

Die Ursachen elektrischer Leitfähigkeitsanomalien in der KTB, eine Analyse mit multivariater Statistik

H. Winter, A. Rauen und H. Soffel (Ludwig-Maximilians-Universität München)

Zusammenfassung

Die Frage nach den Ursachen der Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit in der KTB-Hauptbohrung wurde mit der Faktorenanalyse, einem deskriptivem Verfahren der multivariaten Statistik, untersucht. Die Ergebnisse in dem Bohrlochabschnitt von 290 bis 7140 m und den einzelnen Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit um 2000 m bzw. 7800 m weisen auf abschnittsweise unterschiedliche Zusammenhänge zwischen den sechs untersuchten Parametern hin. Die elektrische Leitfähigkeit in der Zone bei 2000 m korreliert deutlich mit Graphit, Sulfiden und Kataklasten. Bei der Zone um 7800 m ist die LLD-Leitfähigkeit um eine Größenordnung höher als in der Zone um 2000 m. Im Faktorladungsplot zeigt sich hier, daß auch die salinaren Fluide und die durch die magnetische Suszeptibilität repräsentierten Minerale Magnetit und Pyrrhotin eine Bedeutung haben können. Möglicherweise wird diese Zone hoher elektrischer Leitfähigkeit durch das Zusammenwirken der Komponenten in ihrer Gesamtheit verursacht. Zur Quantifizierung sind weitere Untersuchungen der vorhandenen Daten mit verschiedenen statistischen Verfahren vorgesehen.

Einführung

Im KTB-Umfeld wurden durch geophysikalische Untersuchungen Zonen entdeckt, deren elektrische Leitfähigkeit 0,1 S/m und mehr beträgt (Haak et al., 1991). Ihre Lage findet sich sowohl oberflächennah in den ersten hundert Metern als auch in mehreren Kilometern Tiefe. Solche guten elektrischen Leiter werden nicht nur lokal, sondern auch auf anderen Kontinenten meist in Tiefen um 10 km beobachtet (z. B. Haak and Hutton, 1986). In der KTB-Hauptbohrung (KTB-HB) selbst wurden mit dem Laterolog Deep Logging Tool (LLD) einzelne abgegrenzte Zonen mit Leitfähigkeiten bis über 1 S/m gefunden (ELEKTB, 1994; 1997). Die Ursachen von Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit in der Erdkruste sind Gegenstand aktueller, kontrovers geführter Diskussionen (Glover and Vine, 1994; Shankland et al., 1997; Yardley and Valley, 1997). Als Hauptkomponenten der elektrischen Leitfähigkeit werden dabei metallische Leiter wie Graphit, Sulfide und Metalloxide sowie elektrolytische Leiter in Form von Gebirgsfluiden diskutiert. Diese Fluide bestehen im wesentlichen aus Salzlösungen (K-, Na-, Mg-, Ca-Chloride) mit weiteren gelösten Elementen wie Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff (Nesbitt, 1993; Möller et al., 1997). Ein direkter, visueller Vergleich von Bohrlochmessungen und Labordaten der KTB-HB ergab eine Abschätzung der Verteilung von fluid- bzw. graphit- und vererzungsinduzierten Leitfähigkeitsanomalien in prozentualen Teufenstrecken (Winter, 1994; ELEKTB, 1994, 1997). Der umfangreiche Datensatz der KTB-Bohrungen, bestehend aus Laboruntersuchungen (Petrophysik, Geochemie, Geologie) und Bohrlochmessungen, bietet ideale Voraussetzungen für die Anwendung statistischer Verfahren auf die Fragen. Mit der Faktorenanalyse, einem deskriptiven Verfahren der multivariaten Statistik, sollen die Ursachen im einzelnen untersucht werden. Ziel ist es, die bestimmenden Faktoren herauszufinden, die zur erhöhten Leitfähigkeit in einzelnen Bohrabschnitten führen. Erste Erfahrungen und Ergebnisse mit der Bearbeitung von KTB-Daten mit multivariaten Verfahren sind bei Zimmermann (1991), Huenges (1997) und Pechnig et al. (1997) publiziert.

