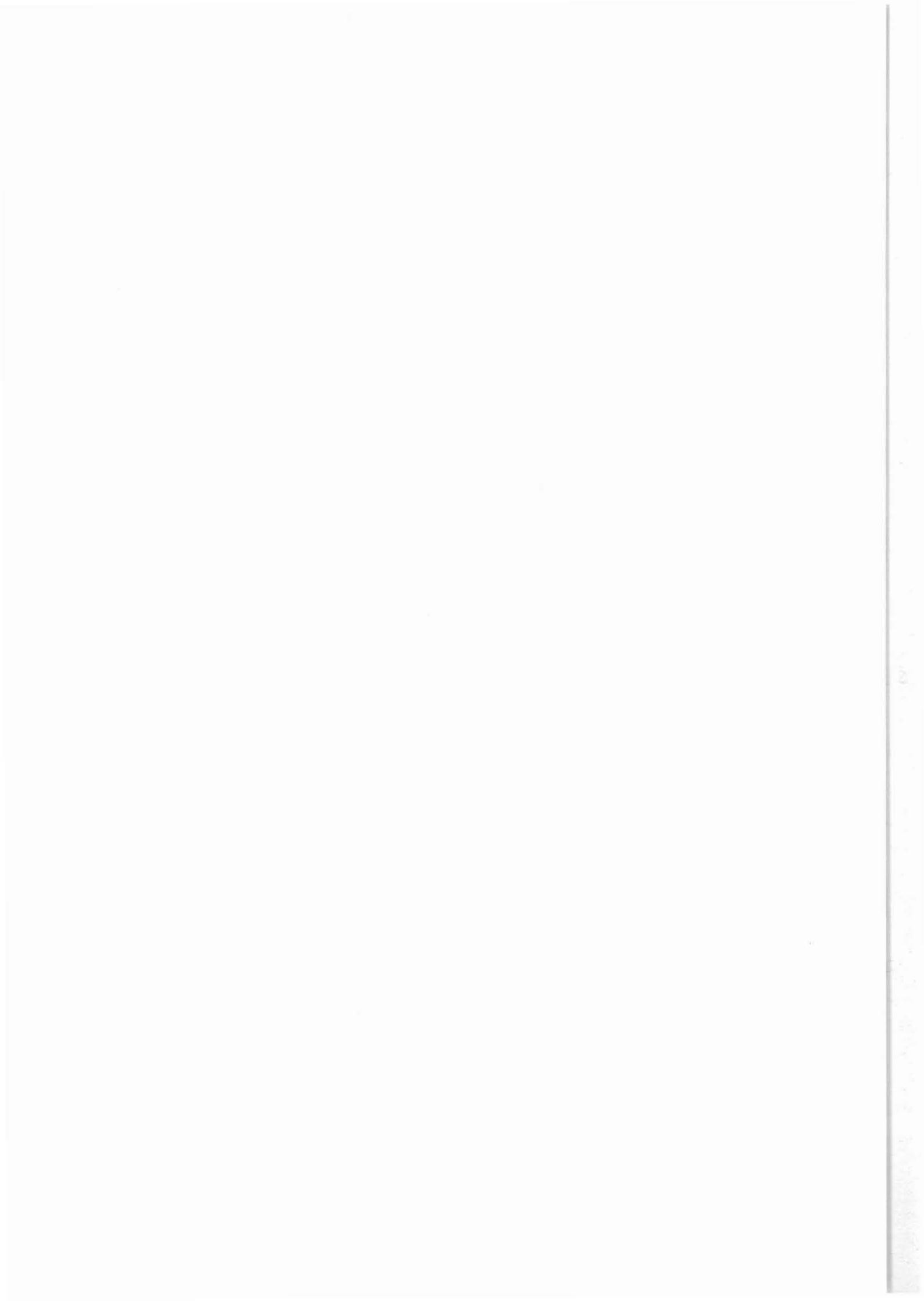


Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB

Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Fehlerbetrachtung
zur Bestimmung von Bohrlochorientierung und
Orientierung der Kalibermeßsonde
mit einer Pendelanordnung



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung.....	479
1. Einleitung.....	480
2. Erläuterung des Meßaufbaues.....	482
3. Fehlerbetrachtung für die Neigungsmessung....	484
3.1 Fehler durch die Lagerreibung.....	484
3.2 Fehler durch mechanische Übertragung zum Potentiometer.....	486
3.3 Fehler am Potentiometerabgriff.....	487
4. Der Fehler der Relative Bearing-Bestimmung...	488
5. Der Fehler der Bohrlochazimutbestimmung.....	493
6. Der Geräteazimutfehler.....	496
7. Abschließende Bemerkungen.....	500
Literatur.....	501
Erläuterungen.....	502



Zusammenfassung

Wenn ein mechanisches Pendelmeßsystem zur Neigungs- und Relative Bearing-Bestimmung bei den Bohrlochmessungen eingesetzt wird, ist bei kleinen Neigungswinkeln einer Bohrung die Bestimmung der Bohrloch- bzw. Geräteorientierung mit sehr großen Fehlern behaftet. Unterhalb eines bestimmten Grenzwinkels wird die Relative Bearing- und Bohrloch-Azimuth-Bestimmung sogar unmöglich. Für das in der KTB-Vorbohrung regelmäßig zum Einsatz kommende Kalibermeßsystem der Firma Schlumberger wird für eine 2° geneigte Meßsonde ein Fehler angegeben. Anhand dieser Angaben ist für dieses Gerät unter Berücksichtigung der mechanischen Funktionsweise des Meßgerätes eine Abschätzung des Fehlers auch für Neigungswinkel $\neq 2^\circ$ vorgenommen worden.

Im wesentlichen wurden dabei als Parameter Reibungsbeiwerte des mechanischen Pendelmeßsystems berücksichtigt.

Die hier durchgeführte Fehlerabschätzung läßt sich prinzipiell auf jedes andere mechanische Orientierungsmeßsystem übertragen, das Pendelmessungen zur Grundlage hat.

1. Einleitung

Die Lage einer Bohrung und des Meßgerätes in ihr wird im allgemeinen wie folgt beschrieben: angenommen wird, daß die Bohrung eine Neigung DEV besitzt.

DEV = Winkel zwischen Schwerevektor und Bohrlochachse

Wir nun ein geneigtes zylindrisches Bohrloch senkrecht zur Bohrlochachse geschnitten, besitzt der dabei entstehende Kreis einen Punkt, der im Schwerfeld am höchsten liegt. Festgelegt vom Mittelpunkt des Kreises wird nun der Bohrlochazimut AZ zu

AZ = Winkel zwischen der hochgelegenen Seite der Bohrung und der magnetischen Nordrichtung

Bezüglich der markierten Seite eines Meßgerätes wird nun der Relative Bearing-Winkel RB analog festgelegt.

RB = Winkel zwischen der hochgelegenen Seite der Bohrung und einer angezeichneten Geräteseite, z. B. ein Kaliberarm.

Wird die Geräteorientierung bezogen auf die Nordrichtung, erkennt man den Geräteazimut GAZ.

GAZ = Winkel zwischen der magnetischen Nordrichtung und einer angezeichneten Geräteseite

Wird eine Bohrung mit sehr kleinem Neigungswinkel DEV abgeteuft, ist dem Fehler der mechanischen Azimut (AZ)- und Relative Bearing (RB)-Bestimmung große Aufmerksamkeit zu widmen. Auch der Fehler der Neigungsmessung selbst ist neigungsabhängig, wie im folgenden erläutert wird.

Anwendung findet eine solche Lagebestimmung der Bohrung (Bohrlochorientierung) und des Meßgerätes in der KTB-Bohrung bei den Kalibermessungen und der orientierten Kernentnahme.

Beim Formation MicroScanner Tool (FMST)- und Dipmeter-Einsatz sowie bei der Richtbohrphase wurde die Bohrlochorientierung mit einem 3-Komponenten-Fluxgate-Magnetometer vorgenommen. Dieses Verfahren hat gegenüber dem hier diskutierten mechanischen Pendelmeßsystem den Vorteil, daß Geräteorientierung und Bohrlochlage auch bei kleinen Neigungswinkeln des Bohrloches mit gleichbleibender Genauigkeit bestimmt werden können. Dieses relativ aufwendige Verfahren, das hier nicht mit in die

Betrachtung eingeschlossen wird, versagt allerdings, wenn Formationen mit sehr hohem Fe-Gehalt durchörtert werden. Die hierbei mögliche Mißweisung durch ein gestörtes Magnetfeld betrifft allerdings auch den Horizontalkompaß, der im Pendel-Orientierungssystem zur Anwendung kommt.

