

Technische Universität Berlin
Institut für Bergbauwissenschaften
Straße des 17. Juni 135
1000 Berlin 12

Cuttings-Korrelations-Untersuchungen Austragsfähigkeit von Cuttings

Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Wolff
Dipl.-Ing. P. John

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zielsetzung.....	514
2. Stand der Kenntnisse.....	514
2.1 Strömungsmechanische Grundlagen.....	514
2.2 Einflußparameter auf Feststoff-Fluid-Förderung.	515
2.2.1 Korngröße und Kornform.....	515
2.2.2 Partikelverteilung über den Rohrquerschnitt....	515
2.3 Austragsverhalten von Bohrspülungen.....	517
2.3.1 Bohrkleingröße.....	517
2.3.2 Geschwindigkeiten im Ringraum.....	518
3. Bohrkleinuntersuchungen an laufenden Bohrungen.....	518
3.1 Durchgeführte Bohrkleinbeprobung.....	518
3.2 Laborauswertung.....	520
3.2.1 Quantitative Analyse.....	520
3.2.2 Qualitative Analyse.....	524
3.3 Schlußfolgerungen.....	524
4. Ansätze für ein verbessertes Rechenmodell.....	528
5. Einflußgrößenuntersuchung.....	531
6. Untersuchungsergebnis und Schlußfolgerung.....	536
6.1 Bisher nicht oder nur unvollständig erfaßte Einflußbereiche.....	536
6.2 Nachbesserungsvorschläge.....	537
6.2.1 Betriebliche Untersuchungen.....	537
6.2.2 Experimentelle Untersuchungen.....	538
6.2.3 Theoretische Untersuchungen.....	539
Literaturverzeichnis.....	539

1 ZIELSETZUNG

Um aus Bohrlochausträgen eindeutige Rückschlüsse auf die von der Bohrung durchteuften Formationen ziehen zu können, muß das Aufstiegsverhalten der festen Bestandteile der Bohrspülung hinreichend exakt beschrieben werden.

Lösungsansätze zu dieser Problematik finden sich in der einschlägigen Literatur der Erdöl- bzw. Tiefbohrtechnik. Diese Ansätze sind zu überprüfen und ihre Einflußparameter zu wichten, um so ein Bestimmtheitsmaß für diese Lösungsmodelle zu ermitteln.

Begleitend zu diesen theoretischen Betrachtungen sollten praktische Versuche durchgeführt werden, deren Ergebnisse in die Rechenmodelle eingearbeitet werden sollten, um deren Aussagekraft zu erhöhen.

Als Ergebnis ist ein verbessertes Rechenmodell zum Bohrkleinaustrag bei Tiefbohrungen anzustreben, welches den einleitend skizzierten Anforderungen genügt.

2 STAND DER KENNTNISSE

Als Arbeitsgrundlage für die vorliegende Dokumentation wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche bei den Datenbanken "DOMA", "ENERGY", "COMPENDEX" und "GEOS" bzgl. des hydraulischen Feststofftransportes in sämtlichen Bereichen des Bergbaus durchgeführt.

2.1 Strömungsmechanische Grundlagen

Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge beim vertikalen und horizontalen Feststofftransport werden bzgl. des fluiden Transportmediums in verschiedenen Modellen beschrieben. Gemein ist diesen verschiedenen Modellen die Unterteilung des Transportmediums in Newton'sche und Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten. Ersteren wird bei verschiedenen Strömungszuständen, Drücken und Temperaturen eine konstante Viskosität zugeschrieben. Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten zeigen im Gegensatz dazu Veränderungen ihrer Viskosität in Abhängigkeit der o.a. Parameter. Dieses Stoffverhalten wird in diversen rheologischen Modellen, von denen das Bingham-Plastic und das Power-Law die am weitesten verbreiteten sind, beschrieben. Für die in Ringräumen auftretenden Scherraten gibt das Power-Law-Modell, welches zur Beschreibung der Viskosität die Größen k (Konsistenz-Index) und n (Power-Law-Exponent) benutzt, hinreichend genaue Resultate. Diese Auffassung teilen fast alle Autoren, die sich in der jüngeren Vergangenheit mit fluidmechanischen Problemen der Tiefbohrtechnik beschäftigt haben. Dagegen muß festgestellt werden, daß die Meinungen bei der Festlegung des Förderzustandes für maximale Austragsfähigkeit der Bohrspülung weit divergieren. So wird in der Literatur einerseits ein laminarer Strömungszustand bei hoher Viskosität des Fördermediums favorisiert; von anderen Autoren jedoch durch Experimente belegt, daß eine turbulente Strömung bei kleiner Viskosität entsprechende Resultate liefern soll.

2.2 Einflußparameter der Feststoff-Fluid-Förderung

Die in verschiedenen Bergbauzweigen realisierten Projekte, deren Anfänge bis in die zweite Hälfte des vorigen Jahrhunderts zurückreichen, sind in der Regel nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten konzipiert. Dies bedeutet, daß die technisch-konstruktiven Parameter dieser Anlagen (Rohrdurchmesser, Feststoffkonzentration, Korngröße und Strömungsgeschwindigkeit) unter der Prämisse der Kostenminimierung gewählt wurden.

2.2.1 Korngröße und Kornform

Eng miteinander verknüpft sind in der Regel die Parameter, Korngröße (bzw. Kornform) und Strömungsgeschwindigkeit. Lediglich Suspensionen mit Feststoffpartikeln im Bereich $< 30 \mu\text{m}$ werden als homogene Fluide angesehen. Für den Bereich der turbulenten Strömung wird daher von einer nahezu gleichmäßigen Feststoffverteilung über den Rohrdurchmesser ausgegangen; die Sedimentation des Feststoffes beginnt erst im Bereich der laminaren Strömung.

Von einer echten zweiphasigen Strömung wird dagegen erst bei Korngrößen ab $50 \mu\text{m}$ gesprochen. In diesem Fall muß bei allen Überlegungen die Wechselwirkung zwischen Feststoffpartikeln und Transportmedien berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wurde aufgrund experimentell/theoretischer Untersuchungen (Becker, 1959) für Feststoffpartikel ein Widerstandskoeffizient als Funktion der Partikel-Reynolds-Zahl eingeführt, der den viskosen und den Trägheitswiderstand berücksichtigt. Dazu wurde für die Feststoffpartikel ein sog. Formfaktor eingeführt.

2.2.2 Partikelverteilung über den Rohrquerschnitt

Auch hier muß zwischen vertikalen und horizontalen Feststofftransport klar differenziert werden. Bei der Vertikalförderung ist für kreisrunde Rohrquerschnitte das Phänomen zu beobachten, daß die Feststoffpartikel vermehrt zum Rohrinne hin konzentriert sind. Dieser Umstand verdient bei der Transformation der Erkenntnisse betreffs des hydraulischen Rohrtransportes auf die spezielle Problematik des Bohrkleinaustrages bei Tiefbohrungen besondere Beachtung. Ein weiterer, wichtiger Parameter ist sicherlich die Feststoffkonzentration, die einen entscheidenden Einfluß auf die zu beobachtenden Aufstromgeschwindigkeiten hat; im Extremfall kann sogar das Strömungsprofil bzw. der Strömungszustand von zu hohen Feststoffkonzentrationen erheblich gestört werden.

In der Literatur wird an verschiedenen Stellen auf die Gefahr einer Verstopfung des Förderrohres bei zu hohen Feststoffkonzentrationen hingewiesen. Es darf jedoch nicht verschwiegen werden, daß diese Problematik bei Tiefbohrungen durch das rotierende Gestänge und die Geometrie des Ringraumes im Vergleich zum hydraulischen Feststofftransport in Rohrleitungen gänzlich verschieden ist.

Tab. 2-1

Charakteristische Größen bei der hydraulischen Förderung mineralischer Rohstoffe
(nach Wasp 1977)

Mineral	Feststoff- dichte (Kg/dm ³)	max. Korn- größe (mm)	Feststoff- konzentr. (Gew. %)	Rohrleitungs- durchmesser (mm)	Transport- geschw. (m/s)
Kohle	1,4	1,0	50	255	1,6
Kalkstein	2,7	0,295	65	273	1,15
Magnetit	4,9	0,147	60	245	2,0
Baggergut dredgings	2,65	0,470	15	324	6,0

2.3 Austragsverhalten von Bohrspülungen

Die wichtigsten Einflußgrößen beim Bohrkleinaustrag sind die Spülaufstiegs- und Spüldichtegeschwindigkeiten und die Spüldichte. Diese Erkenntnis zieht sich unabhängig von Cuttingdurchmesser, Dichte etc. durch die entsprechenden Veröffentlichungen seit ca. 40 Jahren. Zu empirischen Untersuchungen der verschiedenen Bohrungen kamen experimentelle Analysen, die jedoch die Problematik der Auskesselungen etc. nur ungenügend erfassen. Als "Kernliteratur" läßt sich diesbezüglich sicherlich die Arbeit von William und Bruce (1951) bezeichnen, welche das Aufstiegsverhalten von Cuttings qualitativ und quantitativ erfaßt. Ergänzend dazu kann nach Zeidler und Chien (1972) festgestellt werden, daß die Rotation des Bohrstranges sowie eine turbulente Förderung im Ringraum den Bohrkleinaustrag begünstigen. Es scheint jedoch nicht zwingend notwendig, daß zur Förderung des Bohrkleins eine hochviskose, Nicht-Newton'sche Flüssigkeit notwendig ist, bzw. den Bohrkleinaustrag verbessert. Tatsache bleibt jedoch, daß nach den o.a. Untersuchungen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Partikel-Sinkgeschwindigkeit und der Quadratwurzel der Partikel-Durchmesser nachgewiesen werden konnte. Die optimale Ringraumgeschwindigkeit, Bohrlochsohlendruck, Bohrlochneigung, Bohrstrangrotation und Bohrstrangexzentrizität sind nicht berücksichtigt. Verallgemeinerungen bzgl. Cuttinggröße, Ringraumgeschwindigkeit und Spüldichte scheinen nach der recherchierten Literatur nicht zulässig.

