

2.4 **ENGESER, B., UJMA, K.H. : Spülungssysteme in der Vor- und Hauptbohrung**

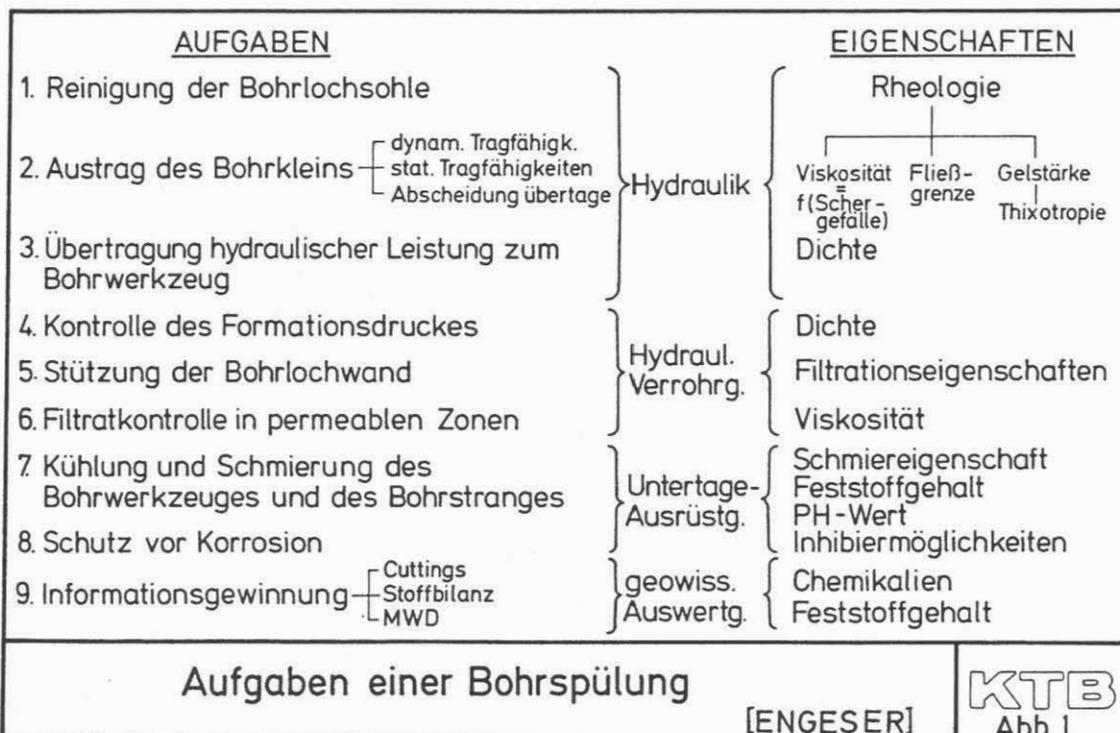
2.4.1 **Einleitung**

Während Bohrungen zum Erschließen von Erdöl- und Erdgaslagerstätten durch die Zielsetzung, den Trägerhorizont möglichst sicher und kostengünstig zu erreichen, charakterisiert sind, steht bei wissenschaftlichen Forschungsbohrungen die umfassende Informationsgewinnung über das durchteufte Gebirge im Vordergrund. Die Spülung als Austragsmedium des erbohrten Gesteinsmaterials sowie der ins Bohrloch eintretenden Fluide und Gase ist neben Bohrlochmessungen, Kernentnahmen und Zuflußtesten ein wichtiger Informationsträger. Die Auswertung dieser Informationen und der Vorstoß in extreme Teufenbereiche hat besondere Anforderungen an die Spülungskonzeption zur Folge.

Ausgehend von den besonderen bohrtechnischen und geologischen Bedingungen sollen Spülungssysteme für Vor- und Hauptbohrung vorgestellt und Entwicklungsschwerpunkte aufgezeigt werden.