In der KTB-Vorbohrung wurden bisher in den ersten 500 m von BOSUM und HAHN (1988) magnetische Anomalien bis zu 2000 nT bestimmt. Dies entspricht bei ungünstiger Anordnung des magnetischen Störvektors einem Fehler von ca. 6 % für die Bestimmung der magnetischen Orientierung.

Da diese Mißweisung, abgesehen von kleinen tellurischen magnetischen Schwankungen, zeitlich konstant und durch die Geologie fest vorgegeben sind, ist sie korrigierbar, wenn eine genaue magnetische Vermessung des gesamten Bohrloches vorgenommen wird.

Ähnliche Überlegungen wie für die magnetische Richtungsorientierung betreffen den Einsatz eines Kreiselkompasses. Allerdings ist eine mögliche Mißweisung durch eine Schwereanomalie als vernachlässigbar zu bezeichnen. Nachteil eines Kreiseleinsatzes ist allerdings seine durch Drift beschränkte Einsatzzeit und seine hohen Einsatzkosten.

Im folgenden soll für das Bohrlochorientierungsmeßsystem der KTB-eigenen Kalibersonde (HDM-H) der Firma Schlumberger eine Fehlerabschätzung in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Bohrloches durchgeführt werden. Ausgangspunkt sind dabei die von der Firma Schlumberger für bestimmte Meßbedingungen angegebenen Fehlerwerte. Mit diesen kann dann anhand der vorgegebenen Meßanordnung auf den Gesamtmeßfehler bei unterschiedlichen Meßbedingungen geschlossen werden. Diese Fehlerrechnung ist auch von Bedeutung für den Einsatz des KTB-eigenen Temperatur- und Neigungs-Memory-Tools zur orientierten Kerngewinnung (KESSELS 1988). Die im folgenden ausgeführten Fehlerrechnungen berücksichtigen immer den Fehler der Pendeleinstellung und der Meßwerterfassung sowohl beim Neigungs- als auch beim Relative Bearing-Pendel. Exemplarisch wurde die Fehlerrechnung für die Neigungsmessung besonders ausführlich durchgeführt. Die Fehlerrechnung für das Relative Bearing-Pendel ergibt zwar eine kompliziertere Fehlerabhängigkeit, verläuft aber sonst analog den Berechnungen des Neigungsfehlers.

2. Erläuterung des Meßaufbaues

Der Meßaufbau des hier betrachteten Sondenteils der Kalibersonde (HDM-H) geht aus Abb. 1 hervor.

In dieser Anordnung wird die Neigungsmessung (DEV) mit einem Pendel durchgeführt (siehe Abb. 1, unten). An diesem Pendel ist nur ein Potentiometerabgriff für die Neigungsbestimmung (Winkel zwischen Bohrlochachse und Schwerevektor) vorgesehen.

Für die Relative Bearing (RB)-Bestimmung wurde von einer denkbaren Kopplung mit dem Neigungspendel abgesehen. Es ist ein gesondertes Horizontalpendel nur für diese Messung installiert (siehe Abb. 1, Mitte rechts). Das oben in der Abb. 1 aufgezeichnete Potentiometer ist fest am Gehäuse der Sonde befestigt, so daß mit dem Relative Bearing-Potentiometer-Abgriff der Relative Bearing-Winkel direkt ausgemessen wird. Hierbei wird davon ausgegangen, daß die Neigung so groß ist, daß das Pendelgewicht mit seinem Schwerpunkt in der vom Schwerevektor und der Geräteachse aufgespannten Ebene liegt.

Auf die gleiche Ebene wird auch der Bohrlochazimutwinkel (AZ) bezogen. In der in Abb. 1 dargestellten Anordnung (Mitte) wird deutlich, daß auch dieser Winkel direkt von einem Potentiometer abgegriffen werden kann. Dies wurde dadurch erreicht, daß der Kompaß nicht an das Gehäuse angekoppelt ist sondern in das Relative Bearing-Pendel mit integriert wurde. So wird über das mittlere Potentiometer der Winkel zwischen magnetisch Nord und der Relative Bearing Pendel-Orientierung ausgemessen.

Eine Geräteazimutbestimmung GAZ, d. h. der Winkel zwischen magnetisch Nord und einem Punkt des Gehäuses muß indirekt aus Relative Bearing und Bohrlochazimut berechnet werden.

Die hier durchgeführten Fehlerabschätzungen sind gemäß den Anforderungen für eine kontinentale Tiefbohrung auf Messungen bei kleinem Neigungswinkel ausgerichtet.

Nicht eingezeichnet ist hier eine periodische mechanische Anregung des RB-Pendels über einen beweglichen Stift, die dazu dient, die statische Lagerreibung dieses Pendels zu minimieren.

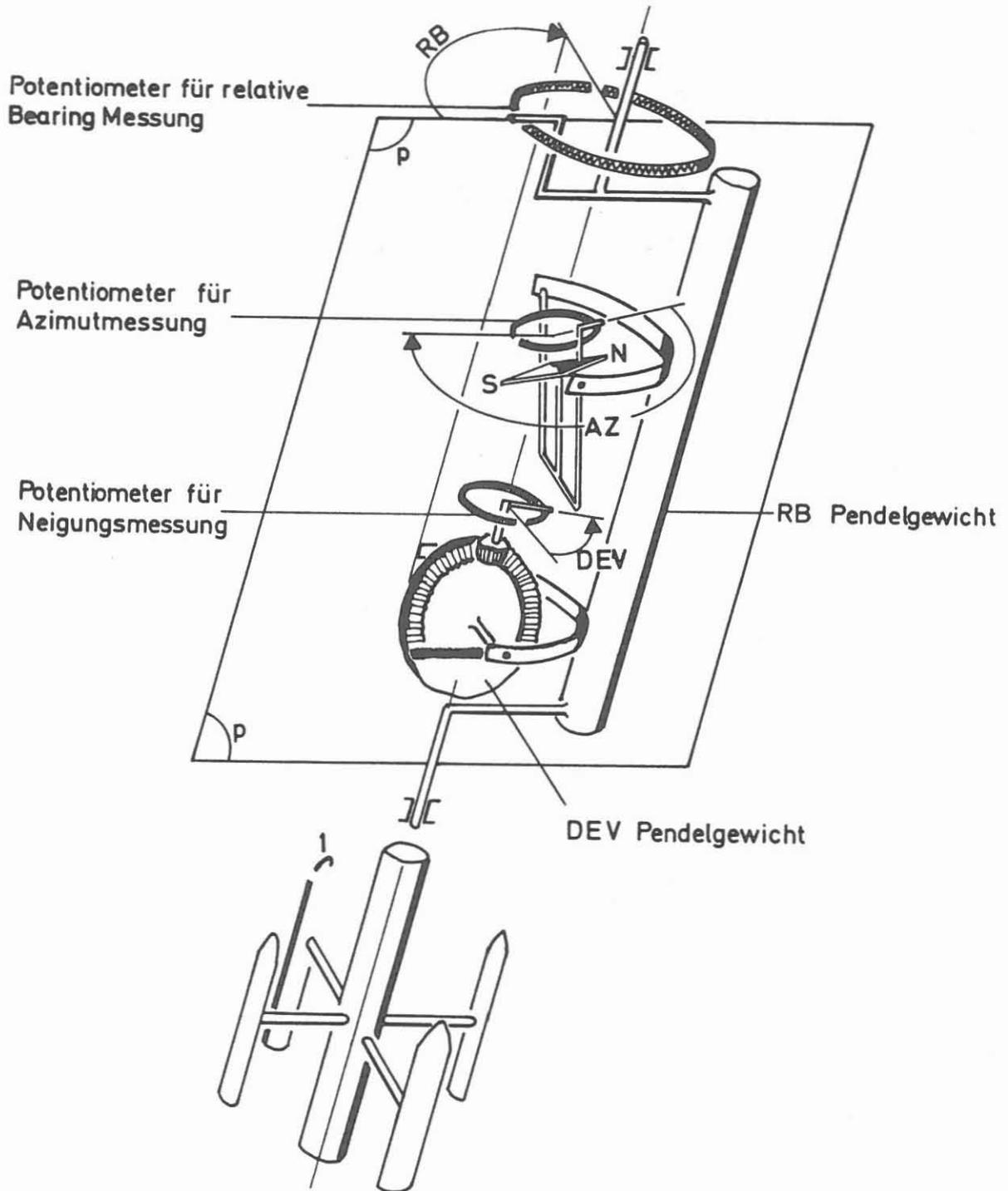


Abb. 1:

Mechanisches Meßsystem zur Bestimmung der Bohrloch-orientierung (nach Fa. Schlumberger).