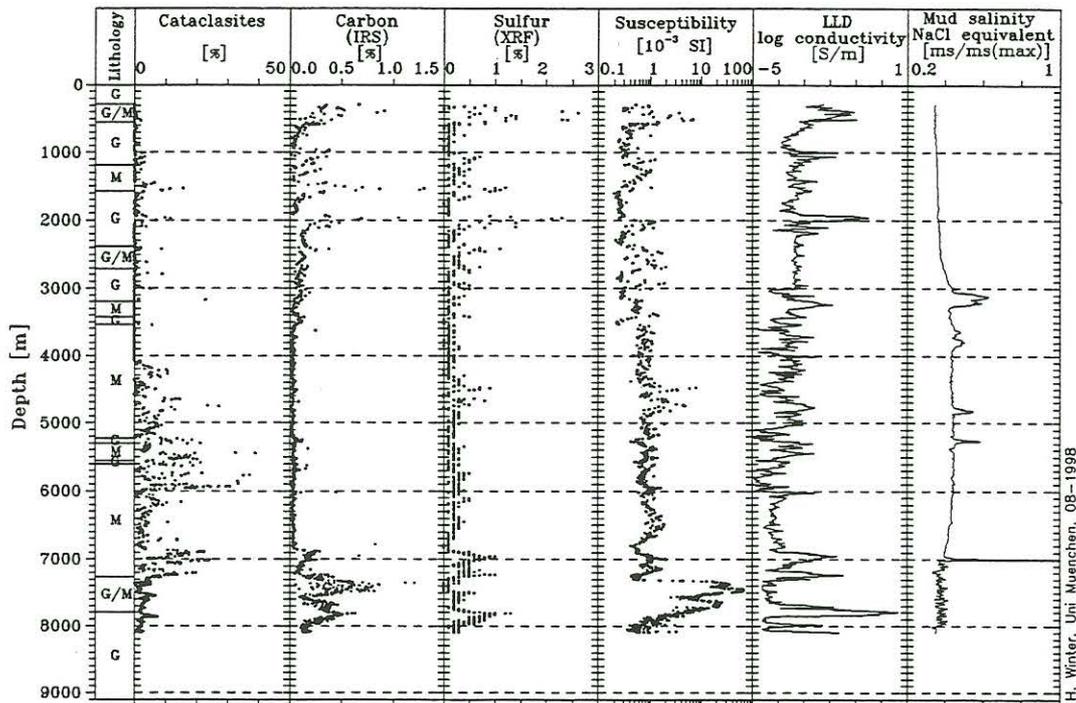
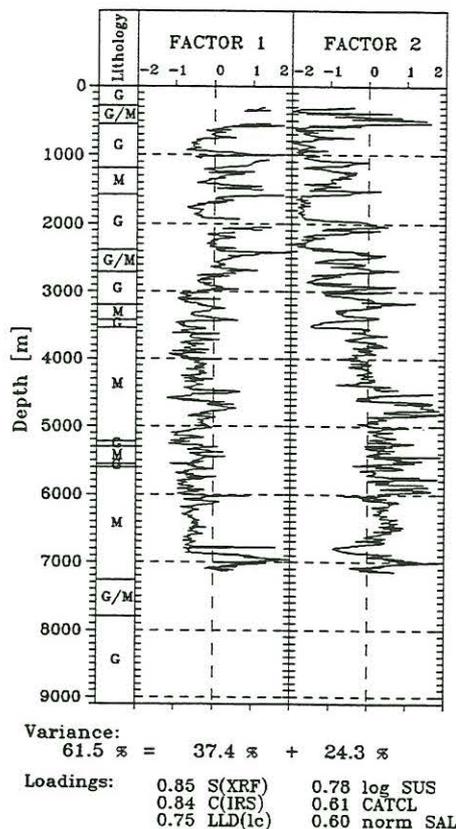


Fig. 1: Ausgewählte Daten der KTB-Hauptbohrung. Lithology: Lithologie, vereinfacht in Gneis (G) und Metabasit (M = Amphibolite und Metagabbros). Bohrkleinanalysen: Cataclasites (Kataklastitanteil), Carbon (Kohlenstoffgehalt, d. h. Graphit und Karbonate, aus der Infrarotspektroskopie), Sulfur (Schwefelgehalt aus Röntgenfluoreszenzanalyse), Susceptibility (Magnetische Suszeptibilität). Bohrlochmessungen: LLD (elektrische Leitfähigkeit aus Laterolog Deep), Mud salinity (Spülungssalinität aus Mud Resistivity Log, umgerechnet in NaCl-Äquivalente).

Datenaufbereitung

Die Daten der KTB-Hauptbohrung sind im wesentlichen in KTB-Reports (z. B. KTB-Report 94-1, 95-2) und der Special section "The KTB Deep Drill Hole" des *Journal of Geophysical Research* publiziert (Berckhemer et al., 1997; ELEKTB, 1997; Pechinig et al., 1997). Zunächst werden die vorgesehenen Daten aus Petrophysik, Geochemie und Geologie unter Einbeziehung von Bohrkern-, Bohrklein- und Bohrlochmessungen in einheitliche, teufenorientierte Datensätze zusammengeführt. Die Teufenabstände orientieren sich an dem Einzeldatensatz mit den größten Original-Meßabständen. Darauf werden alle anderen Daten bezogen. Die einzelnen Teufenpunkte repräsentieren dann die "Fälle" und die petrophysikalischen und geochemischen Parameter die "Variablen" in der Terminologie der Statistik. Für die KTB-HB, 1. bis 4. Bohrabschnitt, umfaßt dieser Datensatz den Teufenbereich 290 bis 8100 m mit 1277 Fällen.

Als Eingangsdaten zur Faktorenanalyse wurden sechs Variablen ausgewählt, bei denen ein Zusammenhang mit der elektrischen Leitfähigkeit vermutet wird (Fig. 1): Vier Parameter aus *Bohrkleinuntersuchungen*: magnetische Suszeptibilität, Kataklastitanteil, Kohlenstoffgehalt und Schwefelgehalt und zwei Parameter aus *Bohrlochmessungen*: die elektrische Leitfähigkeit (LLD) und die normierte Spülungssalinität aus dem Mud Resistivity Log. Letztere kann als Indikator für ins Bohrloch eingeflossene Fluide dienen.