Interessant erscheint den Verfassern der Ansatz von Casson, der eine Weiterentwicklung des Modells nach Power-Law darstellt. Hierbei werden Grenzbereiche der Scherraten erfaßt, die im konventionellen Power-Law-Modell keine Berücksichtigung erfahren. Dieses rheologische Modell ist jedoch in seinen Berechnungsgängen ungleich komplizierter als die Vorgehensweise nach Power-Law, so daß der erhöhte Rechenaufwand durch die etwas höhere "Trennschärfe" im Grenzbereich der Scherraten nicht gerechtfertigt erscheint.

Sicherlich herausragende Bedeutung bei der Bewertung des Gesamtproblems haben experimentelle Untersuchungen zum realen Bohrkleintransport in Tiefbohrungen. Hervorzuheben sind Ergebnisse von Tomren u.a. (1983/1986), die das Sedimentationsverhalten der transportierten Feststoffe in Abhängigkeit von Bohrlochneigungen und Ringraumgeschwindigkeiten beschreiben. Festzuhalten bleibt, daß der Einfluß der Bohrstrangrotation bei turbulenter Strömung gering ist.

Vergleichend zu den Resultaten von experimentellen Untersuchungen auf dem Gebiet der hydraulischen Feststoffförderung bleibt zu konstatieren, daß gering viskose Spülungen im turbulenten Strömungsbereich ein ähnlich gutes Transportverhalten zeigen, wie hochviskose Fluide im laminaren Bereich.

2.3.1 Bohrkleingröße

Unterschiedlich sind die Aussagen in der erdöltechnischen Literatur betreffs der Partikeldurchmesser. In den einschlägigen Berechnungen wird jeweils vom größtmöglichen Durchmesser ausgegangen, der sich in der Größenordnung von 1/8" bis 5/8" bewegt, wobei der mittlere Durchmesser mit 1/4" anzusehen ist.

2.3.2 Geschwindigkeiten im Ringraum

Sofern die Strömungsgeschwindigkeit größer als die Sinkgeschwindigkeit ist, kommt es zu einer Aufwärtsbewegung der Bohrkleinpartikel. Mathematische Ansätze gehen davon aus, daß die Teilchen sich untereinander nicht beeinflussen; die Strömungsgeschwindigkeit sei die Geschwindigkeit des Fluids in unmittelbarer Umgebung des betrachteten Teilchens. Da dies in der Realität nicht der Fall sein kann, wird in der Praxis mit Durchschnittswerten bzgl. Geschwindigkeiten, Durchmessern und Konzentrationen gerechnet.

Die Aufströmgeschwindigkeit des Bohrkleins als Differenz, der Fluid- und der Sinkgeschwindigkeit wird bestimmt vom Schlupf zwischen diesen beiden Komponenten. Der Schlupf wiederum ist eine Funktion

- der Partikelgröße
- der Kornform
- der Feststoffdichte
- der Fluiddichte
- der Strömungscharakteristik
- der rheologischen Spüleigenschaften
- der Strömungsgeschwindigkeit

3 BOHRKLEINUNTERSUCHUNGEN AN LAUFENDEN BOHRUNGEN

Da ausreichendes Datenmaterial betreffs Korngröße bzw. Kornverteilung beim Cuttingaustrag nicht zur Verfügung stand, wurden an verschiedenen Tiefbohrungen Proben aus dem Bohrlochaustrag gezogen.

Bei der Konzeption dieser Untersuchung wurde davon ausgegangen, daß über die Kornverteilung von Cuttings in Abhängigkeit von den bekannten Einflußgrößen wie Formation, Meißel, Spülung, Bohrfortschritt ausreichendes Datenmaterial vorliegt, auf dem aufgebaut werden könnte, um erste Korrelationsuntersuchungen an Tiefbohrungen zu beginnen. So sollten im Rahmen dieser Untersuchung an z.T. laufenden Bohrungen aus verschiedenen Teufenbereichen, aus unterschiedlichen Formationen und bei verschiedenen Meißelsystemen Cuttingproben entnommen werden, um in erster Linie Korngrößenverteilungen zu ermitteln. Eine erste Gegenüberstellung von Kern- und Cuttingmaterial ist erfolgt und wird kommentiert.

3.1 Durchgeführte Bohrkleinbeprobung

In der 2. Jahreshälfte 1987 wurden an vier Tiefbohrungen in Teufen von 1000 m bis 5000 m in den Formationen Kreide, Buntsandstein und Rotliegendes während des Einsatzes von Kernbohrkronen, Dia-, Warzen- und Rollenmeißeln Proben aus dem Spülungsumlauf entnommen mit dem Ziel, Korngrößenverteilungen zu ermitteln (Tab. 3-1).

Die Probleme der Entnahme repräsentativer Probemengen aus einem Feststoff-Flüssigkeits-Gemischstrom sind zwar bekannt, hatten sich durch die Überlagerung anderer Schwierigkeiten bei dem Bohrspülungsumlauf jedoch noch verstärkt.

Tab. 3-1 Angaben zu Bohrungen, auf denen Bohrklein-Korngrößenverteilungen untersucht wurden

BOHRUNG	A	B	C	D
DATEN				
Teufe (m)	5.000	3.600	1.360	2.390
Bohrloch- durchmesser	5 7/8"	12 1/4"	17 1/2"	12 1/4"
Formation	Rotliegendes	mittlerer Bunt- sandstein	Oberkreide	Oberkreide
Meißelart	Dia-Kernbohrkrone Warzenmeißel	Warzenmeißel	Rollenmeißel	Rollenmeißel
Spülungsart	Ton-Salzwasser	Ton-Salzwasser	Ton-Süßwasser	Ton-Süßwasser
Spülungs- dichte (g/cm ³)	1,35	1,70	1,16	?
Spülrate (l/min)	620	2.200	3.640	?
Bohrfort- schritt (m/h)	0,75 / 0,5	1	12	3
Spülungs- temperatur (° C)	34	74	72	83
Verrohrungs- teufe (m)	4.674	2.760	?	?
Spülauf- stiegszeit (min)	?	110	50	75

Während die Probenahme und die Probenvorbereitung für Feststoffe genormt ist, wird in DIN 51 701 zur Probenahme von Feststoff-Flüssigkeits-Gemischen lediglich gesagt, daß die Probe entweder mit einem Schlitzgefäß am Auslauf des Gemischstromes zu entnehmen ist oder der gesamte Förderstrom kurzzeitig abzuleiten und zu proben ist. Letzteres entspricht den üblichen Auslaufmessungen beispielsweise zur Kalibrierung von Durchflußmeßgeräten. Die Umleitung des gesamten Spülstromes hätte Umbaumaßnahmen zur Folge gehabt, die aus unterschiedlichen Gründen in den vorliegenden Fällen nicht vorgesehen waren. Es verblieb somit die Entnahme von Teilmengen aus der gesamt umlaufenden Spülung. Hierzu wurde ein Schlitzprobenehmer entwickelt, der durch den Gutstrom hindurchgeführt wurde, um repräsentativ Proben zu nehmen.

Nach der Vorgabe

$G = 0,06 \cdot d$ $G =$ Gewicht der Einzelprobe in kg
 $d =$ max. Korngröße in mm
 0,06 = Faktor mit Einheit (kg/mm)

für das Mindestgewicht einer Einzelprobe bei Korngrößen < 120 mm wurde ein Schlitzprobenehmer entwickelt, bei dem sichergestellt war, daß kein Probenmaterial durch den starken Spülstrom wieder ausgespült wurde.

Ursprünglich war geplant, ausschließlich den Hauptförderstrom zu beproben. Wegen der auftretenden Schwierigkeiten bei der Probenahme, aber auch wegen der geringen erbohrten Feststoffmengen insbesondere beim Kernen und beim Diameißeleinsatz wurden zusätzlich Proben aus dem Überlauf und dem Durchgang der ersten Trennstufe, dem Schüttelsieb, entnommen.

3.2 Laborauswertung

3.2.1 Quantitative Analyse

Die Aufbereitung und Auswertung des Probenmaterials erwies sich wegen der großen Feinkörnigkeit als besonders schwierig. Die gezogenen Suspensionsproben wurden eingedampft, die Rückstandsmengen gewogen und anschließend naß gesiebt. Besondere Aufmerksamkeit galt der Agglomeration des Cuttingsmaterials, die die Siebkennlinien erheblich verfälschen. Desgleichen mußte beim Eindampfen der Suspensionen und dem Wieder-Anmischen mit Wasser eine nachträgliche Zerkleinerung vermieden werden. Das Problem der Agglomeration zeigte sich besonders deutlich im Ultraschallbad. Kurz nach Abschalten des Ultraschallbades setzte die Agglomeration wieder ein.

Die nach der Normenreihe 1 mm, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m, 63 μ m naßgesiebten Fraktionen wurden wiederum getrocknet und gewogen, um die Körnungskennlinien zu erstellen. Zur Beschleunigung des Eindampfens wurde ein Teil des Probenmaterials vorher zentrifugiert.

Für eine Bohrung ist in den Abb. 3-1 bis 3-3 das Ergebnis der Korngrößenverteilung einer Probe aus dem Gesamtrücklauf, dem Siebüberlauf und Siebunterlauf dargestellt. Siebüberlauf und Siebdurchgang wurden alle halbe Stunde geprobt. Insbesondere aus der Korngrößenverteilung des Siebüberlaufes wird das Problem der Agglomeration deutlich. Die dargestellten Korngrößenverteilungen sind beispielhaft ausgewählt, statistisch aber nicht gesichert.

Die Fraktion < 250 μ m wurde teilweise zusätzlich im Granulometer untersucht.