KTB

3. Fehlerbetrachtung für die Neigungsmessung

Der Fehler der Neigungsmessung setzt sich wie folgt darstellt aus drei Fehleranteilen zusammen.

3.1 Fehler durch Lagerreibung

Von der Rückstellkraft des Pendels beim Abweichen von seiner Nulllage um ΔDEV muß ein Reibungsmoment M_R überwunden werden, damit das Pendel sich der Nulllage weiter annähern kann. Der Winkelbereich, in dem das Reibungsmoment M_R größer als das Drehmoment $M(\Delta DEV) \cdot \underline{ez}$ der Rückstellkraft des Pendels ist, muß als Fehlerbereich für die ΔDEV -Bestimmung angesehen werden. In Abb. 2 ist die Pendelanordnung skizziert, die zur Erläuterung des anschließend dargestellten Rechenganges der Bestimmung des Pendeldrehmomentes dient.

Die Grenze für die Dominanz des Reibungsmomentes liegt bei $M(\Delta DEV) \cdot \underline{ez} = M_R$.
Für das wirksame Drehmoment gilt danach mit den am Schluß gesammelt aufgeführten Bezeichnungen:

$$M \cdot \underline{ez} = (\underline{K} \times \underline{r}) \cdot \underline{ez} \quad (1)$$

mit

$$\underline{K} = mg \underline{ey} \text{ und } \underline{r} = r_0 \sin(\Delta DEV) \underline{ex} + r_0 \cos(\Delta DEV) \underline{ey}$$

erhält man:

$$M = \begin{vmatrix} & \underline{ex} & \underline{ey} & \underline{ez} \\ & 0 & mg & 0 \\ r_0 \sin(\Delta DEV) & & r_0 \cos(\Delta DEV) & 0 \end{vmatrix}$$

Die folgende Beziehung für den Grenzwinkel ΔDEV_R des Reibungsbereiches und das zugehörige Reibungsmoment M_R ergibt sich hiermit zu:

$$M_R = (M \cdot \underline{ez}) = m g r_0 \sin(\Delta DEV_R) \quad (2)$$

Bei einem kleinen Reibungsmoment, d. h. einem kleinen ΔDEV_R gilt mit hinreichender Genauigkeit die Näherung

$$\Delta DEV_R = \frac{M_R}{mg r_0} \quad (3)$$

Die Rechnung zeigt also, daß der Fehler der Neigungsmessung unabhängig vom Neigungswinkel der Bohrung gleich einer Gerätekonstanten ist.

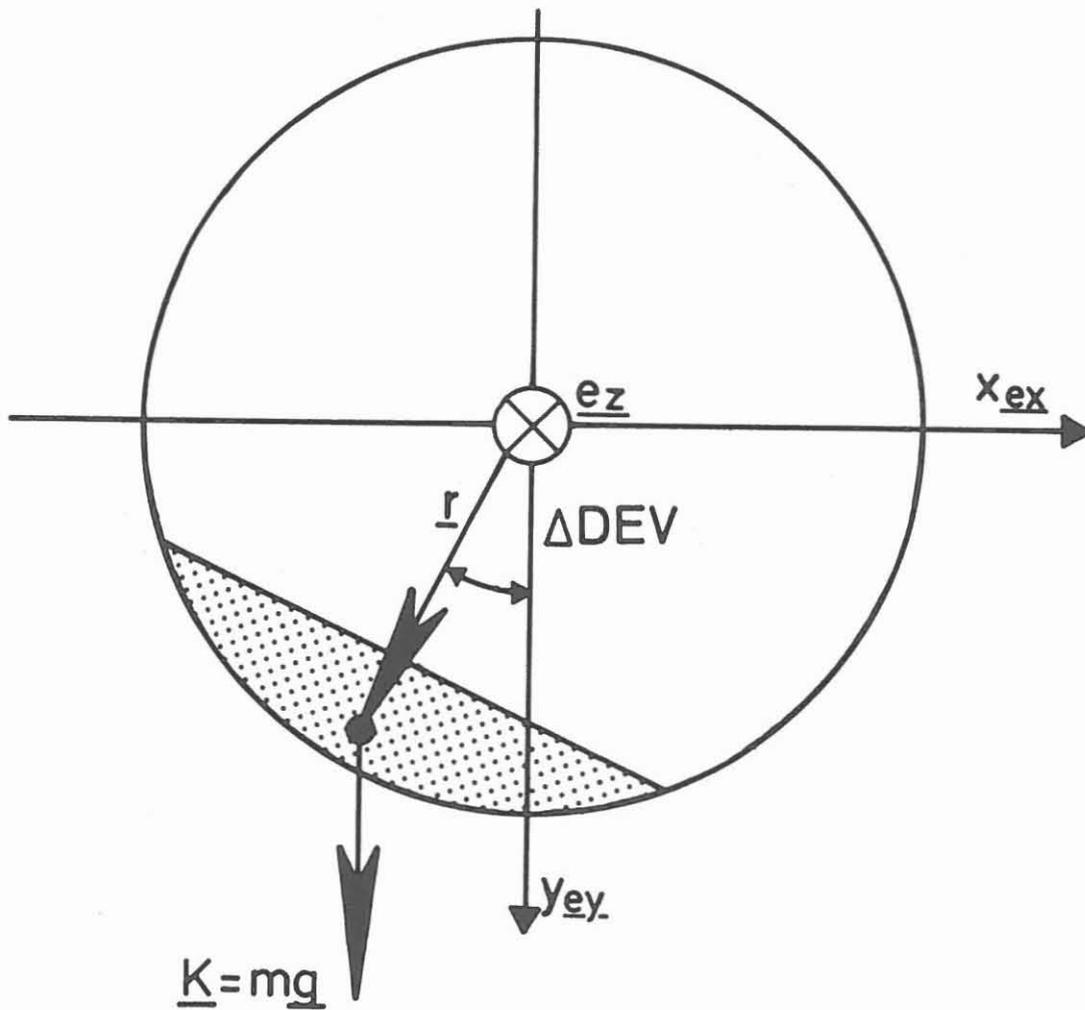


Abb. 2:
Gewichts- und Winkelanordnung an einem Neigungspendel.

KTB

3.2 Fehler durch mechanische Übertragung zum Potentiometer

Der am Potentiometer abgelesene Drehwinkel DEV' ist proportional dem Neigungswinkel DEV der Geräteachse. Es gilt

$$DEV' = C \cdot DEV \quad (4)$$

C ist hierbei eine Übertragungskonstante, die mit einem Fehler $\pm \Delta C$ behaftet ist. Unter Einbeziehung des vorstehend betrachteten Fehlers $\pm \Delta DEV_R$ gilt nun für den Gesamtfehler der Einstellung des Potentiometerabgriffes die in Gleichung 5 dargestellte Abhängigkeit. Nach einiger Rechnung ergibt sich hieraus die Beziehung

$$\Delta DEV' = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial DEV} DEV \Delta DEV_R\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial c} \Delta c\right)^2} \quad (5)$$
$$\Delta DEV' = \pm DEV \cdot c \sqrt{\left(\frac{\Delta DEV_R}{DEV}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}$$

Für kleine relative Fehler ist eine Linearisierung des quadratischen Fehlergesetzes in der praktischen Anwendung durchaus genügend, auch wenn hierdurch der Fehler etwas überschätzt wird. So ergibt sich aus Gleichung 5 die Beziehung nach Gleichung 6.

$$\Delta DEV' = \pm \left[c \frac{M_R}{mg r_0} + DEV \Delta c \right] \quad (6)$$

3.3 Fehler am Potentiometerabgriff

Als letzter Fehler ist nun noch der Fehler des Potentiometerabgriffes und der elektrischen Weiterverarbeitung des Meßsignals mit einzubeziehen (z. B. AD-Wandlungen usw.)