Die Berechnungen wurden für drei Bohrlochabschnitte durchgeführt:

1. Der Teufenbereich von 290 bis 7140 m (820 Fälle) als typischer Repräsentant für die KTB-HB. Aufgrund der Karbonatanteile in dem Kohlenstoffgehalt im Abschnitt von 7200 bis 7400 m wurden die Daten unterhalb 7140 m ausgeklammert.
2. Die Zone hoher elektrischer Leitfähigkeit in 2000 m Tiefe der KTB-HB (22 Fälle von 1808 bis 2096 m).
3. Die Zone hoher elektrischer Leitfähigkeit im Abschnitt von 7700 bis 7900 m (98 Fälle) der KTB-HB.

Fig. 2: Faktorwerte als Funktion der Tiefe für den Abschnitt 290 bis 7140 m (820 Fälle). Die Faktoranalyse von sechs Variablen zwei Faktoren. Varimax-Rotation. Die Gesamtvarianz setzt sich aus den beiden Prozentangaben zusammen. Die Zahlen vor den Variablen sind die Faktorladungen.

Die methodischen Schritte

Das Ziel der Faktorenanalyse ist es, verdeckte Strukturen in einer Menge voneinander unabhängiger Variablen aufzudecken. Aus dem Variablensatz werden möglichst wenige Faktoren extrahiert, die die Daten hinreichend genau repräsentieren und eine einfache Interpretation erlauben. Die Daten werden zunächst standardisiert und dann auf wenige, weitgehend unabhängige Faktoren reduziert, die den größten Teil des Variablensatzes erklären. Dieser erklärbare Anteil an der Gesamtvarianz wird *Kommunalität* genannt. Die Faktorladungen beschreiben den Beitrag einer Variable zum Faktor mit Werten zwischen -1 und +1. Je größer diese Zahl ist, um so stärker wird der Faktor von dieser Variablen bestimmt. Die Lage der Variablen im sogenannten Faktorladungsplot (= Crossplot zweier Faktoren) kann dann interpretiert werden. Die Achsenabschnitte geben den Wert an, mit dem die Variable den jeweiligen Faktor lädt. Eine enge Nachbarschaft von Variablen im Ladungsplot ist gleichbedeutend mit einer hohen Korrelation untereinander. Die Faktormatrix wird zur besseren Darstellung jeweils in ein optimales Koordinatensystem rotiert (Varimax-Rotation). Die einzelnen Verfahrensschritte zur Lösung des Gleichungssystems (Schätzung der Anfangswerte, Faktorenextraktion, Rotation) sind bei Zimmermann (1991) und Wernecke (1995) ausführlich beschrieben (siehe Anhang). Die Bearbeitung des Datensatzes erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS.

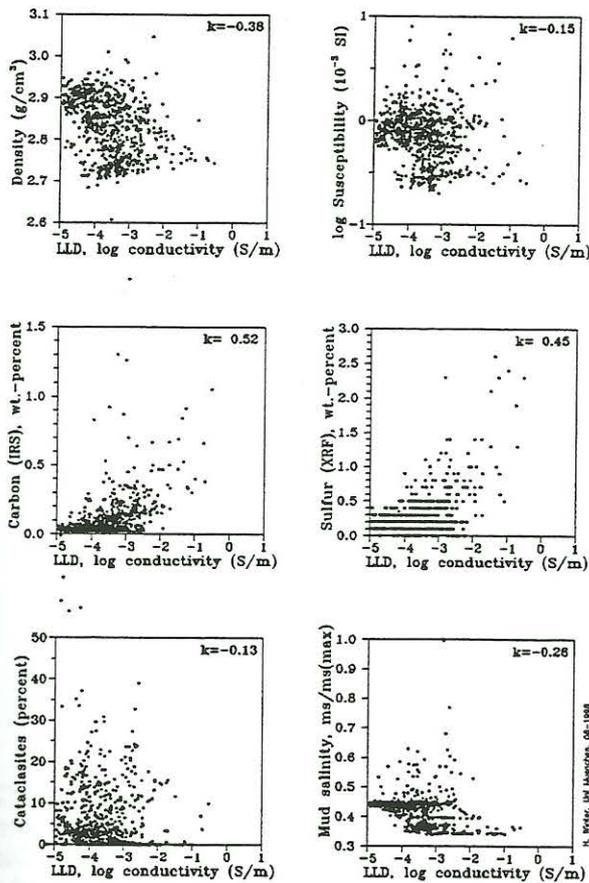


Fig. 3: Crossplot von sechs Parametern der KTB-HB gegen die elektrische Leitfähigkeit aus dem Laterolog Deep (LLD) im Abschnitt 290 bis 7140 m. Bohrkleinanalysen: Dichte, magnetische Suszeptibilität, Kohlenstoffgehalt, Schwefelgehalt, Kataklastanteil. Bohrlochmessung: normierte Spülingssalinität aus dem Mud Resistivity Log.