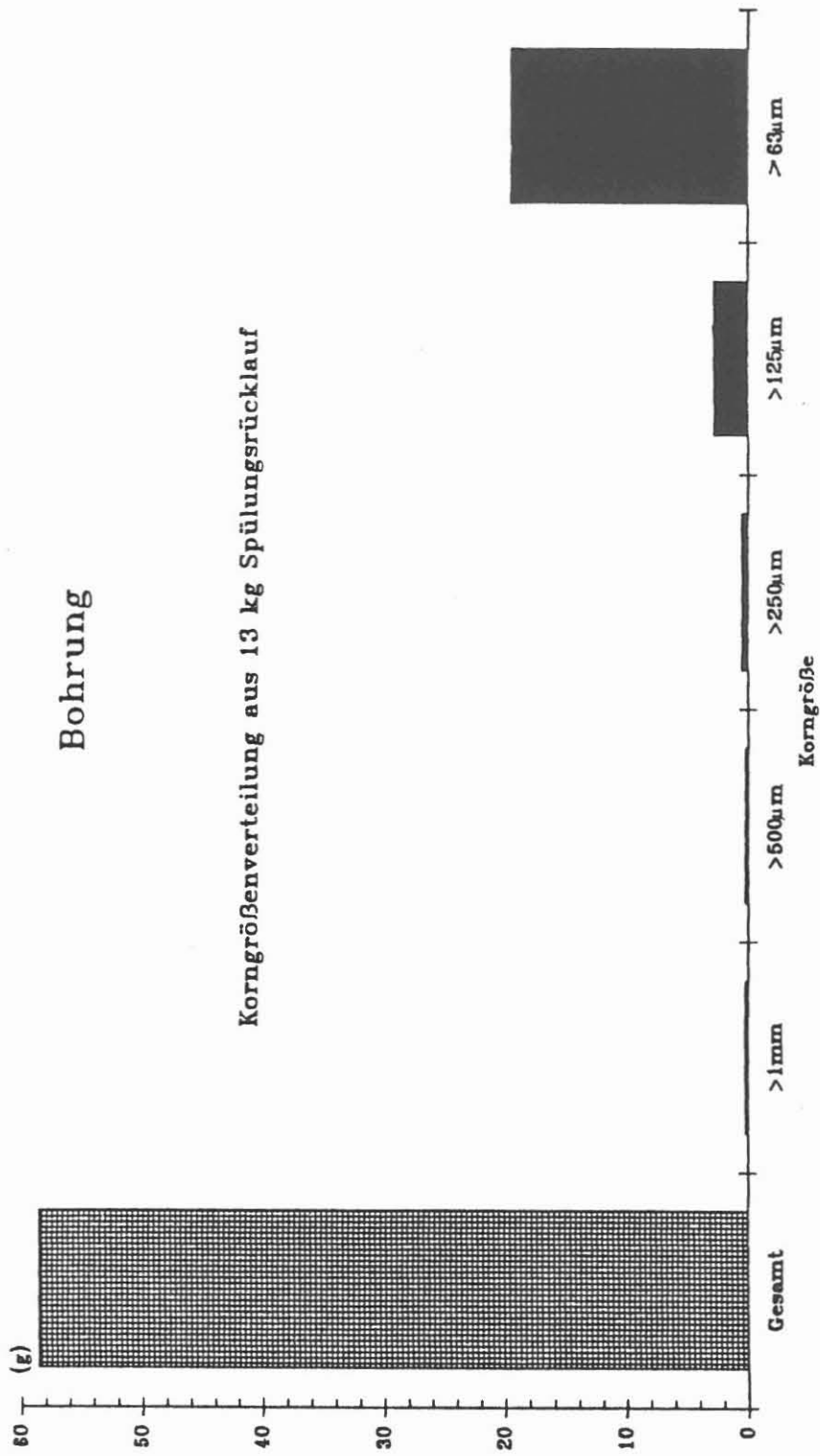


Abb. 3 - 1 Korngrößenverteilung im Gesamtrücklauf

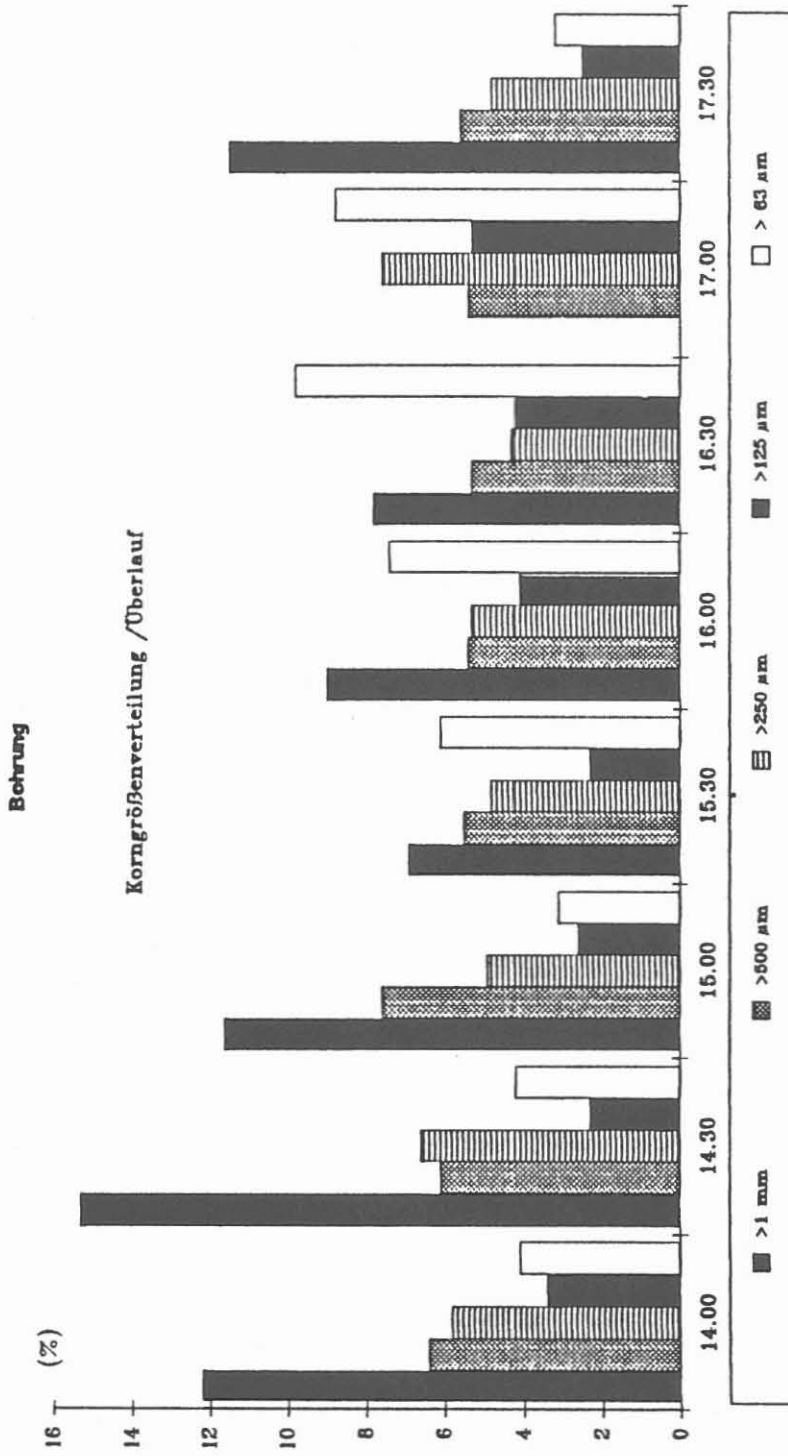


Abb. 3 - 2 Korngrößenverteilung im Überlauf

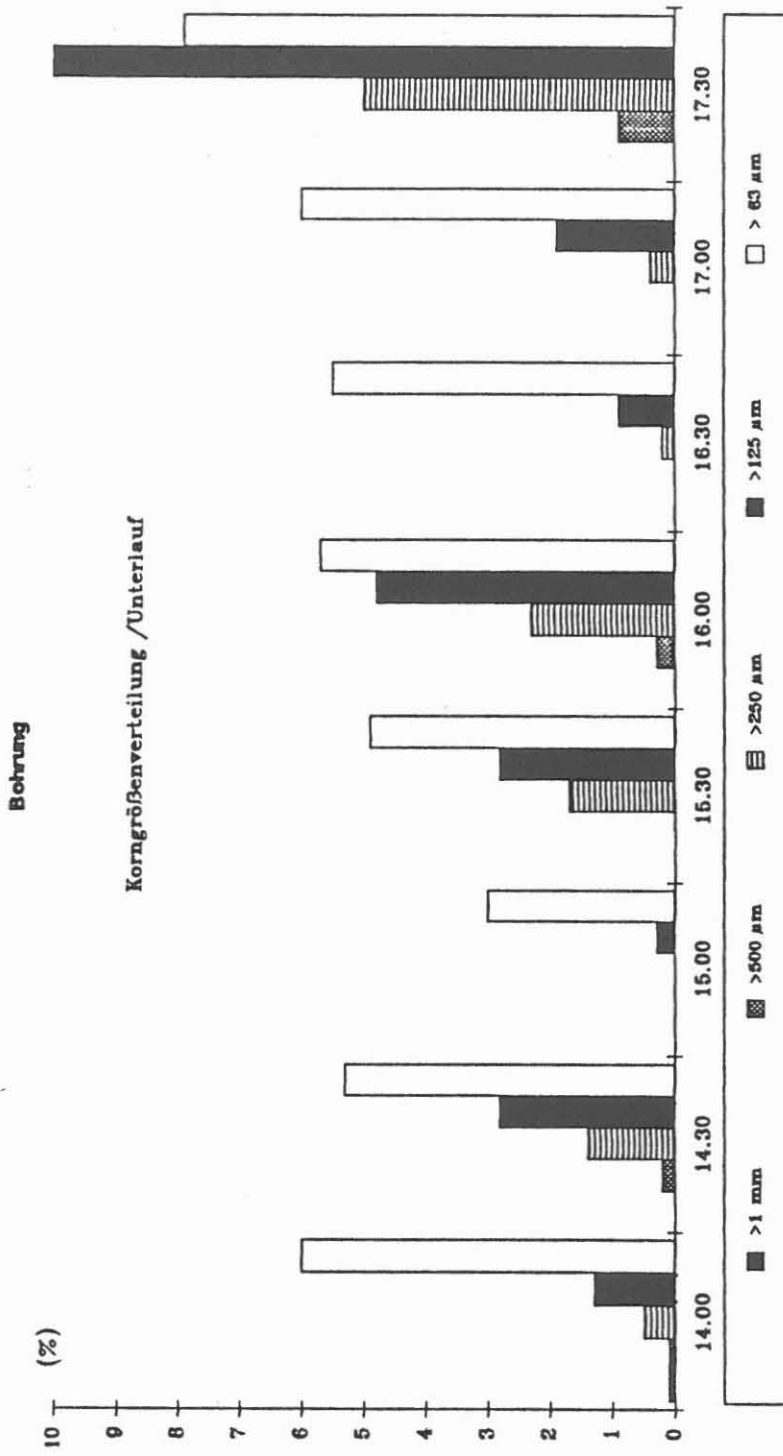


Abb. 3 - 3 Korngrößenverteilung im Unterlauf

3.2.2 Qualitative Analyse

Da aus betrieblichen Gründen keine exakten Angaben über Spülmittelzusätze zu erhalten waren, wurde ein Teil der Proben sowie reine Bohrspülung - soweit vorhanden - granulometrisch bzw. röntgenographisch analysiert, um durch Subtraktion der Spülungskomponenten Aussagen über das eigentliche Bohrklein zu erhalten.