Dieser Fehler wird im folgenden als weitgehend unabhängig von der Potentiometereinstellung angesehen. Für die Übertragung der Potentiometereinstellung DEV' in das Meßsignal DEV'' gilt

$$DEV'' = DEV' + DEV_0 \quad (7)$$

Hierbei ist DEV_0 die Nullpunkteinstellung des Potentiometers.

Auch wenn diese so vorgenommen wird, daß $DEV_0 = 0$ ist, wird sie dabei den Fehler DEV_0 besitzen. Dieser Fehler berücksichtigt auch einen fehlerhaften Spannungsabgriff während des Meßbetriebes. Damit gilt

$$DEV'' = \pm \sqrt{\Delta DEV'^2 + \Delta DEV_0^2} \quad (8)$$

Wird nun auch hier wieder für den Gesamtfehler eine kleine Überschätzung des Fehlers zugunsten einer Linearisierung in Kauf genommen, so ergibt sich der Gesamtfehler wie in Gleichung 9 aufgeführt.

$$DEV'' = \pm \left(c \cdot \frac{M_R}{mg r_0} + \Delta DEV_0 \right) + (\Delta c) \cdot DEV' \quad (9)$$

Nach Gleichung 9 ergibt sich damit ein neigungsunabhängiger Fehleranteil und ein zur Neigung proportionaler Anteil. Diese Abhängigkeit entspricht der Fehlerangabe der Firma Schlumberger, die den Fehler der Neigungsmessung mit

$$DEV'' = \pm \left(0,4^\circ \right) \pm \left(\frac{0,9}{100} \right) \cdot DEV' \quad (10)$$

spezifiziert hat. Kann die Fehlerüberschätzung der Neigungsmessung nicht in Kauf genommen werden, so ist eine Fehlerrechnung unter Berücksichtigung der quadratischen Fehleraddition nach Gleichung 11 durchzuführen.

$$DEV'' = \pm \sqrt{\frac{c^2 M_R^2}{(mg)^2 r_0^2} + DEV'^2 c^2 + DEV_0^2} \quad (11)$$

4. Der Fehler der Relative Bearing-Bestimmung

Für die Berechnung des Relative Bearing-Fehlers muß eine zu Kapitel 3.0 analoge Überlegung für das Reibungsmoment des Relative Bearing-Pendels durchgeführt werden. Der erste Schritt in der Fehlerrechnung ist die Berechnung des Pendeldrehmomentes in Abhängigkeit vom Neigungswinkel. Hierzu wird ein Koordinatensystem benutzt, dessen Z-Achse mit der Lagerachse des Pendels übereinstimmt (siehe Abb. 3).

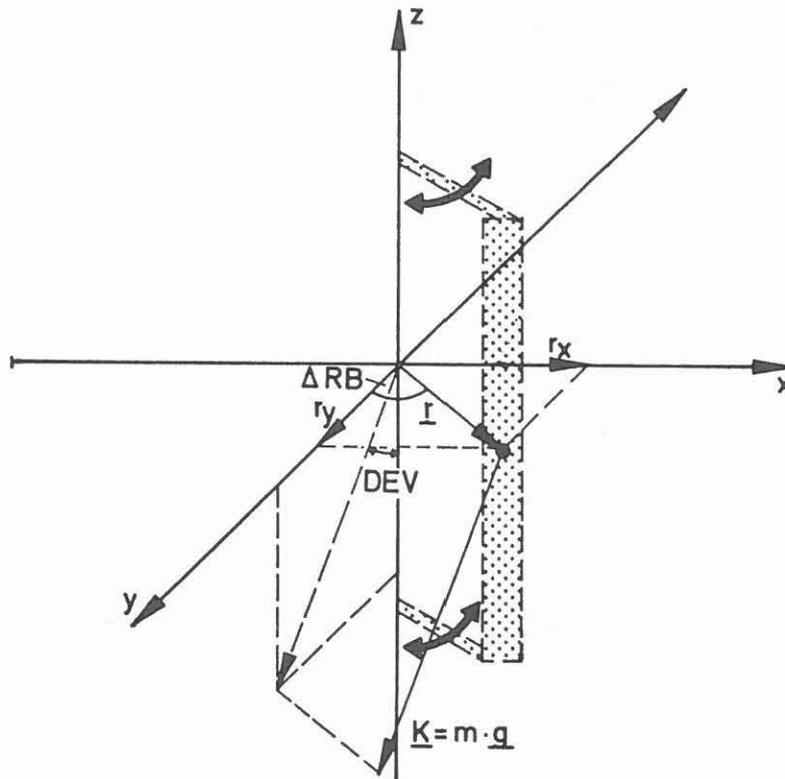


Abb. 3: Lage des Relative Bearing-Pendels in einem gerätefesten Koordinatensystem.

Ohne Einschränkung der Allgemeinheit wird im folgenden der auf das Pendelgewicht wirkende Schwerevektor in die Y-Z-Ebene gelegt. Der Winkel DEV in Abb. 3 ist dabei der Neigungswinkel des Gerätes, da die Z-Achse die Gerätesymmetrieachse bzw. die Bohrlochachse sein soll. Bei einem $DEV \neq 0$ und zu vernachlässigender Reibung wird das Pendel sich nach einem Einschwingvorgang so einstellen, daß RB zu 0 wird. Aus Abb. 3 ergibt sich weiter die Gültigkeit der folgenden Beziehungen.

$$\underline{r} = r_x \underline{e}_x + r_y \underline{e}_y = r_0 \sin(\Delta RB) \underline{e}_x + r_0 \cos(\Delta RB) \underline{e}_y$$

$$\underline{K} = m \underline{g} = m g \sin(\text{DEV}) \underline{e}_y + m g \cos(\text{DEV}) \underline{e}_z.$$

Für das Gesamtdrehmoment, das die Schwerkraft auf die Pendelmasse ausübt, ergibt sich damit

$$\underline{M} = \underline{K} \times \underline{r} = \begin{vmatrix} & \underline{e}_x & \underline{e}_y & \underline{e}_z \\ 0 & m g \sin(\text{DEV}) & m g \cos(\text{DEV}) \\ r_0 \sin(\Delta RB) & r_0 \cos(\Delta RB) & 0 \end{vmatrix}$$

so daß man nach Auflösung der Determinante die Beziehung nach Gleichung 12 erhält.

$$\underline{M} = m g r_0 \cos(\text{DEV}) \sin(\Delta RB) \underline{e}_y - m g r_0 \cos(\text{DEV}) \cdot \cos(\Delta RB) \underline{e}_x - m g r_0 \sin(\text{DEV}) \sin(\Delta RB) \underline{e}_z \quad (12)$$

Aufgrund der Lagerung des Horizontalpendels in der Z-Achse ruft auch nur die Z-Komponente des Gesamtdrehmoments eine Drehung des Relative Bearing-Pendels hervor. Die anderen Drehmoment-Komponenten führen nur zu einer veränderten Belastung der Lager, was wiederum zu einer veränderten Reibung führen kann. Dies wird allerdings in diesem Rahmen nicht weiter betrachtet. Die Reibungskraft soll im folgenden der Einfachheit halber als konstant angenommen werden:

$$M_w = \underline{M} \underline{e}_z = m g r_0 \sin(\text{DEV}) \sin(\Delta RB) \quad (13)$$

Wird nun bei geringer Bohrlochneigung DEV das Drehmoment M_w so klein, daß es gleich dem Reibungsmoment M_R wird, so ist dieser ΔRB -Wert als Fehlergrenze für die Relative Bearing-Messung anzusetzen. Aus Gleichung 13 ergibt sich

$$RB = \pm \arcsin \frac{M_R}{m g r_0 \sin(\text{DEV})} \quad (14)$$

M_R/mgr_0 ist hierbei eine Gerätekonstante. Diese Konstante kann aus den Fehlerangaben der Firma Schlumberger für das KTB-Gerät ermittelt werden. Bei $DEV = 2^\circ$ wird hier ein Fehler von $RB \pm 8^\circ$ angegeben. Es ergibt sich hiermit die Gerätekonstante zu

$$\frac{M_R}{mg r_0} = 4,857 \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

Dies ist der Fehler bei einem statisch in Ruhe befindlichen Gerät. Jede Bohrlochmeßsonde führt beim Logging Drehungen im Bohrloch aus (z.B. durch einen nicht zu verhindernden Kabeldrall). Für ein mit 1,6 Umdrehungen/Minute rotierendes Gerät zeigt nach Angabe des Herstellers die Relative Bearing-Anzeige einen um

8° verzögerten Wert bei Drehung im Uhrzeigersinn

und einen um

16° verzögerten Wert bei einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn.