2.4.2 **Aufgaben einer Bohrspülung**

Unabhängig von der eingesetzten Technik muß eine Bohrspülung eine Reihe von grundlegenden Funktionen erfüllen, um das bohrtechnische Ziel sicher zu erreichen. Je nach geologischen Bedingungen, Zielsetzung und angewandter Technik haben die einzelnen Funktionen unterschiedliche Priorität (Abb. 1).



Prinzipielle Aufgabe einer Bohrspülung ist der effiziente Austrag des Bohrkleins, der hauptsächlich von den rheologischen Eigenschaften abhängt. Nicht weniger wichtig sind auch die unter dem Begriff "hydraulische Verrohrung" zusammengefaßten Aufgaben, wie die Kontrolle des Formationsdruckes und die Stützung der Bohrlochwand. Mit zunehmender Teufe gewinnen die Fragen der Kühlung und Schmierung sowie des Korrosionsschutzes immer mehr an Bedeutung. Nicht zuletzt nimmt die Spülung als Informationsträger, wie bereits einleitend angesprochen, in einer Forschungsbohrung eine zentrale Rolle ein.

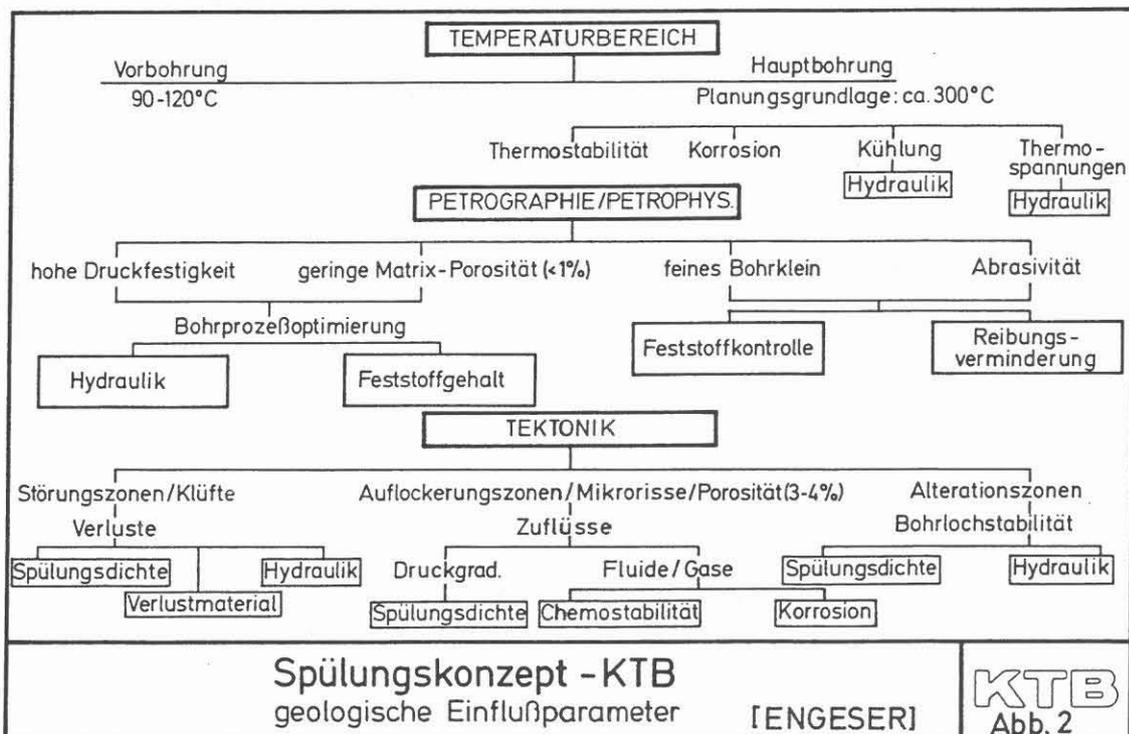
Die Stabilität eines Spülungssystems bei den im Bohrloch vorherrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen ist eine wichtige Voraussetzung für die Erfüllung dieser Aufgaben. Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen ist bei der Planung einer Spülungskonzeption auch auf Umweltverträglichkeit und Kostengünstigkeit zu achten.