Die Beurteilung des Cuttingmaterials war insofern besonders erschwert, als ein Teil des Formationsmaterials den Spülmittelzusätzen glich und daß sich ein anderer Bohrkleinanteil während der Probenaufbereitung auflöste bzw. in Suspension ging, so daß diese Anteile zur Auswertung nicht mehr zur Verfügung standen.

Ein weiterer Grund für die Röntgenuntersuchungen lag in dem Versuch, Cuttingmaterial mit Kernmaterial zu vergleichen. Abb. 3-4 bis 3-6 enthält beispielhaft einen computergestützten Ergebnisausdruck der Gegenüberstellung der röntgenographischen Untersuchungen von Cuttings- und Kernmaterial.

Die Ergebnisse der Röntgenanalyse von einer Siebfraktion $<63 \mu\text{m}$ und von Kernmaterial wird in einen Rechner eingegeben und entsprechend den Intensitäten auf mögliche Substanzen hin untersucht. Dies Beispiel der qualitativen Analyse zeigt überwiegende Anteile von Quarz, kleinere Anteile Dolomit und Calcit.

3.3 Schlußfolgerungen

Erste Untersuchungen der Korngrößenverteilung von Cuttings beim Tiefbohren sind in Formationsbereichen durchgeführt worden, die bei der KTB-Bohrung nicht durchteuft werden. Bei der KTB-Bohrung werden sich auch geringere oder gar keine Schwierigkeiten bei der Differenzierung von Spülmittel- und Bohrkleinmaterial ergeben. Im übrigen sind die geschilderten Cuttinguntersuchungen als Voruntersuchungen anzusehen. Die geringe Zahl der Versuche läßt keine statistische Auswertung zu.

Grundsätzlich sollte es aber möglich sein, eine "onstream" Probenahme für Korngrößenverteilungen zu entwickeln, um kontinuierlich aktuelle Daten in das zu entwickelnde Cutting-Teufen-Korrelationsmodell eingeben zu können. Die Vorversuche und ihre analytische Bearbeitung zeigen Wege hierzu auf.