Ergebnisse

Die bivariaten Darstellungen in Crossplots (Fig. 3, 5 und 7) geben einen Überblick der Verteilung einzelner Parameter bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit LLD. Zusätzlich ist der lineare Korrelationskoeffizient k angegeben. Die Faktorenanalyse reduziert in allen drei Bohrlochabschnitten die sechs Variablen auf zwei Faktoren. Der durch das Faktorenmodell erklärable Anteil des Datensatzes beträgt beim Abschnitt von 290 - 7140 m 61,5%, im Intervall 1808 - 2096 m 88% und von 7700 - 7900 m 69%. In Fig. 2 sind beispielhaft die Faktorwerte für den Abschnitt 290 bis 7140 m (820 Fälle) dargestellt.

In den Crossplots für den Abschnitt von 290 bis 7140 m kann beim Kohlenstoff- und Schwefelgehalt ein tendenzieller Zusammenhang mit der LLD-Leitfähigkeit erkannt werden (Fig. 3). Die linearen Korrelationskoeffizienten betragen 0,56 bzw. 0,42. Die anderen Parameter Dichte, log. Suszeptibilität, Kataklastite und normierte Salinität zeigen keine auffällige Korrelation. Der Faktorladungsplot (Fig. 4) verdeutlicht die relativen Zusammenhänge. Der Faktor 1 wird weitgehend von der elektrischen Leitfähigkeit LLD sowie dem Kohlenstoff- und Schwefelgehalt des Bohrkleins bestimmt, während Kataklastite, Suszeptibilität und die Spülingssalinität den zweiten, unabhängigen Faktor bilden.

KTB HB 290 - 7140 m
Factor loadings of 6 variables

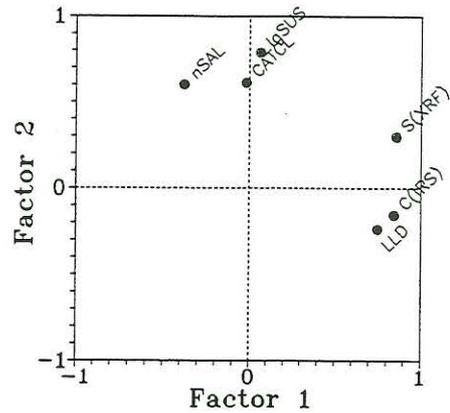


Fig. 4: Crossplot der Faktorladungen (2 Faktoren aus 6 Variablen) für den Abschnitt von 290 bis 7140 m. Die sechs Variablen sind logarithmische Suszeptibilität (IgSUS), Kataklastanteil (CATCL), Kohlenstoffgehalt (C(IRS)), Schwefelgehalt (S(XRF)), logarithmische elektrische Leitfähigkeit LLD (LLD(lc)) und normierte Spülingssalinität (nSAL). Darstellung nach Varimax-Rotation.

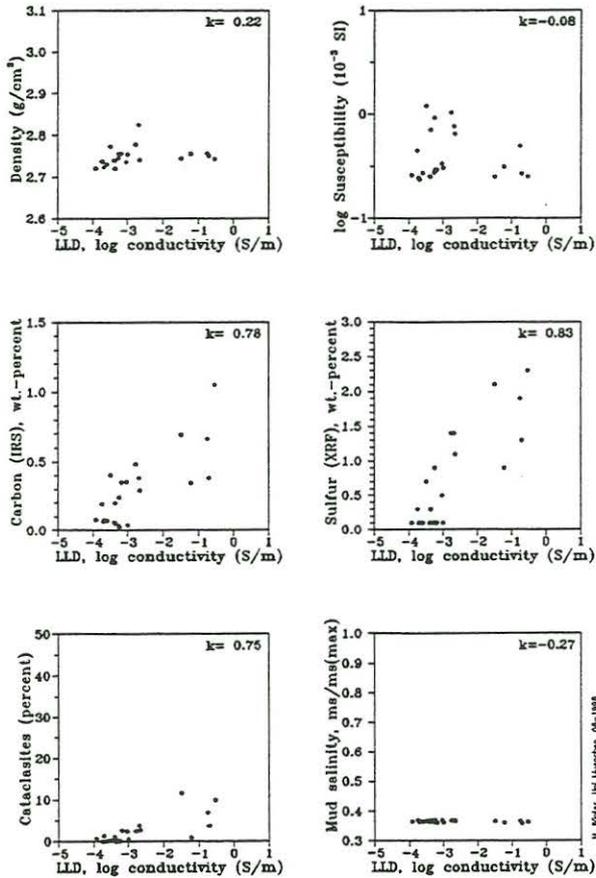


Fig. 5: Crossplot von sechs Parametern der KTB-HB gegen die elektrische Leitfähigkeit aus dem Laterolog Deep (LLD) im Abschnitt 1808 bis 2096 m. Bohrkleinanalysen: Dichte, magnetische Suszeptibilität, Kohlenstoffgehalt, Schwefelgehalt, Kataklasitanteil. Bohrlochmessung: normierte Spülsalinität aus dem Mud Resistivity Log.