Dies ist eine systematische Abweichung, bei der zum Drehmoment durch das Pendelgewicht ein Drehmoment durch die Lagerreibung wirksam wird, wenn das Gehäuse des Kalibermeßgerätes sich dreht und das Pendel räumlich in Ruhe bleibt.

Bei einem Geräteneigungswinkel von 40° beträgt nach Herstellerangaben die RB-Verschiebung 4° bei 1,6 Umdrehungen/Minute.

Dieser systematische Fehler soll in der folgenden Fehlerrechnung nicht mit betrachtet werden, da es sich hierbei nicht um einen statistisch streuenden Fehler sondern eine systematische Abweichung handelt, die unter Umständen nach Vorliegen des Logs korrigierbar ist.

Für die Nullpunkteinstellung des Potentiometerabgriffs wird ein Fehler von $\Delta RB_p = \pm 2^\circ$ angegeben. Damit ergibt sich bei Nichtberücksichtigung der Geräterotation ein Gesamtfehler von

$$RB' = \pm \sqrt{\Delta RB^2 + \Delta RB_p^2} \quad (16)$$

Unter Beachtung des Wertes für die Gerätekonstante aus Gleichung 15 ergibt sich somit der Fehler für die Relative Bearing-Messung des KTB-eigenen Meßgerätes zu

$$\Delta RB = \pm \sqrt{\arcsin^2 \left(\frac{4,857 \cdot 10^{-3}}{\sin(\text{DEV})} \right) + (2^\circ)^2} \quad (17)$$

In Abb. 4 ist der Fehler RB in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Gerätes aufgezeichnet. Wie leicht einsichtig ist, ist unterhalb eines bestimmten Neigungsgrenzwinkels DEV_g gar keine RB-Aussage mehr möglich. Dieser Grenzwinkel ergibt sich aus Gleichung 17 bei statischer Betrachtung zu

$$\Delta \text{DEV}_g = 0,28^\circ.$$

Bei rotierendem und fahrendem Gerät liegt dieser Wert selbstverständlich höher.

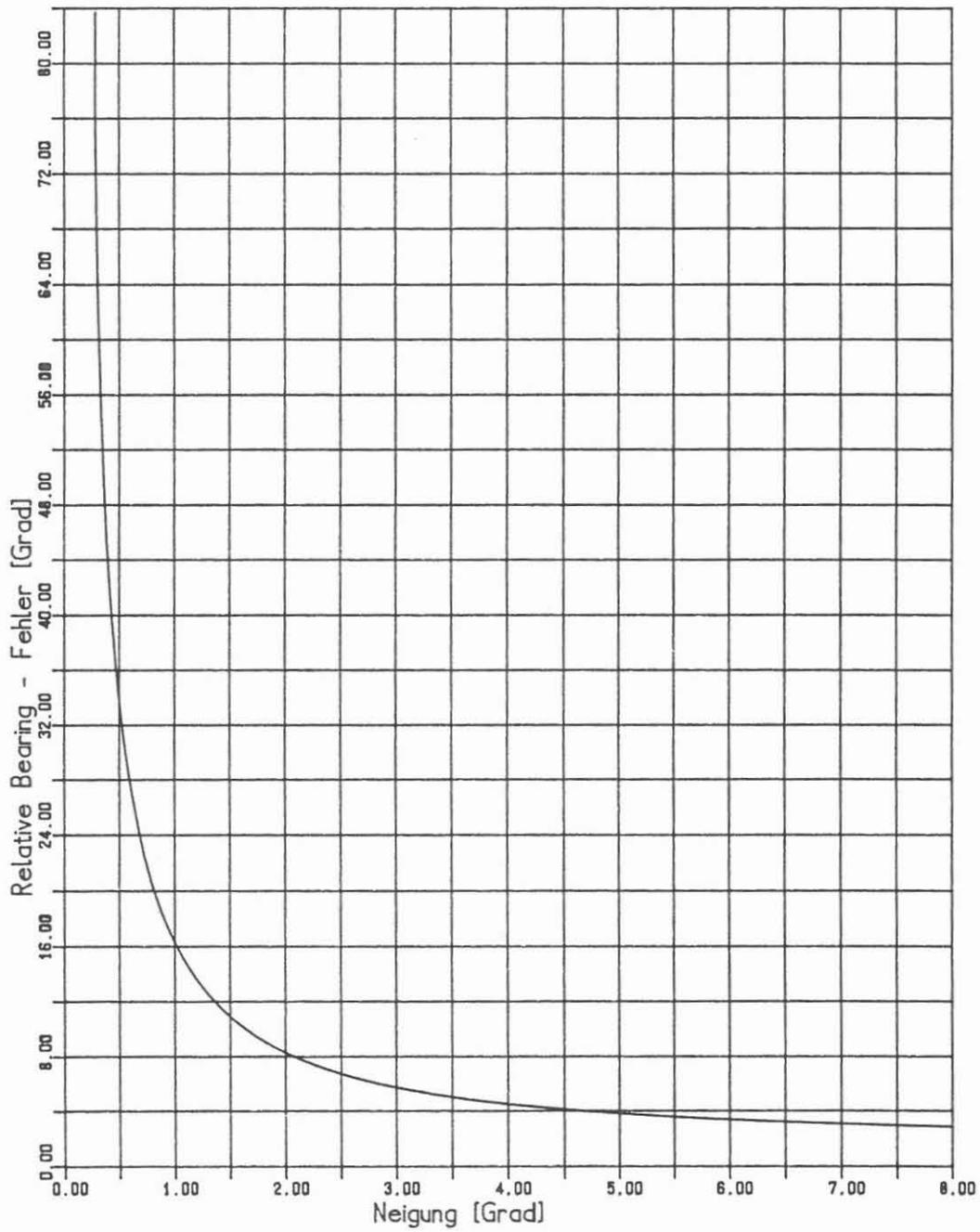


Abb. 4: Der Relative Bearing-Fehler in Abhängigkeit von der Bohrlochneigung.

KTB

5. Der Fehler der Bohrlochazimutbestimmung

Bei dem KTB-eigenen Kalibermeßgerät ist im Unterschied zu vielen anderen mechanischen Meßgeräten zur Bestimmung der Bohrlochorientierung das Potentiometer für den Abgriff der Kompaßorientierung nicht mit dem Gehäuse sondern mit dem Relative Bearing-Pendel verbunden. So kann der Bohrlochazimut direkt am Potentiometer abgegriffen werden, wenn seine Nullpunkteinstellung so erfolgt, daß der Bohrlochazimut 0 wird, wenn das Relative Bearing-Pendel nach Süden zeigt (d.h. die Oberseite der Bohrung nach Norden).

Damit wird die in vielen Geräten notwendige Summenbildung zwischen RB und Geräteazimut zur Bildung des Bohrlochazimuts vermieden.

Der Fehler der RB-Messung geht aber trotzdem in die Bohrlochazimutbestimmung ein, da das RB-Pendel den Nullpunkt des Kompaßpotentiometers festlegt. Da nach Angaben der Firma Schlumberger die Nullpunkteinstellung des Azimutpotentiometers bei fester Relative Bearing-Stellung auch mit einem Fehler von $\pm 2^\circ$ behaftet ist, kann der Fehler $\pm \Delta RB'$ vollständig in den Azimutfehler $\pm \Delta AZ$ mit übernommen werden. Allerdings muß noch der Fehler der Kompaßablesung $\pm \Delta Ko$ noch quadratisch zu den beiden anderen Fehlern addiert werden.