2x10³

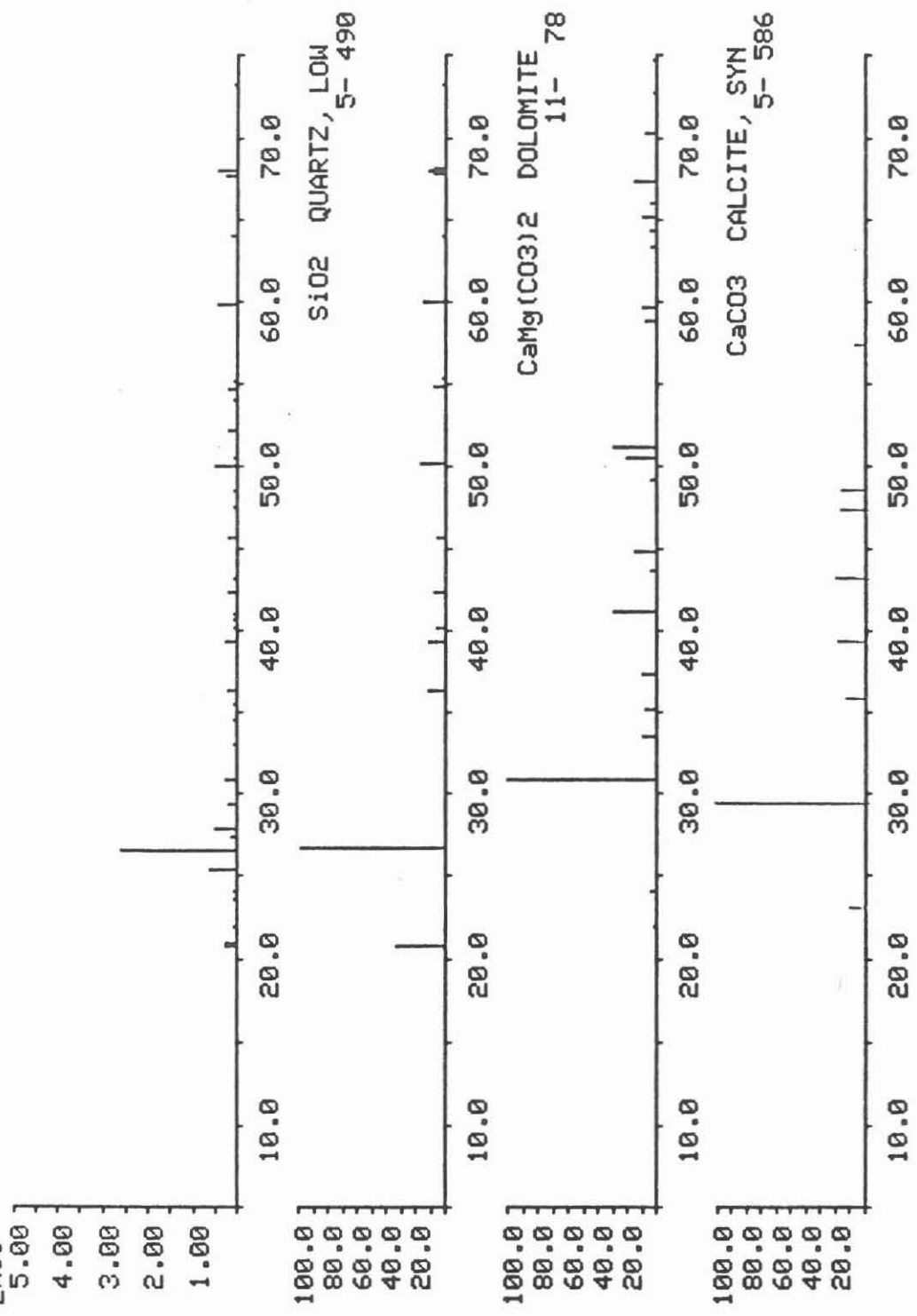


Abb. 3 - 4 Röntgenanalyse der Cuttings

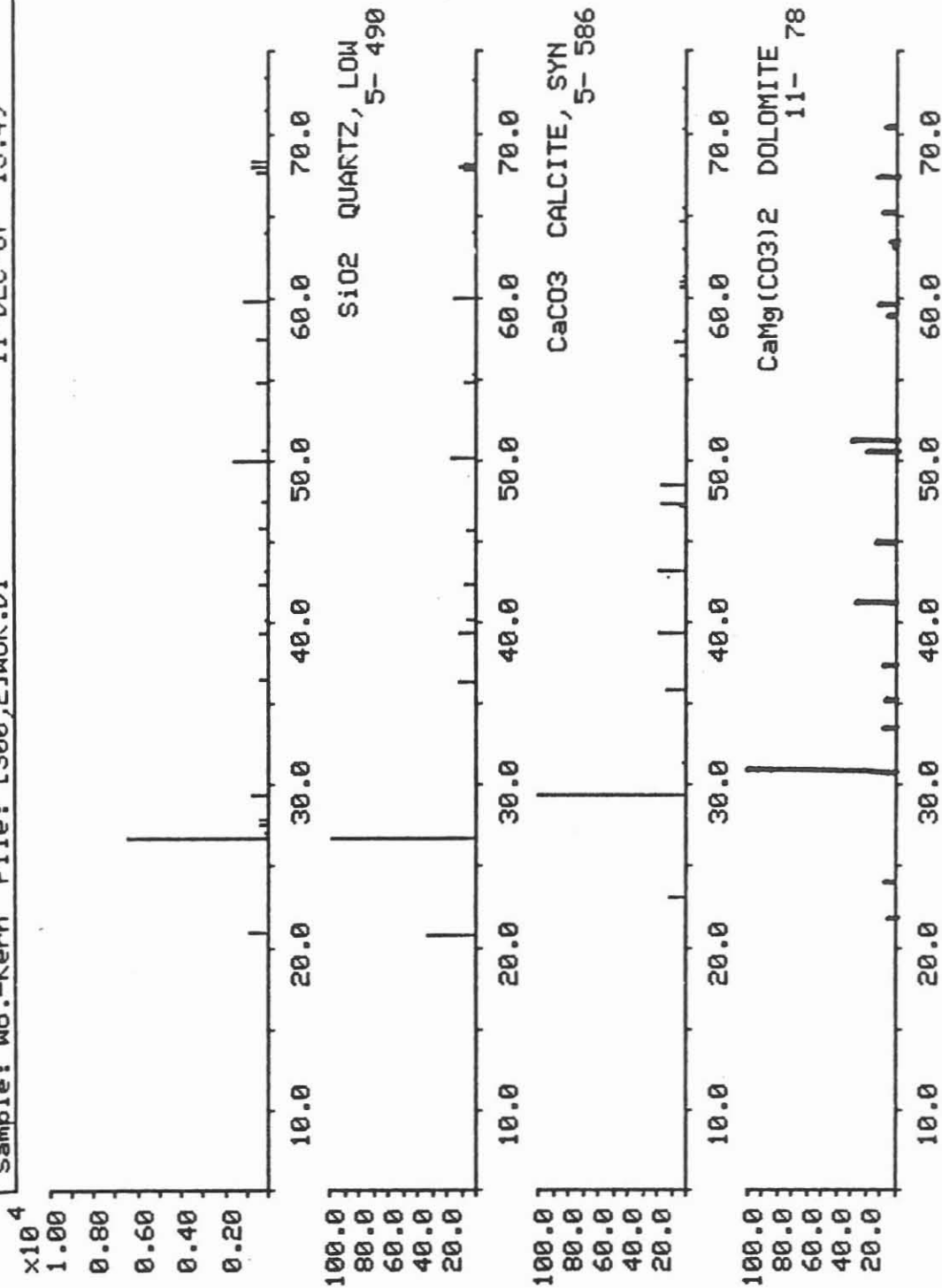


Abb. 3 - 5 Röntgenanalyse des Bohrkerns

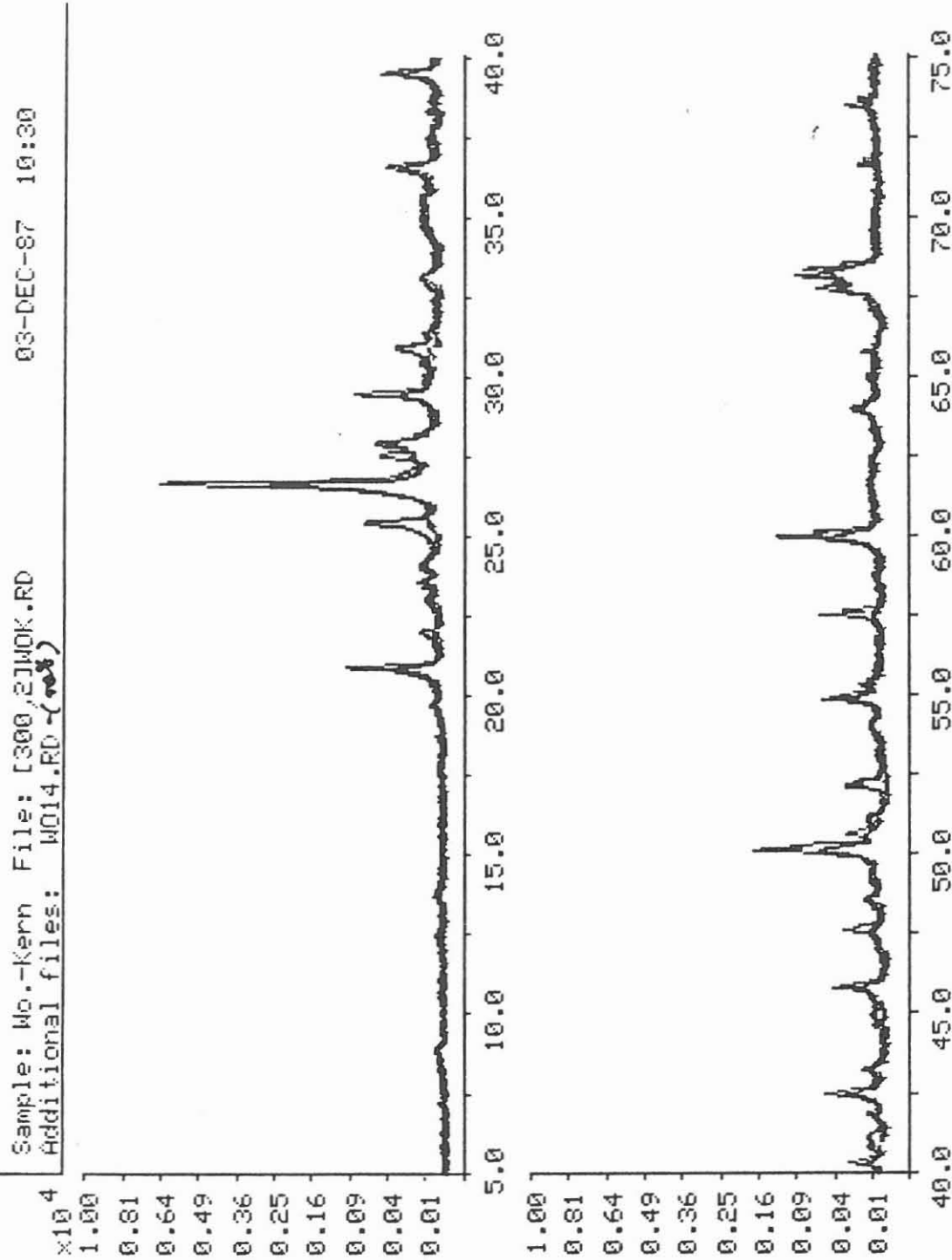


Abb. 3 - 6 Gegenüberstellung des Bohrklein- und Bohrkernmaterials

4 ANSÄTZE FÜR EIN VERBESSERTES RECHENMODELL

Auf der Basis des Power-Law-Modells zur Berechnung der Bohrlochhydraulik bei Tiefbohrungen wurde ein Rechenprogramm für IBM-kompatible PC's geschrieben. Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sind in ersten Ansätzen bereits in dieses Programm eingearbeitet; die experimentellen Untersuchungen bedürfen einer weiterführenden Interpretation, um Modifikationen am Berechnungsmodell vorzunehmen.

Die Benutzung von kommerzieller Software zur Bohrlochhydraulik wurde aus verschiedenen Gründen verworfen. In der vorliegenden Arbeitsversion ist das Rechenprogramm auf folgende Ansprüche zugeschnitten:

1. ausschließliche Berechnung von Kenngrößen zur Cuttingbewegung in Ringräumen
2. absolute freie Wählbarkeit der Parameter des Bohrloches und bei der Zusammenstellung der Gestängegarnitur
3. Möglichkeit zur Änderung von einzelnen Berechnungsschritten durch Eingriff in das Rechenprogramm
4. Druckerausgabe der relevanten Resultate, um diese in Bezug auf die o.a. Parameter exakt miteinander vergleichen zu können
5. (Optional) Graphische Darstellung einzelner Ergebnisse auf Plotter.

Es handelt sich im wesentlichen um ein Hilfsmittel, um die verschiedenen Grenzen des gewählten Rechenmodells einfach abfahren zu können wie z.B.

1. Berechnung von Strömungsverhalten der Cuttings im μm -Bereich sowie im cm -Bereich
2. Berechnungen in extrem schmalen Ringräumen
3. Berechnungen im Bereich extrem hoher/niedriger Strömungsgeschwindigkeiten der Bohrspülung.

Diese Berechnungen sind durchzuführen für

1. Cuttings verschiedener Dichte
2. Spülungen niedriger Dichte und Viskosität (Wasser)
3. hohe Cuttingkonzentrationen in verschiedenen Körnungsbereichen und
4. Cuttings unterschiedlicher Kornform.

Das Rechenprogramm TUB-CUT ist in GW-Basic als einfaches "RUN + CALCULATE"-Programm geschrieben, was sich für die gestellte Aufgabe als ausreichend erwiesen hat. Abb. 4-1 zeigt das Struktogramm von TUB-CUT.