Die angemessene Berücksichtigung der teilweise gegensätzlichen Anforderungen stellt ein Optimierungsproblem dar, das für jede Bohrung individuell gelöst werden muß und unterschiedliche Spülungskonzepte für Vor- und Hauptbohrung zur Folge hat.

2.4.3 Spülungskonzept - Vorbohrung

2.4.3.1 Spezielle Anforderungen

Zielsetzung und Bohrtechnik der Vorbohrung wurden bereits im technischen Konzept des KTB erläutert. Besondere Planungskriterien aufgrund der geologischen Einflußparameter ergeben sich durch (Abb. 2):



- Die petrophysikalischen Eigenschaften der kristallinen Gesteine mit besonderen Anforderungen an die:
 - Bohrprozeßoptimierung (Hydraulik),
 - Feststoffkontrolle (feines Bohrklein),
 - Reibungsverminderung (hohe Abrasivität).

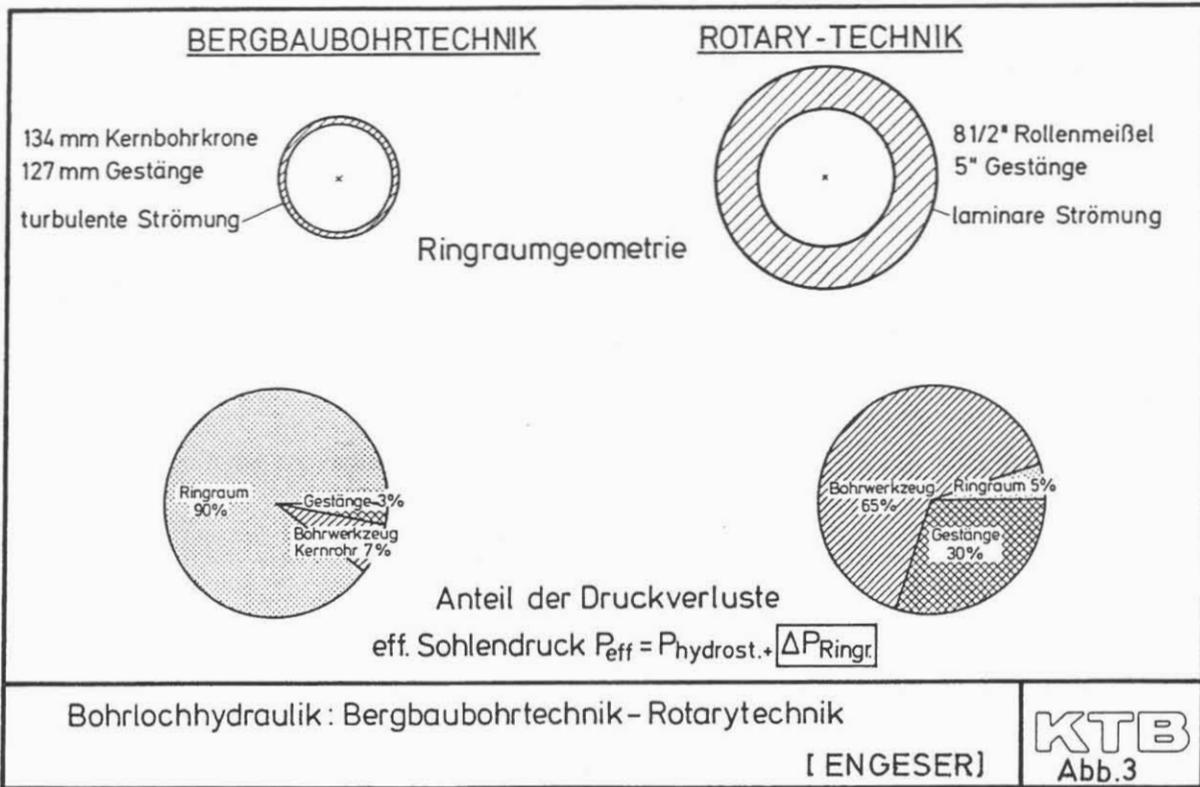
- Kluft oder Störungszonen als potentielle Verlustzonen. Von Bedeutung sind:
 - Spüldichte,
 - Bohrlochhydraulik.