Für die Zone von 1808 bis 2096 m (22 Fälle) weisen die Crossplots (Fig. 5) den Kohlenstoff- und Schwefelgehalt sowie die Kataklasite als eng korreliert mit der LLD-Leitfähigkeit aus ($k = 0,78$ für Kohlenstoff, $k = 0,83$ für Schwefel und $k = 0,75$ für Kataklasite). Die Faktorenanalyse (Fig. 6) zeigt zwei deutliche Gruppen von vier bzw. zwei Variablen mit jeweils hohen Ladungen auf die zwei Faktoren: Faktor 1 wird von der elektrischen Leitfähigkeit mit den Kataklasiten und den Komponenten Graphit und Schwefel gebildet, während der Faktor 2 im wesentlichen von der Suszeptibilität und Spülsalinität geladen wird.

Bei der tiefen Zone von 7700 bis 7900 m (98 Fälle) deuten Cross- und Faktorladungsplots auf andere Verhältnisse gegenüber dem oberen Abschnitt hin. Schwefel- und Kohlenstoffgehalt sind mit der elektrischen Leitfähigkeit weniger stark korreliert und die Kataklasite scheinen ganz unkorreliert zu sein. Die Faktorenanalyse führt zu einer deutlichen Trennung der einzelnen Variablen im Faktorladungsplot. Hohe Ladungen ($> 0,8$) werden nur noch vom Schwefelgehalt beim Faktor 1 und von der elektrischen Leitfähigkeit LLD beim Faktor 2 erreicht. Die anderen vier Variablen Suszeptibilität, Kohlenstoffgehalt, Spülsalinität und Kataklasite tragen jeweils zu beiden Faktoren bei. Besonders auffällig ist in diesem Abschnitt die Trennung von elektrischer Leitfähigkeit und Schwefelgehalt in zwei unabhängige Faktoren, während die Kataklasite beide Faktoren mit etwa gleichen Ladungen versehen. Auch tragen jetzt Spülsalinität und magnetische Suszeptibilität zu dem Faktor 2 (elektrische Leitfähigkeit) bei. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zu der oberen Zone.

KTB HB 1808 - 2096 m
Factor loadings of 6 variables

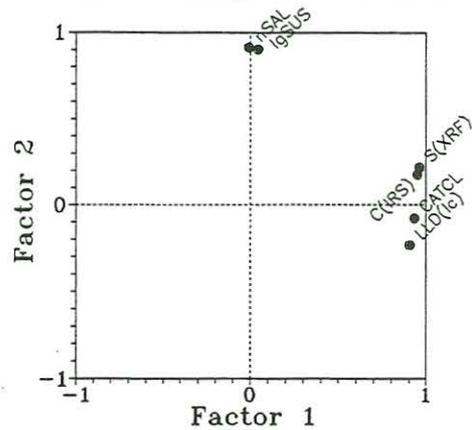


Fig. 6: Crossplot der Faktorladungen (2 Faktoren aus 6 Variablen) für den Abschnitt von 1808 bis 2096 m. Die sechs Variablen sind logarithmische Suszeptibilität (lgSUS), Kataklasitanteil (CATCL), Kohlenstoffgehalt (C(IRS)), Schwefelgehalt (S(XRF)), logarithmische elektrische Leitfähigkeit LLD (LLD(lc)) und normierte Spülsalinität (nSAL). Darstellung nach Varimax-Rotation.

KTB HB 7700 - 7900 m

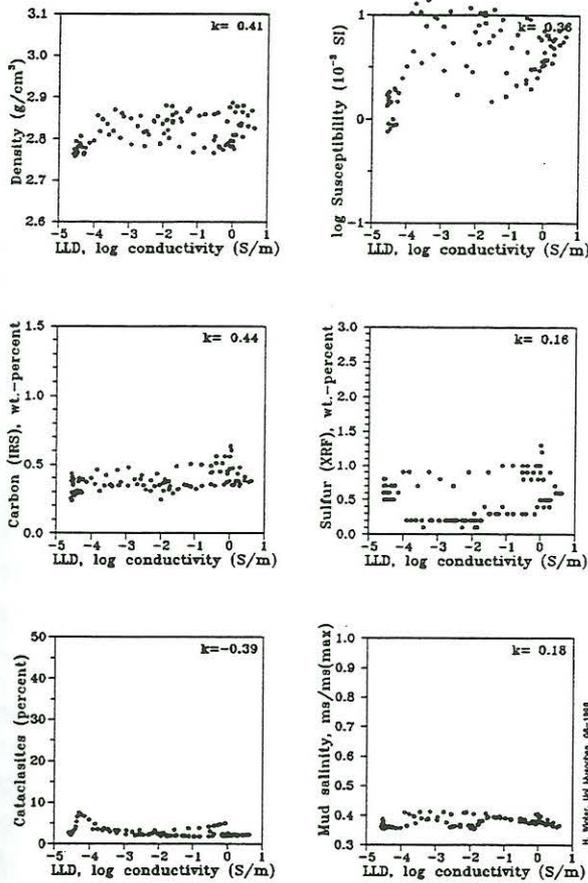


Fig. 7: Crossplot von sechs Parametern der KTB-HB gegen die elektrische Leitfähigkeit aus dem Laterolog Deep (LLD) im Abschnitt 7700 bis 7900 m. Bohrkleinanalysen: Dichte, magnetische Suszeptibilität, Kohlenstoffgehalt, Schwefelgehalt, Kataklastanteil. Bohrlochmessung: normierte Spülingssalinität aus dem Mud Resistivity Log.