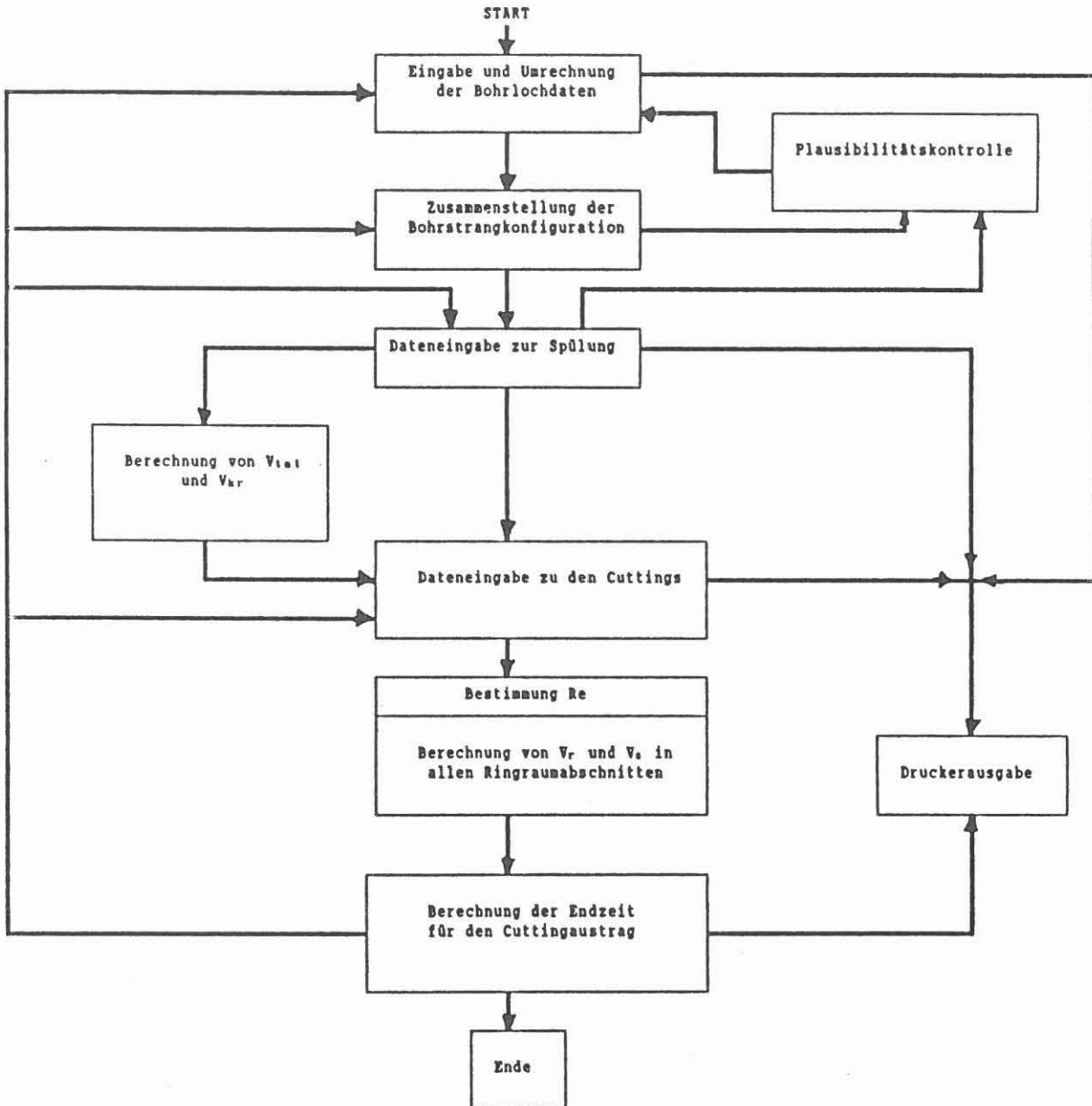


Abb. 4 - 1 Struktogramm des Rechenprogramms TUB-CUT

TUB-CUT ERGEBNISBLATT

Datum 12-22-1987

Bohrlochteufe (in m) 3000
Verrohrungsteufe (in m) 2400
Durchmesser 'Open Hole' (in Zoll) 8
Casingdurchmesser (in Zoll) 7 1/2

DRILLPIPES	6 7/8 Zoll	1000 m Länge
DRILLPIPES	6 Zoll	1834 m Länge
SCHWERSTANGEN	6 1/2 Zoll	54 m Länge
STABILIZER	6 5/8 Zoll	81 m Länge
SCHWERSTANGEN	7 Zoll	27 m Länge
TOOLJOINTS	7 Zoll	3 m Länge
DRILLBIT	7 Zoll	1 m Länge

Bohrlochteufe (in m) 3000
Verrohrungsteufe (in m) 2400
Durchmesser 'Open Hole' (in Zoll) 8
Durchmesser Casing (in Zoll) 7 1/2

Höhe der Cuttings (mm) 2
Länge der Cuttings (mm) 6
Dichte der Cuttings (kg/m³) 2.62
Spülrate (l/min.) 610
Spüldichte (Kg/m³) 1.12
K (Power-Law) .299
n (Power-Law) .659
Scheibe oder Kugel S

CASING / DRILLPIPES	Aufstiegszeit (min.)	8.46
CASING / DRILLPIPES	Aufstiegszeit (min.)	51.85
OPEN HOLE / DRILLPIPES	Aufstiegszeit (min.)	16.07
OPEN HOLE / SCHWERSTANGEN	Aufstiegszeit (min.)	1.36
OPEN HOLE / STABILIZER	Aufstiegszeit (min.)	1.85
OPEN HOLE / SCHWERSTANGEN	Aufstiegszeit (min.)	.42
OPEN HOLE / TOOLJOINTS	Aufstiegszeit (min.)	.05
OPEN HOLE / DRILLBIT	Aufstiegszeit (min.)	.02
OPEN HOLE / BOHRLOCHSOHLE	Aufstiegszeit (min.)	0

Die Gesamtaufstiegszeit beträgt 80.08 Minuten

Abb. 4 - 2 Beispielhafter Ergebnisausdruck für
die Cuttings - Aufstiegszeit

Die Eingabeparameter sind getrennt nach: Bohrlochparameter (Teufe, ID, Casing, ID-Casing), Bohrstranggarnitur (Drill-Bit, Kernrohr, DH-Motor, Schwerstangen, Stabilizer, Drillpipe, Tooljoint), Bohrlochhydraulik (Pumprate, Dichte des Fluids, Viskosimeterablesungen) und spezifischen Kennwerten der Cuttings (Dichte, Durchmesser, Form). Das Endresultat ist die Aufstiegszeit eines Bohrklein-Partikels im Ringraum vom Bohrloch-tiefsten bis zur Tagesoberfläche. Abb. 4-2 zeigt einen Beispielausdruck des Programmes TUB-CUT.

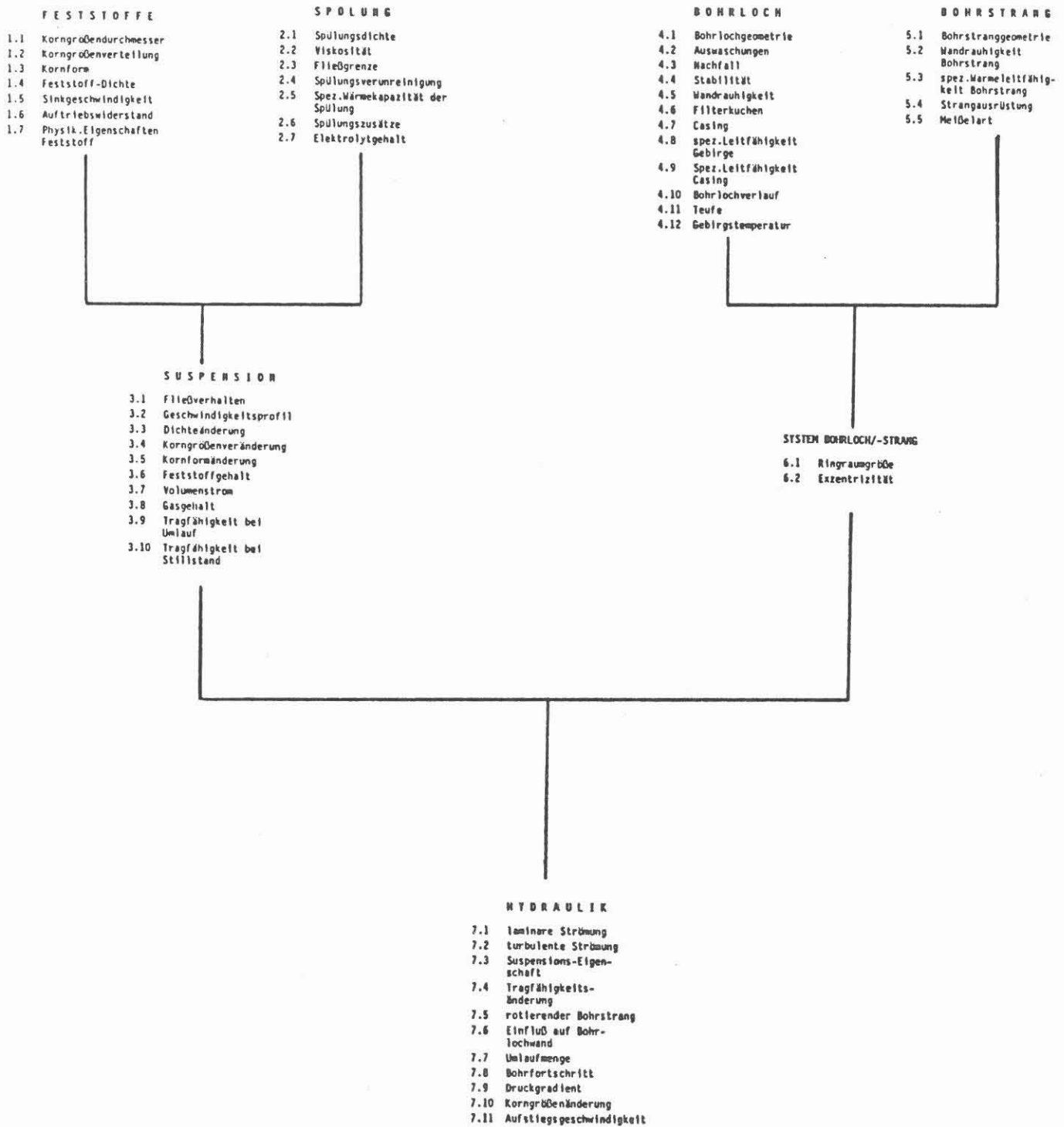
5 EINFLUSSGRÖSSENUNTERSUCHUNG

Aus den Quellen ist deutlich geworden, daß für näherungsweise Berechnungen der Austragszeit von Cuttings ausreichende Kenntnisse vorliegen, die aber für eine rückgerechnete Teufenzuordnung zu ungenau sind. Die Einflußgrößen sollen deshalb in einer Matrix zusammengestellt und eine Wichtung versucht werden, um in Kombination mit dem Erkenntnisstand über die Einflußgrößen Auskunft darüber geben zu können, welche Bereiche bzw. Parameter vordringlich intensiv zu untersuchen sind, bei welchen Parametern evtl. Nachbesserungen erfolgen müssen und welche Größen für den Bohrkleinaustrag von untergeordneter Bedeutung sind.

Für eine derartige Bewertung werden Kriterien der Nutzwertanalyse herangezogen (Zangemeister 1973). Hierzu wird eine Hierarchie der Bewertungs- und Anforderungskriterien erstellt. Die zur Bewertung notwendigen Kriterien werden in einem Systemwert zusammengefaßt, wobei Einflußgrößen und Anforderungen bewertet werden, deren Auswirkungen bisher rechnerisch nicht oder nur unzulänglich erfaßt sind. Hierzu wird zunächst das Gewicht der einzelnen Parameter in der Gewichtungsmatrix festgelegt und die Erkenntnisfaktoren der einzelnen Parameter bestimmt. Die Multiplikation beider Faktoren ergibt den Teilwert und deren Summe den Systemwert. Die für den Bohrkleinaustrag wichtigen Parameter sind in sieben Systemgruppen zusammengestellt. Die Grundgrößen wurden in die Systeme "Feststoff", "Spülung", "Bohrloch" und "Bohrstrang" unterteilt, aus denen sich dann die beiden Systeme "Suspension" und "Bohrloch/Bohrstrang-Konfiguration" ergeben. Das letzte System "Hydraulik" erfaßt sodann den Gesamtzusammenhang des Bohrkleinaustrages (Tab. 5-1).