- Alterationszonen oder mylonitisierte Bereiche als Problemzonen für die Bohrlochstabilität mit Auswirkungen auf Spüldichte und Hydraulik.

Neben den geologischen Einflußparametern sind die spezifischen Anforderungen durch den voraussichtlichen Einsatz der Bergbaubohrtechnik zu berücksichtigen. Besonders betroffen sind hierbei die Fragen der Bohrlochhydraulik und der Reibungsverminderung.

2.4.3.2 Bohrlochhydraulik

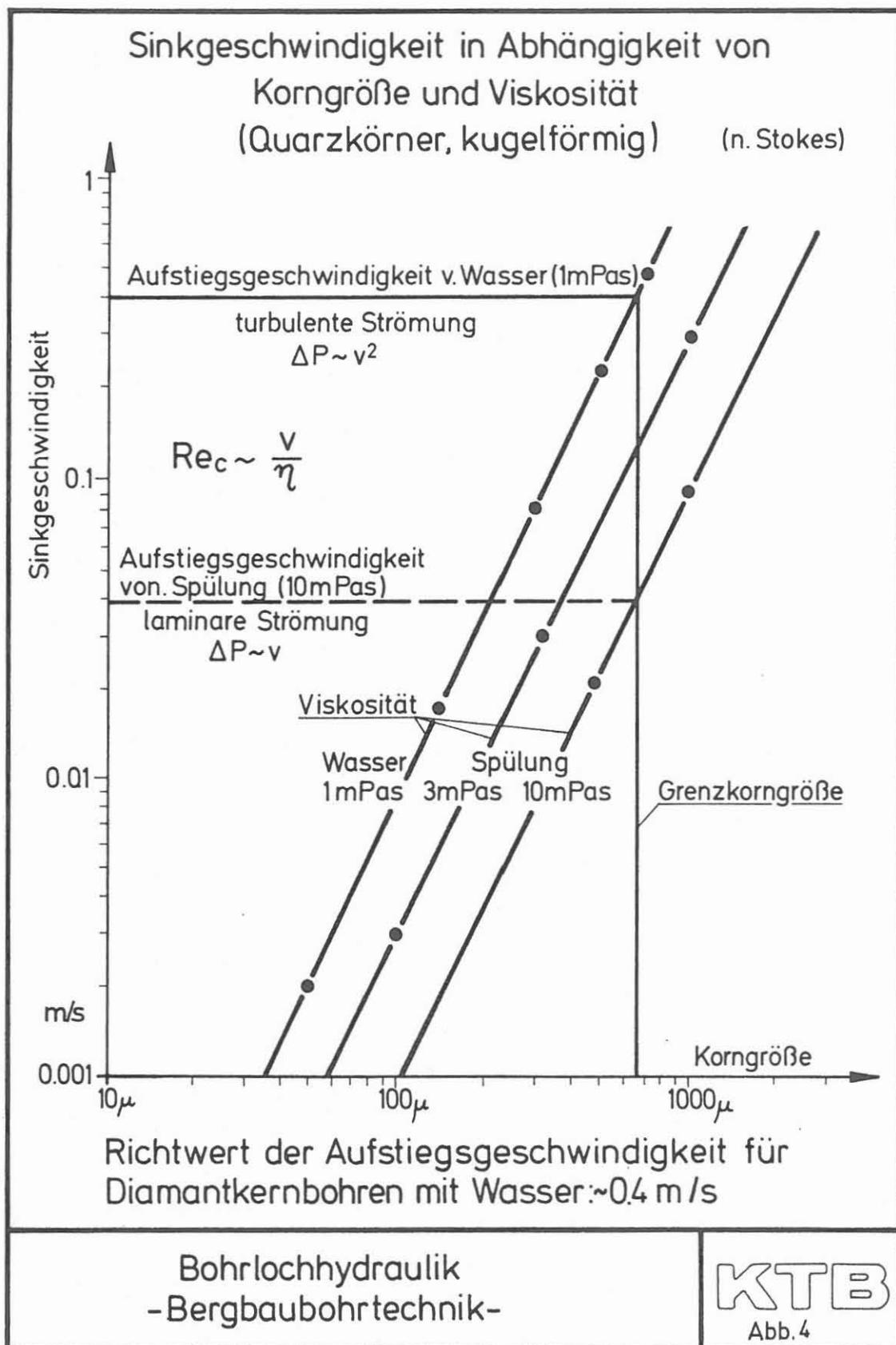
Durch die engen Ringraum-Querschnitte beträgt der Anteil der Ringraumdruckverluste am Gesamtdruckverlust in der Bergbaubohrtechnik 90 % und mehr, während es beim Rotarybohren kaum mehr als 5 % sind. Die Ringraumdruckverluste machen sich als zusätzlicher Differenzdruck auf der Bohrlochsohle bemerkbar. Dies kann in permeablem oder klüftigem Gebirge zu Spüldichteverlusten führen und beim Überschreiten des Fracgradienten sogar ein hydraulisches Aufbrechen des Gebirges hervorrufen (Abb. 3).