Für die Berechnung der Einstellung des Kompaßpotentiometers ist wieder eine Pendelrechnung, wie vorstehend durchgeführt, in Ansatz zu bringen. Das mechanische Moment dieses Pendels wird allerdings nicht durch Pendelmasse und Schwerfeld hervorgerufen, sondern durch das magnetische Moment der Kompaßnadel und das Erdmagnetfeld. Das Reibungsmoment durch Lagerreibung und die Reibung des Potentiometerabgriffs sorgen hier für einen neigungsunabhängigen gerätespezifischen Fehlerbereich. Dies ist gewährleistet, da der Kompaß selbst als Pendel ausgeführt ist, das mit seiner Drehachse orthogonal zur Relative Bearing-Ebene angeordnet ist. Die Spezifikation des Herstellers gibt einen statischen Kompaßfehler von

$$\Delta Ko = \pm 5^\circ \text{ an.}$$

Bei einer Gerätedrehung von $n = 1,6/\text{Minute}$ wird der Fehler mit $\Delta Ko = \pm 20^\circ$ angegeben. Diesmal ist die Fehlerangabe bei Gerätedrehung keine gerichtete korrigierbare Größe wie in Kapitel 4.0, sondern ein Fehler, der in eine Fehlerrechnung mit einzu beziehen ist.

Die Drehzahl n des Bohrlochmeßgerätes beim Logging kann aus der RB-Anzeige und der Fahrgeschwindigkeit v ermittelt werden durch

$$n = \left(\frac{d_{RB}}{d_2} \right) \cdot \left(\frac{v}{360^\circ} \right)$$

Für eine Kalibermessung kann üblicherweise von einer Fahrgeschwindigkeit von $v \approx 15$ m/min ausgegangen werden. Aus dem in Abb. 6 dargestellten Ausdruck eines Kaliberlogs erhält man mit dem Wert von $v = 15$ m/min und einer vollständigen Gerätedrehung p sec 60 m eine Drehzahl $n = 0,25$ [min⁻¹].

In Ermangelung besserer Informationen soll nun eine lineare Fehlerabhängigkeit von der Gerätedrehung in den Kompaßfehler mit einbezogen werden.

Danach gilt

$$\pm \Delta K_o = \pm \left[5^\circ + 15^\circ \frac{n}{1,6 \text{ 1/min}} \right] \quad (18)$$

Für den Gesamtfehler der Bohrlochazimutbestimmung kann nun der Gesamtfehler nach Gleichung 19 angesetzt werden

$$\pm \Delta A_Z = \pm \sqrt{\Delta K_o^2 + \Delta R_B^2} \quad (19)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung 17 und Gleichung 18 ergibt sich hiermit die vollständig ausgeschriebene Fehlerabhängigkeit zu

$$\pm \Delta A_Z = \pm \sqrt{\left(5^\circ + \frac{15^\circ \cdot n \cdot \text{min}}{1,6} \right)^2 + \text{arc sin}^2 \left(\frac{4,857 \cdot 10^{-3}}{\text{sin(DEV)}} \right) + (2^\circ)^2} \quad (20)$$

In Abb. 5 ist der Fehler des Bohrlochazimuts vom Neigungswinkel für verschiedene Drehzahlen der Meßsonde aufgezeichnet.

Zum Schluß soll allerdings noch darauf hingewiesen werden, daß in den hier berechneten Azimutfehler die in Kapitel 1.0 ge-

schilderte magnetische Mißweisung durch magnetisierbare Gesteinsformationen in die Betrachtung nicht mit einbezogen wurde. Diese Mißweisung, die nach der Messung in der KTB-Vorbohrung mit max. $6,0^\circ$ in Ansatz gebracht werden muß, ist zwar prinzipiell anhand eines vollständig magnetisch vermessenen Bohrloches korrigierbar und ist somit kein echter Fehler im Sinne einer Fehlerrechnung, doch der mit der technischen Durchführung einer Bohrung betraute Ingenieur muß diesen Fehler für seine technischen Arbeiten mit in Ansatz bringen, da im allgemeinen für Entscheidungen nicht davon ausgegangen werden kann, daß eine vollständige magnetische Vermessung des Bohrloches zur Verfügung steht.

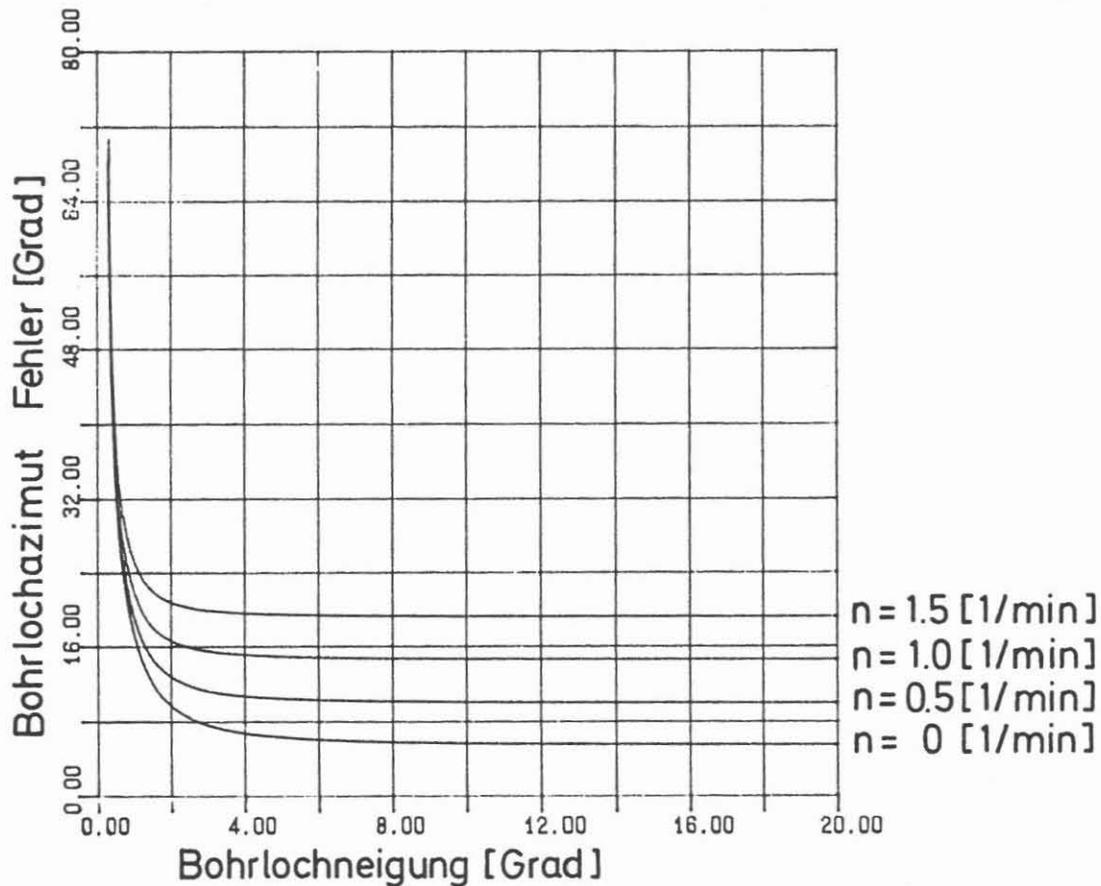


Abb. 5: Der Fehler der Bohrlochazimut-Bestimmung in Abhängigkeit von der Bohrlochneigung und der Gesamtdrehzahl n .

6. Der Geräteazimutfehler

Der Geräteazimut (GAZ) ist der Winkel zwischen einer frei ausgewählten Sondenorientierung (im allgemeinen ein ausgewählter Sondenarm) und der magnetischen Nordrichtung. Die Bestimmung des Geräteazimuts ist von großer Bedeutung für die Breakout-Analyse und die hiermit verbundene mögliche Interpretation des Spannungsfeldes (BLÜMLING, 1986, ZOBACK, 1987).