KTB HB 7700 - 7900 m
Factor loadings of 6 variables

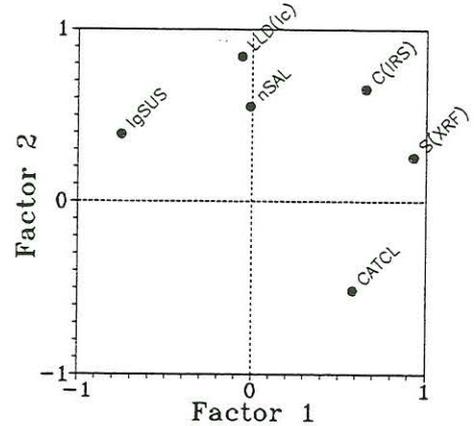


Fig. 8: Crossplot der Faktorladungen (2 Faktoren aus 6 Variablen) für den Abschnitt von 7700 bis 7900 m. Die sechs Variablen sind logarithmische Suszeptibilität (lgSUS), Kataklastanteil (CATCL), Kohlenstoffgehalt (C(IRS)), Schwefelgehalt (S(XRF)), logarithmische elektrische Leitfähigkeit LLD (LLD(lc)) und normierte Spülingssalinität (nSAL). Darstellung nach Varimax-Rotation.

Diskussion

Die Faktorenanalyse von sechs ausgewählten Variablen führt für die zwei untersuchten prominenten Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit in der KTB-HB zu verschiedenen Ergebnissen. In der oberen Zone um 2000 m sind im wesentlichen Graphit und Sulfide mit der elektrischen Leitfähigkeit verknüpft. Bei der unteren Zone um 7800 m, deren elektrische Leitfähigkeit noch um eine Größenordnung höher ist, treten weitere Komponenten wie Spülingssalinität und magnetische Suszeptibilität hinzu.

Die Zone um 2000 m in der KTB-HB wird als ein Bestandteil der Nottersdorfer Störungszone angesehen. An ihrem Ausstreichen an der Erdoberfläche wurde eine ausgeprägte Eigenpotentialanomalie gemessen (Haak et al., 1991; ELEKT B, 1997). Die Modellrechnungen zu deren Entstehung erfordern einen elektrischen Leiter mit metallischem Leitfähigkeitsmechanismus, der sich über mehrere hundert Meter in die Tiefe erstreckt (Stoll et al., 1995; ELEKT B, 1997). Die Faktorenanalyse bestätigt diese Modellvorstellung insofern, als in dieser Zone die metallisch leitenden Komponenten Graphit und Sulfide eng mit der elektrischen Leitfähigkeit verknüpft sind. Eventuell hier vorhandene Fluide leisten aufgrund ihrer geringen Salinität noch keinen nennenswerten Beitrag zur elektrischen Leitfähigkeit.

Im Abschnitt von 7700 bis 7900 m kann weder durch die Crossplots noch durch die Faktorenanalyse eine so eindeutige Zuordnung der elektrischen Leitfähigkeit zu den untersuchten Parametern erreicht werden. Im Faktorladungsplot rücken der Fluidanzeiger nSAL und die magnetische Suszeptibilität in die Nähe der LLD-Leitfähigkeit, während die Graphit und Sulfide repräsentierenden Variablen C(IRS) und S(XRF) auch zum zweiten, von der elektrischen Leitfähigkeit unabhängigen, Faktor beitragen. Die zunehmende Rolle der Fluide deckt sich mit der Beobachtung von spontanen Fluidzutritten während des Bohrens (Machon, 1995). Es wurden in den Teufen 7010 m, 7233 - 7478 m, 7544 m, 7669 m, 7725 - 7790 m, 8040 m, und 8657 m deutliche Fluidzutritte (> 10 Liter) beobachtet. Allerdings besteht eine Diskrepanz zwischen detektierten Fluiden und geringer Variation der Spülungssalinität, die diesen Parameter als Fluidanzeiger weniger geeignet erscheinen läßt. Hierfür ist vor allem die hohe Spüldichte verantwortlich, mit der Fluidzutritte weitgehend unterdrückt wurden. Die magnetische Suszeptibilität kann als Vertreter der magnetischen Minerale Magnetit und Pyrrhotin angesehen werden, die teilweise auch eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen. Insgesamt sind die Verhältnisse sehr verschieden von denen in der Zone um 2000 m, zum einen durch die zusätzlichen Komponenten und zum zweiten durch die verteilte Lage der Variablen im Faktorladungsplot. Es erhebt sich auch die Frage, ob eventuell andere, noch nicht einbezogene Parameter einen Beitrag zur elektrischen Leitfähigkeit leisten. Diese Überlegungen sollen Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Eine besondere Rolle nehmen die Kataklastite ein. Die vielfach berichteten gemeinsamen Vorkommen von Graphit und Kataklastiten (z. B. Zulauf et al., 1990; ELEKTB, 1997) scheinen nur für bestimmte Abschnitte der Tiefbohrung gültig zu sein. Nur in der Zone um 2000 m ergibt die Faktorenanalyse eine klare Verknüpfung beider Parameter. Sowohl für den großen Abschnitt von 290 - 7140 m wie auch für die Zone um 7800 m zeigt das Ergebnis eine deutliche Abtrennung der Kataklastite von Graphit, Sulfiden und elektrischer Leitfähigkeit.