Aus den einzelnen Parametern der Systeme 1-7 aus Tab. 5-1 wurde eine Matrix ihrer Gewichtungsfaktoren erstellt. Desweiteren wurden für alle diese Parameter sogenannte Erkenntnisfaktoren mit der Bewertung 1-3 eingeführt, wobei z.B. für Parameter, über die keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, bzw. deren Verhalten bezüglich des Bohrkleinaustrages in der Literatur als teilweise widersprüchlich charakterisiert wird, der Erkenntnisfaktor 3 einzusetzen ist.

Die Multiplikation von Gewichtungsfaktor und Erkenntnisfaktor ergibt den sogenannten Teilwert des zu betrachtenden Parameters. Alle Parameter werden schließlich nach ihren Teilwerten geordnet, wobei die rangersten Parameter den größten Erkenntnisbedarf hinsichtlich ihres starken Einflusses auf den Bohrkleinaustrag haben. Die letzten Rangplätze nehmen diejenigen Parameter ein, deren Einfluß auf den Bohrkleinaustrag unbedeutend oder deren Erkenntnisse hinreichend gesichert sind.



Tab. 5 - 1 Den Bohrkleinaustrag beeinflussende Parameter

Nach diesem ersten Versuch einer Parameterwichtung haben all diejenigen Größen einen besonderen Nachholbedarf an Erkenntnissen bzw. bedürfen noch besonderer Klärung, die unerwartete, unregelmäßige Bedingungen im unverrohrten Ringraum provozieren. Durch den an erster Stelle stehenden Nachfall beispielsweise wird Feststoffmaterial aus beliebiger Teufe der Spülung zugeführt, verändert unkontrolliert das aufsteigende Feststoff-Flüssigkeits-System mit all seinen Parametern und hinterläßt in der Bohrlochwandung für die nachfolgende Zeit des Bohrens bis zum Verrohren eine Unregelmäßigkeit in der Bohrlochwandung. Letztere können ähnlich wie bei Auswaschungen zur vorübergehenden Ansammlung von Bohrklein bestimmter Gleichfälligkeitsklassen führen, was bei Austragsbeurteilung zur Fehlinterpretation führen muß.

Tab. 5-2 zeigt die Rangordnung der Parameter nach ihren Teilwerten.

Tab. 5-2: Rangordnung der Parameter nach Teilwerten

Rangfolge	System-Nr.	Parameter	Teilwert
1	4.3	Nachfall	210
2	3.9	Tragfähigkeit Suspension bei Strömung	204
3	4.2	Auswaschungen Bohrloch	204
4	7.10	Korngrößenveränderung	192
5	7.5	Rotierender Bohrstrang	177
6	6.2	Exzentrizität Bohrstrang	171
7	4.6	Wandrauhigkeit Bohrloch	171
8	4.11	Teufe	166
9	7.11	Aufstiegsgeschwindigkeit	165
10	4.12	Gebirgstemperatur/Gradient	156
11	1.5	Sinkgeschwindigkeit	156
12	1.2	Korngrößenverteilung	144
13	3.6	Feststoffgehalt Suspension	136
14	1.6	Auftriebswiderstand	126
15	3.1	Fließverhalten Suspension	126
16	4.9	Spez. Wärmeleitfähigkeit Gestein	116
17	4.7	Filterkuchen	116
18	2.2	Viskosität Spülung	114
19	3.3	Dichteänderung Suspension	114
20	3.4	Korngrößenänderung	112
21	7.6	Bohrlochwandeinfluß	112
22	3.5	Kornformänderung Suspension	108
23	7.2	turbulente Strömung	102
24	7.4	Tragfähigkeitsänderung	102
25	7.1	laminare Strömung	98
26	7.3	Suspensionseigenschaften	98
27	2.4	Spülungsverunreinigungen	96
28	3.2	Geschwindigkeitsprofil Suspension	96
29	1.1	Korngrößendurchmesser	80
30	4.10	Bohrlochverlauf	75
31	4.1	Bohrlochgeometrie	72
32	3.8	Gasgehalt Suspension	70
33	4.7	Casing	69
34	3.10	Tragfähigkeit Suspension bei Stillstand	67
35	1.3	Kornform	62
36	2.3	Fließgrenze Spülung	60
37	6.1	Ringraumgröße	59

Rangfolge	System-Nr.	Parameter	Teilwert
38	7.8	Bohrfortschritt	58
39	5.1	Bohrstranggeometrie	58
40	2.1	Spüldichte	58
41	1.4	Feststoffdichte	55
42	5.4	Bohrstrangausrüstung	55
43	7.9	Druckgradient	54
44	7.7	Umlaufmenge	51
45	2.6	Spülnzusätze	51
46	5.5	Meißelart	38
47	2.7	Elektrolytgehalt Spülung	36
48	1.7	Physikal.Eigenschaften Feststoff	33
49	5.3	spez.Wärmeleitfähigkeit Strang	22
50	5.2	Wandrauhigkeit Bohrstrang	19
51	2.5	Spez.Wärmekapazität Spülung	19

6 UNTERSUCHUNGSERGEBNIS UND SCHLUSSFOLGERUNG

Aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche, der gewichteten Einflußgrößenmatrix und des Rechenmodellansatzes wird deutlich, daß für eine gesicherte Bohrklein-Teufen-Korrelation Nachbesserungen in verschiedenen Bereichen notwendig werden.

6.1 Bisher nicht oder nur unvollständig erfaßte Einflußbereiche

Nachfolgende Bereiche wurden bei den bisherigen erdöltechnischen Untersuchungen nur unvollständig oder gar nicht berücksichtigt bzw. vereinfachend angenommen:

1. Echte Messung der Schlupfgeschwindigkeit sowohl vom Einzelkorn als auch von Kornkollektiven
2. Einsatz/Verwendung von Cuttings aus Bohrungen, d.h. Feststoffen mit realistischen Körnungskennlinien
3. Verwendung von dichteunterschiedlichen Cuttings
4. Phänomen der Bohrlochwand-Auswaschungen, insbesondere die Tatsache, daß sich Bohrklein in derartigen Hohlräumen ansammelt und bei Geschwindigkeitsrückgang als Gutwolke in den Ringraum hineinrutscht und zu Verstopfungen führen könnte
5. Der Komplex zur Bohrkleincharakterisierung, d.h.
mittlere Korngröße
Körnungskennlinie
Kornform
Sinkgeschwindigkeit
Dichteunterschied
Strömungsprofil
Konzentration

bisher nur unbefriedigend bzw. nicht vollständig erfaßt
6. Korngrößenänderung über den Transportweg/-zeit
7. Kornformänderung über den Transportweg/-zeit
8. Zerkleinerungsgrad von Cuttings durch Bohrstrang-Bohrlochwand/Casing - Kontakt
9. Durch Cuttingabrieb sich verändernde rheologische Eigenschaften der Bohrspülung
10. Exzentrizität des Bohrstranges.

Aus dem Betrieb anderer hydraulischer Feststoffsysteme außerhalb der Erdöltechnik sind die Erfahrungen nicht unmittelbar übertragbar, weil die Betriebsbedingungen und Zielsetzungen erhebliche Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede liegen in erster Linie an dem größeren Korndurchmesser,

der höheren Fluidgeschwindigkeit, der höheren Transportkonzentration, den geänderten geometrischen Abmessungen der Förderleitungen und der andersartigen Rheologie der Träger-Flüssigkeit. Ein Teil der experimentellen und betrieblichen Ergebnisse über Schwarmverhalten, Kornbandbreiten und Veränderungen von Korngrößenverteilungen über die Förderweglänge kann dennoch zur Interpretation des Aufstiegsverhaltens von Cuttings in Ringräumen herangezogen werden.

Darüberhinaus werden für eine exakte Bohrklein-Teufen-Korrelation systematische, theoretische, experimentelle und betriebliche Untersuchungen notwendig werden. Während der Übergangszeit und für eine unmittelbare Cuttings-Teufen-Korrelation für die KTB-Vorbohrung wäre eine Näherungslösung vertretbar, die beispielsweise den zu beprobenden Feststoff im Korngrößenbereich eingrenzt und bestimmte Strömungscharakteristiken voraussetzt. Unter diesen einschränkenden Bedingungen kann eine mittlere Suspensionsgeschwindigkeit mit Hilfe von Tracern experimentell ermittelt werden, so daß unter der Annahme eines schlupffreien Transportes eine Bohrkleinzuordnung zur Teufe erfolgen kann.

Die Unsicherheiten einer derartigen Vorgehensweise liegen in den Einschränkungen des ausgewählten Korngrößenbereiches, der Vernachlässigung der Sedimentation infolge Korngröße und Dichte sowie der Korngrößen- und Kornformveränderung über die Transportweglänge. Zudem gilt die getracerte Geschwindigkeit nur für die aktuelle Situation. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß in dieser Arbeitsweise sofort begonnen werden kann und keine intensiven Vorstudien in Form experimenteller und theoretischer Untersuchungen erforderlich sind.

6.2 Nachbesserungsvorschläge

Im Rahmen des Erwerbs ergänzender Daten und der Durchführung vollständiger systematischer Untersuchungen wären nachfolgende betriebliche, experimentelle und theoretische Arbeiten durchzuführen.