T1034 / 9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Für einen effektiven Bohrkleinaustrag ist, abhängig von der Sinkgeschwindigkeit des Bohrkleins, eine Mindestaufstiegsgeschwindigkeit der Spülung im Ringraum notwendig, die bei gegebenem Ringraumquerschnitt die Mindestzirkulationsrate bestimmt (Abb. 4). Besonderen Einfluß auf die Sinkgeschwindigkeit hat neben der Korngröße und der Dichte des Bohrkleins die Viskosität der Spülung. Bei Einsatz eines viskosen Spülmediums ist bei gleicher Korngröße eine deutlich verringerte Aufstiegsgeschwindigkeit im Vergleich zu Wasser notwendig. Die geringere Mindestzirkulationsrate und die Änderung der Strömungsverhältnisse von turbulent auf laminar macht letztlich auch eine Verringerung der Ringraumdruckverluste möglich.



2.4.3.3 Spülungssysteme

2.4.3.3.1 Wasser

Unter den entsprechenden Voraussetzungen ist Wasser in der Bergbaubohrtechnik ein häufig eingesetztes Spülmedium mit geringer Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Auswertung.

Hauptnachteil von reinem Wasser sind die schlechten Austragsfähigkeiten, die, wie aufgezeigt, höhere Zirkulationsraten erforderlich machen. Die daraus resultierenden überproportionalen Ringraumdruckverluste können in Verbindung mit der fehlenden Filtratkontrolle bereits in gering permeablem Gebirge Spülungsverlustprobleme verursachen.

Besonders deutlich zeigen sich diese Probleme in den Erfahrungen der mit Bergbaubohrtechnik und reinem Wasser als Spülmedium abgeteufte Bohrungen der NAGRA (Abb. 5). In der Bohrung Kaisten kam es sofort nach der Umstellung des Spülungssystems auf deionisiertes Wasser zu schleichenden Spülungsverlusten, die sich bis zum Erreichen der Endteufe auf kumulativ fast $4\ 000\ \text{m}^3$ summierten. Zwei Fangarbeiten und ständige Hydraulik-Probleme waren die Folge. Die hohen Verluste lassen auch aus geowissenschaftlicher Sicht die Zweckmäßigkeit von reinem Wasser fraglich erscheinen, da sehr große zusätzliche Fördervolumen zur Bohrlochreinigung notwendig werden, um repräsentative Proben von Formationsflüssigkeiten zu gewinnen. Nach den Empfehlungen der NAGRA würde das zur Bohrlochreinigung zusätzlich notwendige Fördervolumen, setzt man die durchschnittlichen Verluste der Bohrung Kaisten ein, mindestens $16\ \text{m}^3/\text{m}$ Teststrecke betragen.

