Druck und Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C. Die angepasste Gerade ist gestrichelt eingezeichnet. Folgende Gesteinsgruppen wurden berücksichtigt:

Plutonite
1 Dunit
3 Pyroxenit
4 Peridotit
6 Gabbro
12 Diorite
14 Granite

Metamorphite
2 Eklogit
5 Amphibolit
7 Metaplutonit
(z.B. serpentini-
sirtes Peridotit)
8 Metagabbro
9 krist. Schiefer
10 Gneiss
11 Spillit
13 Quartzit
15 Serpentin

Um einen Vergleich zu ermöglichen, haben wir daher die Regression beidseitig durchgeführt. Danach ergibt sich mit den Gleichungen von GEBRANDE (1982) die folgende Gegenüberstellung:

Plutonite bis 1 MPa:

Gebrände $\bar{v}_p = (-6,73 + 4,36\bar{\rho} \pm 0,003) \text{ km/s}$

eigene Berechnung $\bar{v}_p = (-1,07 + 2,48\bar{\rho} \pm 0,11) \text{ km/s}$

quasi-isotrope Metamorphite bis 1 MPa:

Gebrände $\bar{v}_p = (-6,93 + 4,41\bar{\rho} \pm 0,13) \text{ km/s}$

eigene Berechnung $\bar{v}_p = (+0,49 + 1,94\bar{\rho} \pm 0,13) \text{ km/s.}$

Dabei treten deutliche Unterschiede sowohl bei den Steigungen als auch bei den Schnittpunkten der Geraden mit der Ordinate auf. Die Faktoren unserer Relationen scheinen jedoch in der Größenordnung richtig zu liegen, wie der folgende Vergleich mit Formeln bei höheren Drücken zeigt:

Plutonite und Metamorphite bei 50 MPa (eigene Berechnung):

$$\bar{v}_p = (-0,23 + 2,29\bar{\rho} \pm 0,13) \text{ km/s}$$

Plutonite und Metamorphit mit mittlerem Atomgewicht m bei 200 MPa (Gebrände):

$$v_p = (-0,3 - 0,18 (m-21,5) + 2,41\bar{\rho}) \text{ km/s}$$

Plutonite und Metamorphite mit $m < 24$ bei 1 000 MPa (BIRCH 1961):

$$v_p = (-0,98 + 2,76\bar{\rho} \pm 0,33) \text{ km/s.}$$

Mit Korrelationsformeln ist es auch möglich, von vornherein die Inversion der Bohrlochschweredaten mit Hilfe von Vertrauensbereichen einzuschränken. In Abb. 14 ist ein Beispiel dafür gegeben. Es handelt sich hier wiederum um die Zusammenstellung von Daten bei einem Druck von 50 MPa. Durch die Punktwolke wurde eine Regressionsgerade gelegt und ein 95 %-Vertrauensbereich berechnet und markiert. Daraus ergibt sich für einen Geschwindigkeitswert ein Streubereich der Dichte, der als a priori Information bei der Inversion der Schweredaten eingehen kann.

Kristall. Gesteine (20-30 °C, 50 MPa)

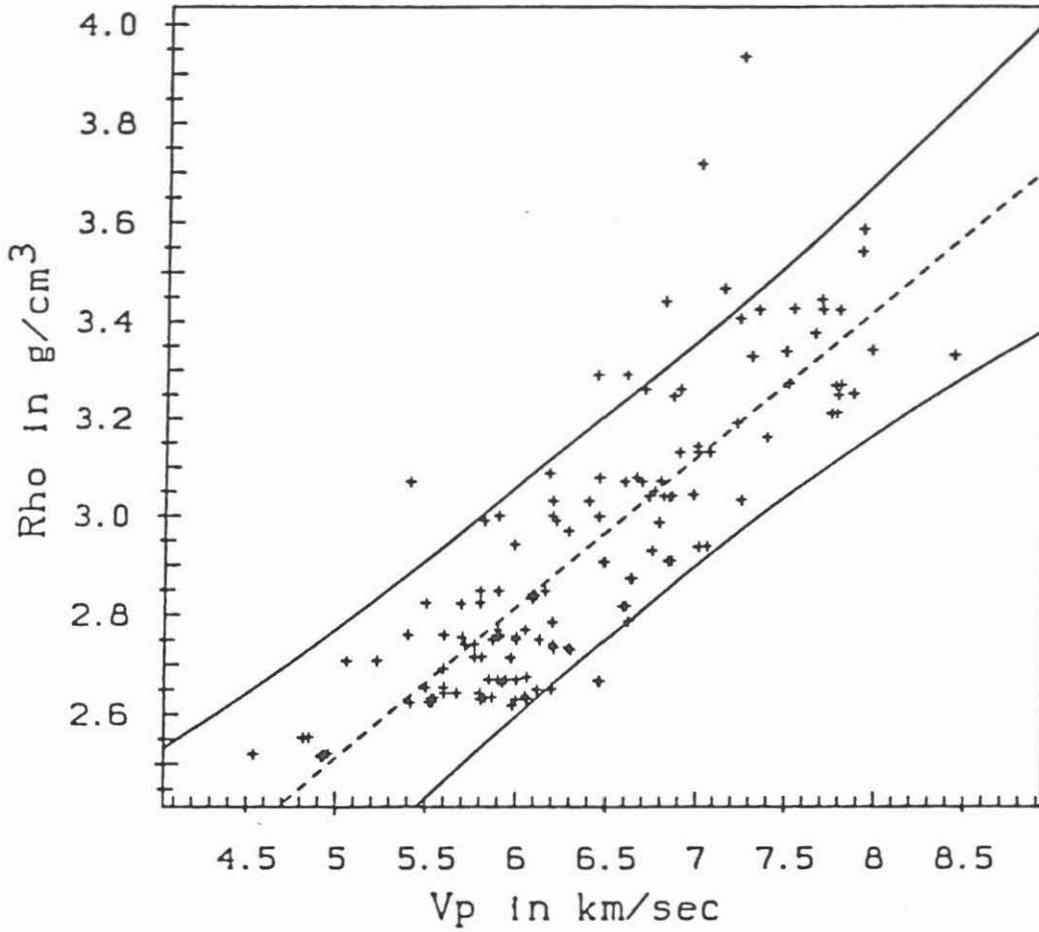


Abb. 14 Dichte von kristallinen Gesteinen in Abhängigkeit von V_p bei einem Druck von 50 MPa und bei Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C. Die zugehörige Regressionsgerade ist gestrichelt eingezeichnet. Die durchgezogenen Linien markieren die Ober- und Untergrenzen des 95 % Konfidenzbereiches für die Gerade.

Außerdem soll der Versuch unternommen werden, mit Hilfe der Datenbank passende Korrelationsformeln speziell für die Bohrlochumgebung der KTB-Bohrungen sukzessive mit der Bohrteufe zu bestimmen. Mit den resultierenden Relationen und Geschwindigkeitsinformationen aus der Seismik könnte die Dichteverteilung auch noch in den Tiefen abgeschätzt werden, in denen ein Einsatz des Bohrlochgravimeters nicht möglich ist.

4 Literatur

- Birch, F., 1961: The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2. - J. Geophys. Res. 66, 2199-2224.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. & Gregory, A. R., 1974: Formation velocity and density - the diagnostic basic for stratigraphic traps. - Geophysics 39, 770-780.
- Gebrande, H. 1982: In Landolt Börnstein, Group V (1b): Physical Properties of rocks, G. Angenheister (Ed.), Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1-99.