Danksagung

Wir danken den Mitarbeitern des KTB-Feldlabors und der Bohrlochmeßgruppe für die Ausführung einer Vielzahl von Messungen an Proben und im Bohrloch. Dem GeoForschungsZentrum Potsdam danken wir für die Bereitstellung der Daten. Frau Dipl.-Min. A. Hoffmann (Univ. Gießen) und Herr Dipl.-Geol. R. Conze (GFZ Potsdam) halfen bei der Korrektur und Aufbereitung von Geochemiedaten. Herrn PD Dr. J. Reis (Univ. Frankfurt) danken wir für die Überlassung seiner Arbeit über die Faktorenanalyse. Frau Dr. R. Pechinig (RWTH Aachen) und den Herren Dr. Al Duba (Lawrence Livermore Laboratory) und Dr. G. Zimmermann (TU Berlin) danken wir für ausführliche Diskussionen über Methoden und Ergebnisse. Die Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (Kennzeichen So 72/59).

Literatur

- Berckhemer, H., A. Rauen, H. Winter, H. Kern, A. Kontny, M. Lienert, G. Nover, J. Pohl, T. Popp, A. Schult, J. Zinke and H. C. Soffel, Petrophysical Properties of the 9 km Deep Crustal Section at KTB. *J. Geophys. Res.*, 102, Special section "KTB", 18337-18361, 1997.
- ELEKTB-Gruppe (K. Bahr, J. Bigalke, M. Eisel, V. Haak, U. Harms, G. Hirschmann, E. Huenges, H. Jödicke, A. Kontny, J. Kück, G. Nover, A. Rauen, J. Stoll, J. Walther, H. Winter und G. Zulauf): Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung und ihrem Umfeld - was bringen sie uns Neues? *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft* (ISSN 0934-6554), Nr. 4/1994, pp. 2-40, 1994.
- ELEKTB-Group (V. Haak, F. Simpson, K. Bahr, J. Bigalke, M. Eisel, U. Harms, G. Hirschmann, E. Huenges, H. Jödicke, A. Kontny, J. Kück, G. Nover, A. Rauen, J. Stoll, J. Walther, H. Winter, and G. Zulauf): KTB and the electrical conductivity of the crust. *J. Geophys. Res.*, 102, B8, 18289-18305, 1997.

- Geider, F.J., K.E. Rogge und H.P. Schaaf, Einstieg in die Faktorenanalyse. Quelle & Meyer, Heidelberg, 1982.
- Glover, P.W J., and F J. Vine, Electrical conductivity of the continental crust, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2357-2360, 1994.
- Haak, V., and V.R.S. Hutton, Electrical resistivity in the continental lower crust. In: *The Nature of the Continental Crust*, edited J. B. Dawson et al., *Geol. Soc. Spec. Publ.*, Londodn, 24, 35-49, 1986.
- Haak, V., J. Stoll, and H. Winter, Why is the electrical resistivity around the KTB hole so low? *Phys. Earth Planet. Interiors*, 66, pp. 12-23, 1991.
- Huenges, E., Factors controlling the variances of seismic velocity, density, thermal conductivity and heat production of cores from the KTB pilot hole. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 341-344, 1997.
- KTB Report 94-1, Basic Research and Borehole Geophysics (Final Report), ed.: K. Bram and J. K. Draxler, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 1994.
- KTB Report 95-2, KTB Hauptbohrung, Results of Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory, Final Report: 0 - 9101 m, ed.: R. Emmermann, E. Althaus, P. Giese, and B. Stöckhert, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 1995.
- Machon, L., Geochemistry and Fluid Analysis. In: KTB Report 95-2 (KTB Hauptbohrung, Results of Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory, Final Report 0 - 9101 m), R. Emmermann, E. Althaus, P. Giese, B. Stöckhert (eds.), Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 1995.
- Möller, P., S.M. Weise, E. Althaus, W. Bach, H.J. Behr, R. Borchardt, K. Bräuer, J. Drescher, J. Erzinger, E. Faber, B.T. Hansen, E.E. Horn, E. Huenges, H. Kämpf, W. Kessels, T. Kirsten, D. Landwehr, M. Lodemann, L. Machon, A. Pekdeger, H.-U. Pielow, C. Reutel, K. Simon, J. Walther, F.H. Weinlich, and M. Zimmer, Paleofluids and recent fluids in the upper continental crust: Results from the German Continental Deep Drilling Program (KTB), *J. Geophys. Res.*, 102, B8, 18233-18254, 1997.
- Nesbitt, B.E., Electrical Resistivities of Crustal Fluids. *J. Geophys. Res.*, 98, B3, 4301-4310, 1993.
- Pechnig, R., S. Haverkamp, J. Wohlenberg, G. Zimmermann, and H. Burkhardt, Integrated log interpretation in the German Continental Deep Drilling Program: Lithology, porosity, and fracture zones. *J. Geophys. Res.*, 102, B8, 18362-18390, 1997.
- Reis, J.: Grundzüge der Korrelationsrechnung und Faktorenanalyse. *Arbeiten aus dem Institut für Psychologie der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität*, Heft 3/1990, Frankfurt am Main, 1990.
- Shankland, T.J., A.G. Duba, E.A. Mathez, and C.L. Peach, Increase of electrical conductivity with pressure as an indicator of conduction through a solid phase in midcrustal rocks. *J. Geophys. Res.*, 102, 14741-14750, 1997.
- Stoll, J.B., J. Bigalke, and E. Grabner, Electrochemical modelling of self-potential anomalies. *Surv. Geophys.*, 16, 107-120, 1995.
- Wernecke, K.-D., *Angewandte Statistik für die Praxis*, Addison-Wesley, Bonn, 280 pp., 1995.
- Winter, H.: Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - Vergleich von Labor- und Bohrlochmessungen. In: K. Bahr und A. Junge (Hrsg.), Protokoll über das 15. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", 28. März - 1. April 1994 in Höchst im Odenwald (ISSN 0946-7467), pp. 346-353, 1994.
- Zimmermann, G. (1991): Integrierte Auswertung von Bohrlochmessungen der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) mit Verfahren der Multivariaten Statistik. Dissertation, Fachbereich 16 Bergbau und Geowissenschaften, Technische Universität Berlin, 156 pp.
- Yardley, B.W.D., and J.W. Valley, The petrologic case for a dry lower crust, *J. Geophys. Res.*, 102, B6, 12173-12185, 1997.
- Zulauf, G., G. Kleinschmidt, and O. Oncken, Brittle deformation and graphitic cataclasites in the pilot research well KTB-VB (Oberpfalz, FRG), in: *Deformation Mechanisms: Rheology and Tectonics*, edited by R. J. Knipe and E. H. Rutter, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 54, 97-103, 1990.