Reines Wasser ist daher nur bei nicht geklüftetem impermeablem Gebirge im oberen Teufenbereich eine sinnvolle Alternative. In größeren Tiefen müssen allein schon aus Gründen der Reibungsverluste und des Verschleißes reibungsvermindernde Additive zugesetzt werden.

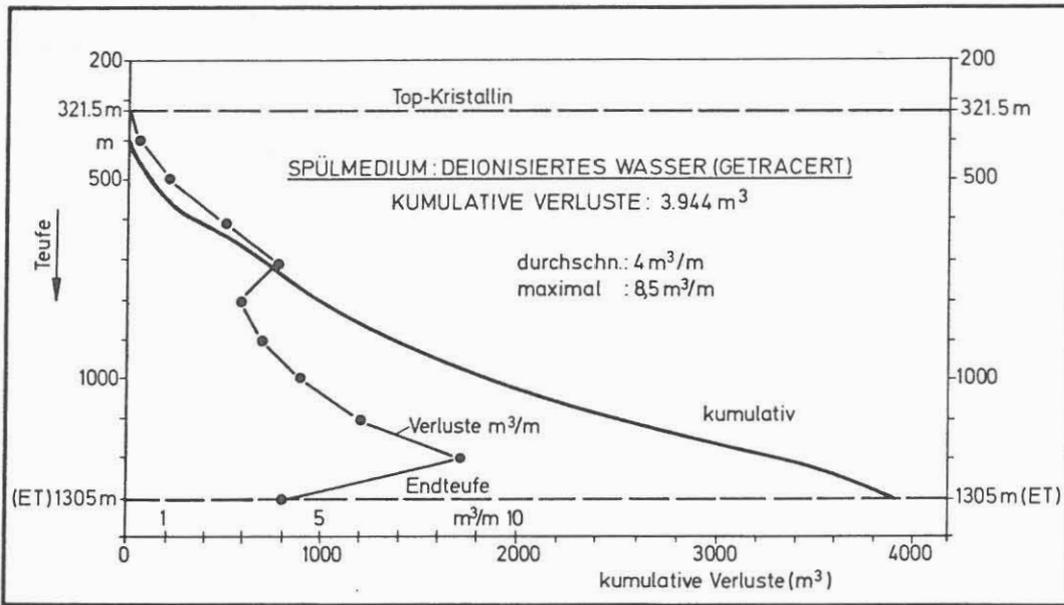
2.4.3.3.2 Wasserbasierte Polymerspülungen

Wie bereits erwähnt, kann die Austragsfähigkeit von Wasser durch Erhöhung der Viskosität verbessert werden. Konventionell werden zu diesem Zweck ton-wasser-basierte Spülungen eingesetzt, die zusätzlich in permeablem Gebirge auch noch eine gute Filtratkontrolle gewährleisten.

Der Einsatz solcher Spülungssysteme sollte aber wegen der starken Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Untersuchungen vermieden werden. Eine Alternative bildet der Einsatz von feststofffreien Polymer-Lösungen, die sich bereits seit vielen Jahren als trägerschonende Workover-Flüssigkeiten in Erdöl- und Erdgasbohrungen bewährt haben. Hervorzuheben sind hier die Biopolymere, die durch das ausgeprägt pseudoplastische Fließverhalten den

bohrtechnischen Anforderungen besonders entgegenkommen.

Da einige Produkte auch gute Schmiereigenschaften zeigen, scheint bei gezielter Auswahl für die Vorbohrung ein Einkomponentensystem möglich, das auch aus geowissenschaftlicher Sicht einen vernünftigen Kompromiß darstellen könnte.