Bei der Bestimmung des Geräteazimutes tritt nun das scheinbare Paradoxum auf, daß ein Geräteazimut mit noch erträglichem Fehler aus dem Relative Bearing und dem Bohrlochazimut berechnet werden kann, auch wenn die beiden letztgenannten Meßgrößen mit einem nicht mehr interpretationsfähigen Fehler behaftet sind. Wie leicht aus Abb. 1 entnommen werden kann, gilt bei nicht zu großen Bohrlochneigungen für den Geräteazimut die Beziehung

$$\text{GAZ} = \text{AZ} + \text{RB} \quad (21)$$

oder bei anderer Winkelorientierung

$$\text{GAZ} = 360^\circ - (\text{AZ} + \text{RB}).$$

Der große Fehler in der Azimut- bzw. Relative Bearing-Messung für Bohrungen mit sehr kleiner Neigung ist im wesentlichen auf die unsichere Lage des Relative Bearing-Pendels zurückzuführen. Insbesondere bei einem vollständig vertikalen Bohrloch ist die Lage dieses Pendels vollständig unbestimmt. Die beiden anderen Punkte der Winkelbestimmung, die Richtung der ausgerichteten Kompaßnadel und des ausgewählten Kaliberarms sind allerdings vollständig unbeeinflusst von der Neigung des Bohrloches und sind auch definiert bei einer Neigung $\text{DEV} = 0^\circ$. Durch diese Anordnung sind Relative Bearing- und Azimutfehler keine statistisch voneinander unabhängigen Größen mehr, sondern sie sind direkt linear kompensatorisch gekoppelt, d. h., stellt sich das Relative Bearing-Pendel durch seine Lagerreibung auf einen um $+\Delta\text{RB}$ falschen Wert ein, bezogen auf die Lageroberseite des leicht geneigten Bohrloches, wird bei Vernachlässigung aller elektronischen und sonstigen Meßfehler der Azimutwert um $\Delta\text{AZ} = -\Delta\text{RB}$ falsch angezeigt. Im Prinzip werden also meßtechnisch gesehen zwei in Reihe geschaltete Widerstände ausgemessen, deren Größe durch die Lage des Relative Bearing-Pendels bestimmt wird, deren Summe aber konstant bleibt.

Für die Bestimmung des Geräteazimutfehlers braucht also der Reibungsfehler des Relative Bearing-Pendels in der Fehlerrechnung nicht mit berücksichtigt zu werden, so daß nur noch die

elektronischen und Übertragungsfehler in Ansatz gebracht werden müssen. Für den Gesamtfehler des Geräteazimuts ergibt sich damit die Beziehung nach Gleichung 23,

$$\Delta \text{GAZ} = \pm \sqrt{\left(5^\circ + \frac{15^\circ \text{ n min}}{1,6}\right)^2 + (2^\circ)^2} \quad (23)$$

so daß sich bei zu vernachlässigender Gerätedrehung auch in einer vertikalen Bohrung nur ein Fehler von ca. 6 % für die Bestimmung des Geräteazimuts ergibt. In Abb. 7 ist dieser Fehler graphisch dargestellt. Allerdings ist darauf hinzuweisen, daß es den Konstrukteuren dieser mechanischen Pendelorientierung nicht in erster Linie darauf ankam, bei einem ungeneigten Bohrloch den Geräteazimut zu bestimmen. Es ist daher durchaus denkbar, daß bei einem in unbestimmter Lage befindlichen Relative Bearing-Pendel ein Fehler durch die Bewegung dieses Pendels (unter Umständen Rotation im Gehäuse) auftritt, der hier nicht berücksichtigt werden konnte. Ein Beispiel für die gegenläufige Anzeige von Azimut und Relative Bearing wird in Abb. 6 gegeben. Die Messung wurde mit dem KTB-eigenen Gerät in der Vorbohrung in einem Gebiet besonders kleiner Bohrlochneigung gewonnen. Die Relative Bearing-Anzeige zeigt hier, daß sich die Sonde im ca. 60 m langen Bohrlochabschnitt um 360° dreht. An den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen zeigt der gegenläufige Gang von Relative Bearing und Bohrlochazimut, daß das Relative Bearing-Pendel in einem Bereich von bis zu 60° um seine Null-Lage schwingt.

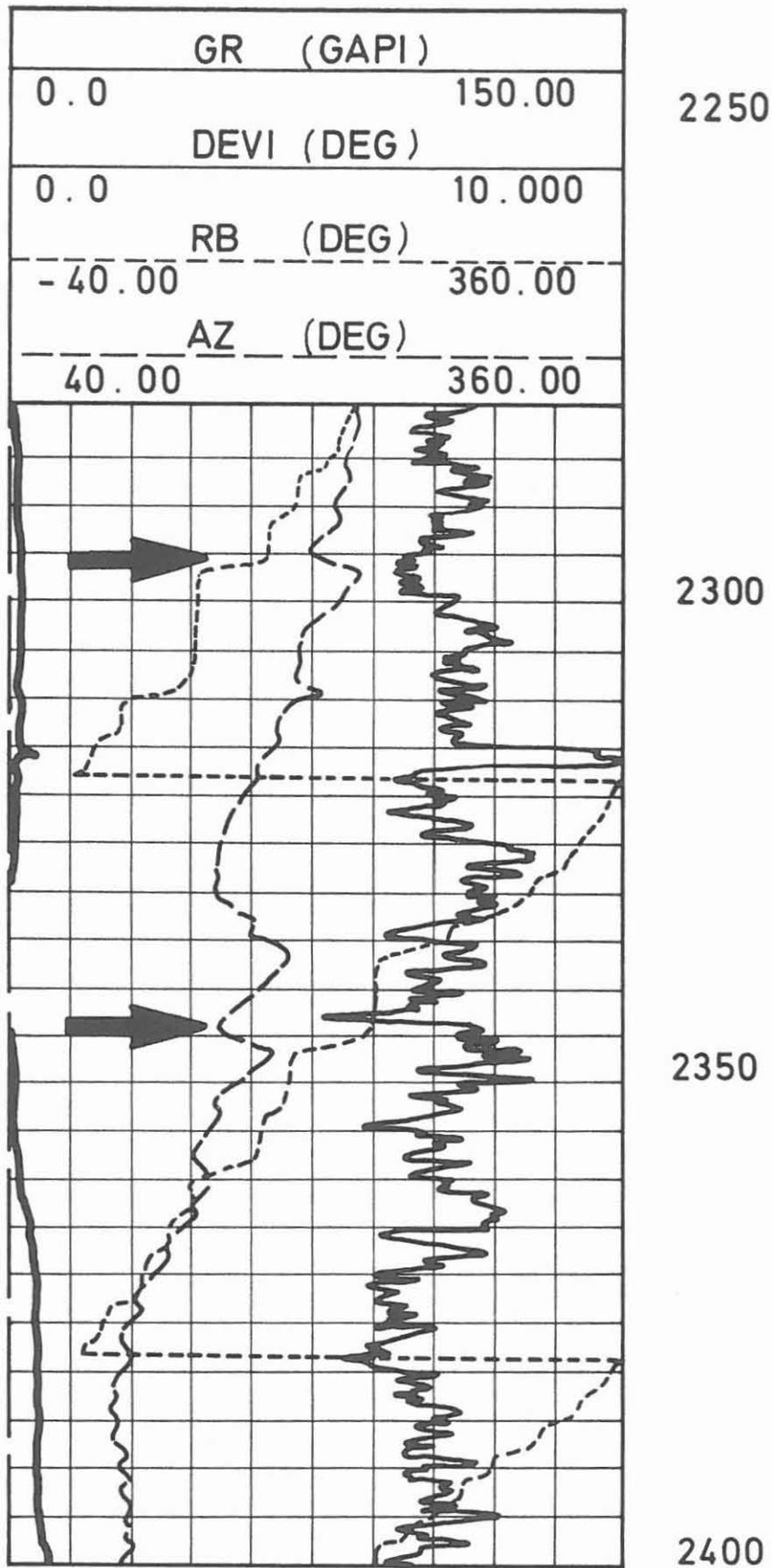


Abb. 6: Relative Bearing- (RB) und Azimut (AZ)-Anzeige bei schwingendem Relative Bearing-Pendel in einem Bereich der KTB-Vorbohrung mit sehr kleiner Neigung.