6.2.1 Betriebliche Untersuchungen

Das Literaturstudium und die ersten betrieblichen Cuttings-Untersuchungen haben gezeigt, daß eine systematische Fortführung der Vorversuche an laufenden Tiefbohrungen erfolgsversprechend ist. Das Untersuchungsziel wäre hierbei nicht der optimale Bohrkleinaustrag, sondern das Verhalten der Cuttings auf dem Weg zur Tagesoberfläche. Es wären in erster Linie die Korngrößenverteilungen, die Kornform sowie die Änderungen über die Aufstiegszeit zu klären. Das Probenmaterial ist in Beziehung zu setzen zur Teufe, der Formation, der Bohrstrangausrüstung, des Bohrwerkzeuges und der Spülung. Die Möglichkeit des Erwerbs umfangreichen Datenmaterials ließe eine statistisch gesicherte Aussage zu, die auch zu einer Verbesserung des Rechenansatzes führen würde. Zudem wären anhand zusätzlicher betrieblicher Untersuchungen ein On-Stream Probenahmesystem zu entwickeln, in dem Beprobung, Auswertung und Ergebniseinspeisung in das Rechenmodell integriert sind. Hierzu wären die einzelnen Möglichkeiten der kontinuierlichen Entnahme repräsentativer Proben aus dem laufenden Spülstrom abzuwägen und Vorschläge für die laufende Analyse von Kornform und Korngrößenverteilung sowie für Meß-Komponenten zu unterbreiten. Die Ergebnisse würden in das Simulationsmodell eingegeben und als interaktiver Programmteil zu einer ständigen Verbesserung der Eingabeparameter führen. Dies setzt naturgemäß korrekte theoretische Ansätze in den Einzelblöcken

des Struktogrammes voraus. Es obliegt den theoretischen Untersuchungen, inwieweit es gelingt, ein derartiges interaktives Modell zu entwerfen, in das die Ergebnisse aus den Online-Spülungsuntersuchungen für Programmverbesserung kontinuierlich eingegeben werden können.

In den Bereich der betrieblichen Untersuchungen fällt auch die direkte meßtechnische Überprüfung der Auftriebsgeschwindigkeit von Cuttings durch ein verbessertes Tracerverfahren auf der Basis radioaktiver Feststoffpartikel und -Strahlen-Detektoren, die den im Ringraum aufsteigenden Feststoff im Bohrstranginneren begleiten. Dies wäre an normalen Tiefbohrungen und/oder der KTB-Vorbohrung zu praktizieren.

6.2.2 Experimentelle Untersuchungen

Parallel zu den betrieblichen Untersuchungen sind experimentelle Arbeiten durchzuführen, um eine Reihe von Parametern, die sich aufgrund der Einflußgrößen-Untersuchung als besonders wichtig herausgestellt haben, zu erforschen. An erster Stelle stehen auch hier die Korngrößenverteilung, die Kornform und die Veränderung derselben über eine bestimmte Förderdauer. Die Versuche sind im Maßstab 1:1 auszuführen und haben gegenüber den betrieblichen Arbeiten den Vorteil einer Systematisierung und beliebigen Veränderbarkeit, während im Betrieb dem Bohrfortschritt alle anderen Aktivitäten unterzuordnen sind. Die Betrachtungen der Transportveränderungen über den Weg bzw. der Zeit sind im Betrieb ohnehin nur unter sehr hohem Aufwand durchzuführen. Ähnliches gilt für die zum gleichen Fragenkomplex zählende Schlupfgeschwindigkeit sowie für den Einsatz dichteunterschiedlichen Bohrkleins. In diesen Bereich fällt außerdem das Phänomen einer unregelmäßigen Bohrlochwandung. Das strömungsmechanische Verhalten von Bohrklein in Auswaschungen der Bohrlochwand kann ohnehin nur im Experiment beobachtet und systematisch untersucht werden.

Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen konzentriert sich auf die folgenden, ineinander verzahnten Bereiche und ist durch betriebliche Untersuchungen insbesondere im Hinblick auf Korngrößenverteilungen zu ergänzen:

1. Strömungsmechanisches Verhalten von Bohrklein als Kollektive von Feststoffpartikeln bestimmter Korngrößenzusammensetzung und unterschiedlicher Dichten
2. Gutwolkenverhalten insbesondere im Hinblick auf Sedimentation
3. Korngrößen und Kornformveränderung über die Teufe
4. Unregelmäßiger Bohrlochwandeeinfluß auf den Bohrkleinaustrag.

Die Untersuchungen wären mit künstlichem und natürlichem Fördergut als Ein- und Mehrkorngemische sowie mit natürlichem Cuttingmaterial durchzuführen.

6.2.3 Theoretische Untersuchungen

Die betrieblichen und experimentellen Untersuchungen haben das alleinige Ziel, das Strömungsverhalten des Bohrkleins beim Austrag zu klären und Daten für die Verbesserung des mathematischen Ansatzes im Bohrkleinaustragsmodell zu liefern. Das Simulationsmodell könnte während der KTB-Vorbohrung auf seine Güte hin getestet und im Rahmen der Hauptbohrung eingesetzt werden. Es würde im Online-Verfahren mit aktuellen Meßdaten aus der umlaufenden Spülung versehen, um den Korrelationsgrad der Cuttings zur Teufe zu erhöhen. Der vorliegende Programmansatz müßte für diesen Aufgabenbereich erweitert, verbessert und auf seine Güte hin überprüft werden. Eine derartige Güteüberprüfung ließe sich günstigerweise an einer Bohrung durchführen, die ein bekanntes Formationsprofil durchteuft. Hierzu böte sich in idealer Weise der erste, der Vorbohrung parallel laufende Teufenabschnitt der KTB-Hauptbohrung an.

Der zusammenfassende Vorschlag konzentriert sich auf die Untersuchung des strömungsmechanischen Verhaltens der Cuttings im Experiment und im Betrieb, um den vorliegenden Rechenmodellansatz zu einem Simulationsmodell zu erweitern. Das Simulationsmodell soll im Online-Analyseverfahren mit aktuellem Datenmaterial gespeist werden, um eine gesicherte Cuttings-Teufen-Korrelation als Ergebnis zu erhalten.

LITERATURVERZEICHNIS:

- ADAM, J.** Die Konzentrationsverteilung heterogener Suspensionen beim hydraulischen Transport durch horizontale Rohrleitungen
Dissertation, TH Karlsruhe, 1968
- BECKER, H.A.** The effects of shape and Reynolds number on drag in the motion of a freely oriented body in an infinite fluid
Can.J.Chem.Eng., April 1959, S. 85-91
- BRADLEY, W.** Experimental determination of casing wear by drill string rotation
ASME-PAP, Paper-Nr.: 74-Pet-51, 1974, S. 1-9
- CHIEN, SZE-FOO** Annular velocity for rotary drilling operations
Int.J.Rock Mech.Min.Sci., Vol. 9, 1972, S. 403-416
- GELLER, F.J.** The behavior of hydraulic conveyed solids of highly different properties in vertical pipelines
Intern. symposium of slurry flows, N.Y. American Society of Mechanical Engineers, Dec. 1986, S. 103-108

GRODDE, K.-H. Beiträge zur Rheologie disperser Systeme
Erdöl und Kohle 6, 1953, H. 7, S. 380-385; H. 9, S. 457-459; H. 10,
S. 608-613

GRODDE, K.-H. Rheologie Kolloider Suspensionen, insbesondere der
Bohrspülungen
Erdöl und Kohle 13, 1960, H. 1, S. 11-18, H. 2, S. 79-83

MITSUISHI, N. u. AOYAGI, Y. Non-Newtonian Fluid Flow in an Excentric
Annulus
Jnl.Chem.Eng. Japan, 6, 1973, S. 402-408

MOORE, P.L. Drilling Practices Manual
Petroleum Publ. Co., 1974

N.N. Drilling mud and cement slurry rheology manual
Gulf Publ.Co., Editions Technip
Paris, 1982

PIGOTT, R.J.S. Mud Flow in Drilling
Drill. and Prod. Practice, API, 1941, S. 91-103

RABIA, H. Oil Well Drilling Engineering Principles and Practice
Graham u. Trotman, London, 1985

SAMPLE, K.S. u. BOURGOYNE, A.T. Development of Improved Laboratory
and Field Procedures for Determining the Carrying Capacity of
Drilling Fluids
SPE Paper 74 97, 1987

SAMPLE, K.S. u. BOURGOYNE, A.T. An Experimental Evaluation of
Correlations used for Predicting Cutting Slip Velocity
SPE Paper 66 45, 1977

SAVINS, J.G. Generalized Newtonian (Pseudoplastic) Flow in Stationary
Pipes and Annuli
Pet.Trans. AIME 213, 1958

SIFFERMAN, TH.R. u.a. Drilling-Cuttings Transport in Full-Scale Vertical
Annuli
Jnl. Petr.Techn., Nov. 1974, S. 1295-1302

- SIFFERMAN, TH.R.** Capacity of Drilling Fluids
Energy Sources v 7 n 1, 1983, ISSN 0090-08312
- THOMAS, R.P.** Drill Pipe Eccentricity Effect on Drilled Cuttings Behavior
MS Thesis, Univ. Tulsa, Tulsa, OK, 1978
- THOMAS, R.P. u.a.** Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings
behavior in vertical wellbores
Jnl.Petr.Technol. 34, Sept. 1982, S. 1929-1937
- TOMREN, P.H.** The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric
Annulus
MS Thesis, Univ. Tulsa, Tulsa, OK, 1979
- TOMREN, P.H. u.a.** An experimental study of cuttings transport in
directional wells
Soc.Petr.Engng. AIME, Oct. 1983, Paper SPE 12123, S. 22
- WALKER, R.E. u. MAYES, T.M.** Design of muds for carrying capacity
Jnl.Petr.Techn., July 1975, S. 893-900
- WALKER, R.E. u. KORRY, D.E.** Field Method of Evaluating Annular
Performance of Drilling Fluids
Jnl. Petr. Techn., Febr. 1974, S. 167-173
- WASP, E.J. u.a.** Solid-Liquid Flow-Slurry Pipeline Transportation
Trans.Techn.Public., Clausthal, 1977
- WILLIAMS, C.E. u. BRUCE, C.H.** Carrying capacity of drilling muds
Petroleum Transactions, AIME
Vol. 192, 1951, S. 111-120
- ZANGEMEISTER, C.** Nutzwertanalyse in der Systemtechnik
Wittmannsche Buchhandlung, München, 1973
- ZEIDLER, H.U.** An Experimental Analysis of the Transport of Drilled
Particles
Soc.Petr.Eng.Jnl. 12, 1972, S. 39-48