Anhang

Anmerkungen zur Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse setzt eine lineare Beziehung zwischen den Eingangsdaten und einer Anzahl von Faktoren voraus, die mit der allgemeinen Faktormodellgleichung {1} definiert werden kann.

$$Z = A P \quad \{1\}$$

wobei Z = Matrix der standardisierten Meßwerte für n Fälle, A = Matrix der Faktorenmuster mit den Faktorladungen als Koeffizienten und P = Matrix der Faktorenwerte ist.

Der Zusammenhang zwischen den standardisierten Größen z_{ij} und der Korrelationsmatrix kann beschrieben werden als

$$1/(n-1) Z Z^T = R = S \quad \{2\}$$

mit R = Korrelationsmatrix, S = Kovarianzmatrix, und $Z^T = (z_{ji})$ Transponierte der Matrix Z .

Nach Einsetzen von {1} in {2} erhält man mit der Bedingung, daß die Faktoren unkorreliert sind

$$R = A A^T \quad \{3\}$$

mit A^T = Transponierte der Faktorenmustermatrix A .

Diese Gleichung wird als Fundamentaltheorem der Faktorenanalyse bezeichnet. Die Korrelationsmatrix R kann durch eine Faktorladungsmatrix A , die mit ihrer transponierten Matrix A^T multipliziert wird, reproduziert werden. Die Diagonale der Korrelationsmatrix repräsentiert bei faktoranalytischer Betrachtung nicht die gesamte Korrelation eines Datensatzes mit sich selbst, sondern nur den faktoriell erklärbaren Anteil dieser Korrelation. Dieser Anteil wird Kommunalität genannt.

Da A und P unbekannte Größen sind, ist das Gleichungssystem unterbestimmt und ohne weitere Einschränkungen nicht lösbar. Es existieren verschiedene Rechenverfahren, die durch geeignete Schätzung von Kommunalitäten, Anzahl der Faktoren und der Faktorwerte zu verlässlichen Ergebnissen führen. Details hierzu sind in der Basisliteratur zu finden (Geider et al., 1982; Reis, 1990; Wernecke, 1995). Auf die kompakte und übersichtliche Darstellung der multivariaten Methoden und deren Anwendung auf Bohrlochmeßdaten von Zimmermann (1991) soll besonders hingewiesen werden.

Der formale Ablauf einer Faktorenanalyse erfolgt nach folgendem Schema:

1. Standardisierung der Eingangsdaten
2. Schätzung der Kommunalitäten
3. Extraktion der Faktoren
4. Rotation des Faktorensystems
5. Schätzung der Faktorenwerte
6. Interpretation

Generell sollte die Anzahl der Fälle mindestens das dreifache der Variablenzahl betragen. Aufgrund der Standardisierung der Daten sind die Ergebnisse der Faktorenanalyse stets qualitativ zu bewerten.

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. H. Soffel, Dr. A. Rauen, Dr. H. Winter
Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Ludwig-Maximilians-Universität München
Theresienstrasse 41
D-80333 München
e-mail: soffel@magbakt.geophysik.uni-muenchen.de
rauen@geoelek.geophysik.uni-muenchen.de
winter@geoelek.geophysik.uni-muenchen.de