KTB

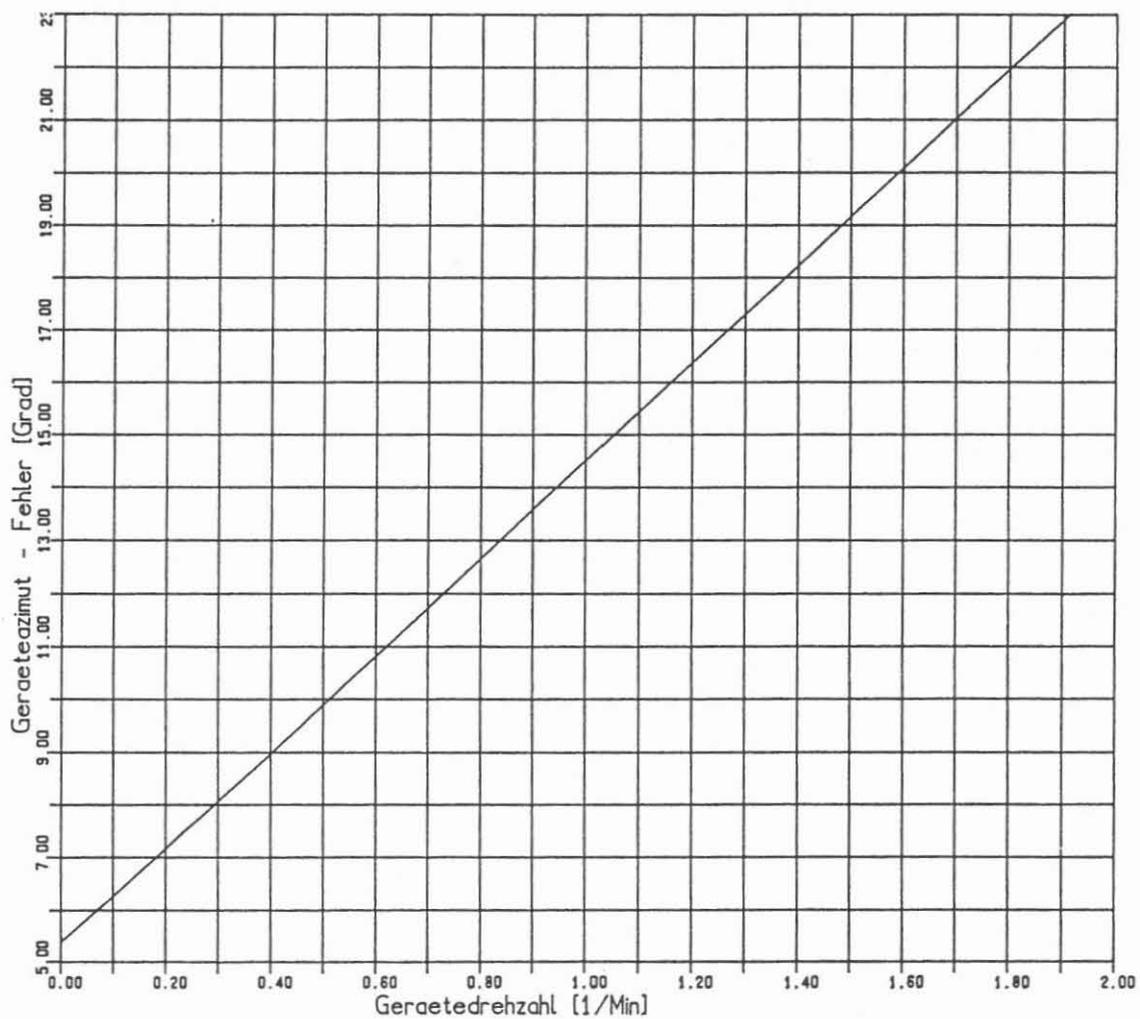


Abb. 7: Der Fehler des Geräteazimuts in Abhängigkeit von der Meßgerätedrehzahl n .

KT B

7. Abschließende Bemerkungen

Für die technische Durchführung der Kontinentalen Tiefbohrung ist die Erstellung eines möglichst neigungsfreien Bohrloches von höchster Priorität. Mit dem hier untersuchten Meßsystem wird daher nur eine relativ ungenaue Bestimmung des RB und AZ möglich sein. Der Einsatz eines Kreiselkompasses kann hier eine Verbesserung bringen.

Zur genauen Festlegung der Lage des Bohrloches im Raum und die Definition eines Zielkreises für weitere Bohrarbeiten kann allerdings eine mechanische Bestimmung der Bohrlochorientierung durchaus auch weiter sinnvolle Ergebnisse liefern. Eine fehlerhafte Azimutbestimmung ist bei kleinen Neigungswinkeln nicht unbedingt gleichzusetzen mit einem großen Radius des Zielkreises. Ist z. B. bei einem Neigungswinkel kleiner 0,5 Grad gar kein Azimut mehr bestimmbar, so ergibt sich für den Fehlerkreis in einer Zieltiefe von 100 m unterhalb der gerade aktuellen Meißeltiefe nur ein Radius von 0,9 m.

Insbesondere in Gebieten mit starken magnetischen Störungen ist auf eine mechanische Bestimmung der Bohrlochorientierung neben einer magnetischen nicht zu verzichten, sondern als notwendige Ergänzung zu sehen.

Literatur

- Blümling, P.: In situ Spannungsmessung in Tiefbohrungen mit Hilfe von Bohrlochrandausbrüchen und die Spannungsverteilung in der Kruste Mitteleuropas und Australiens. Dissertation, Universität Karlsruhe, 135 pp., 1986.
- Bosum, W. & Hahn, A.: Bericht über magnetische Messungen in der Bohrung KTB-VB Oberpfalz mit Hilfe eines 3-Komponenten-Bohrlochmagnetometers und gesteinsmechanische Untersuchungen, NLFb, Archiv-Nr. 103 533; Hannover, 1988.
- Kessels, W.: Die orientierte Kernentnahme unter Verwendung eines Neigungs- und Richtungsrekorders am Innenkernrohr, KTB-Report 88-7, (in Druck).
- Zoback, M. D., Moos, D. & Anderson, R. N.: Determination of the horizontal principal stresses from wellbore breakouts, EOS, Trans., AGU, 63, 1118, 1962.

Erläuterungen

AZ	Azimut
C	Übertragungskonstante der Neigungsablesung
ΔC	Fehler von C
DEV	Neigung
DEV'	Abgelesener Neigungswert nach mechanischer Übertragung zum Potentiometer
DEV''	Aufgezeichneter Neigungswert
DEV _g	Grenzwinkel der Bohrlochneigung für auswertbare RB-Messung
DEV ₀	Nullpunkteinstellung der Neigungsablesung
ΔDEV	Abweichung des Neigungspendels von der Gleichgewichtslage
$\Delta DEV'$	Fehler der DEV'-Ablesung
$\Delta DEV''$	Fehler des aufgezeichneten Neigungswertes
ΔDEV_0	Fehler der Nullpunkteinstellung
ΔDEV_R	Grenzwinkel der Abweichung des Neigungspendels von der Gleichgewichtslage für Dominanz der Lagerreibung
$\underline{e_x}$ $\underline{e_y}$ $\underline{e_z}$	Einheitsvektoren
g	9,81 m/sec ²
GAZ	Gesamtazimut
ΔGAZ	Fehler des Geräteazimuts
K	Kraft auf die Pendelmasse
Ko	Fehler der Kompaßanzeige
m	Pendelmasse

M	Drehmomentvektor
M_R	Reibungsmoment
n	Drehzahl des Meßgerätes
\underline{r}	Radiusvektor zum Schwerpunkt der Pendelmasses
r_0	$ \underline{r} $
r_x r_y	Komponenten des Radiusvektors
RB	Relative Bearing
ΔRB	Abweichung des RB-Pendels von der Nulllage
$\Delta RB'$	Fehler der RB-Ablesung
ΔRB_0	Fehler der Nullpunkteinstellung der RB-Ablesung