Spülungsverluste im Kristallin der Bohrung Kaisten
-Bergbaubohrtechnik: Seilkernsystem CHD 134 - [Nagra NTB 86-09] **KTB Abb.5**

T1025/9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

SPÜLMEDIUM	Notwendiges Fördervolumen zur Bohrlochreinigung (1% Kontamination) ohne Verluste		Zusätzliches Fördervolumen bei Spülungsverlusten	
	Teststrecken Volumina	6"-Bohrloch m ³ /m Teststr.	Reinigungsfak. R x verl. Vol.	Reinigungs-Volumen m ³ /m
Deionisiertes Wasser ^x	5-10	0.1-0.2	3-4	16
Grundwasser	10-20	0.2-0.4	4-8	
Polymer Spülung ^o	?	?	10 ?	4
Ton-Süßwasser	30-70	0.6-1.4	5-10	

^xVerluste in der Bohrung Kaisten: durchschnittl: 4 m³/m
maximal : 8,5 m³/m

^oVerluste für Polymerspülung angenommen: 0.4 m³/m (Viskosität: 10 mPas)

Zur Gewinnung repräsentativer Proben notwendiges Fördervolumen in Abhängigkeit von Spülmedium und Verlusten [n.Nagra NTB 85/07] **KTB Abb.6**

T1049/9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

2.4.4 Spülungskonzept - Hauptbohrung

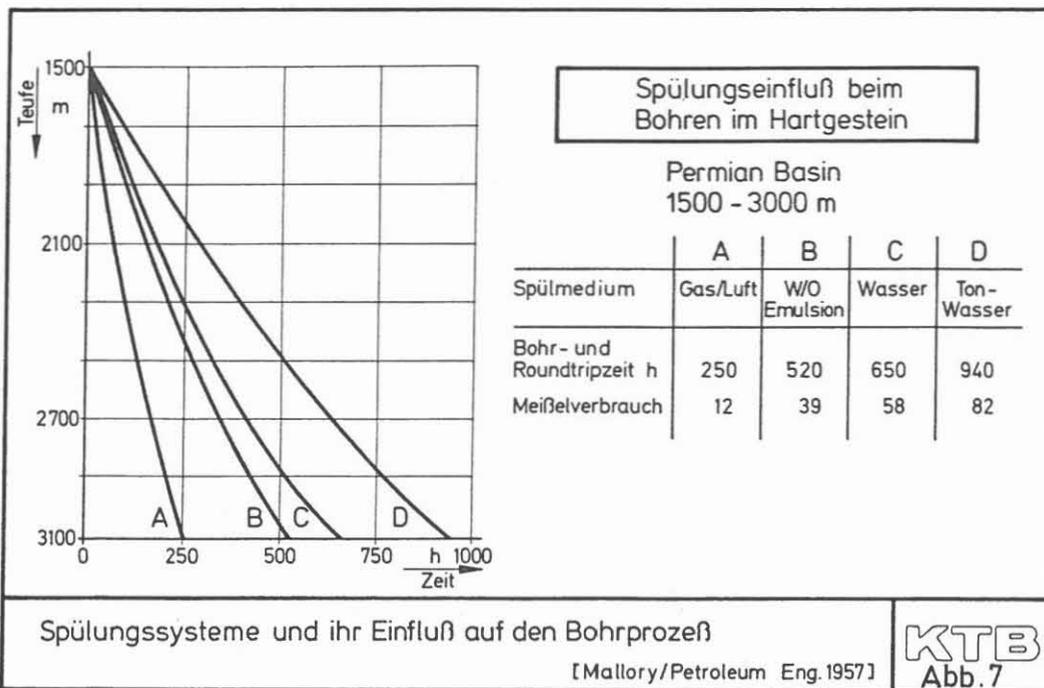
2.4.4.1 Bohrtechnische Überlegungen

Limitierender Faktor für das Spülungskonzept der Hauptbohrung ist eindeutig die in Zielteufe zu erwartende Temperatur und die damit verknüpften Probleme der Thermostabilität von Spülungssystemen (s. Abb. 2).

Daneben ist die Möglichkeit von Zuflüssen überhydrostatischer Fluide und Gase in der als Auflockerungszone interpretierten Niedergeschwindigkeitszone in der Planung eines Spülungskonzeptes zu beachten. Durch die vielfach größere zu zerstörende Gesteinsfläche beim Vollbohren in Verbindung mit den hohen Gesteinsdruckfestigkeiten haben die spülungstechnischen Möglichkeiten der Bohrprozeßoptimierung hohe Priorität.

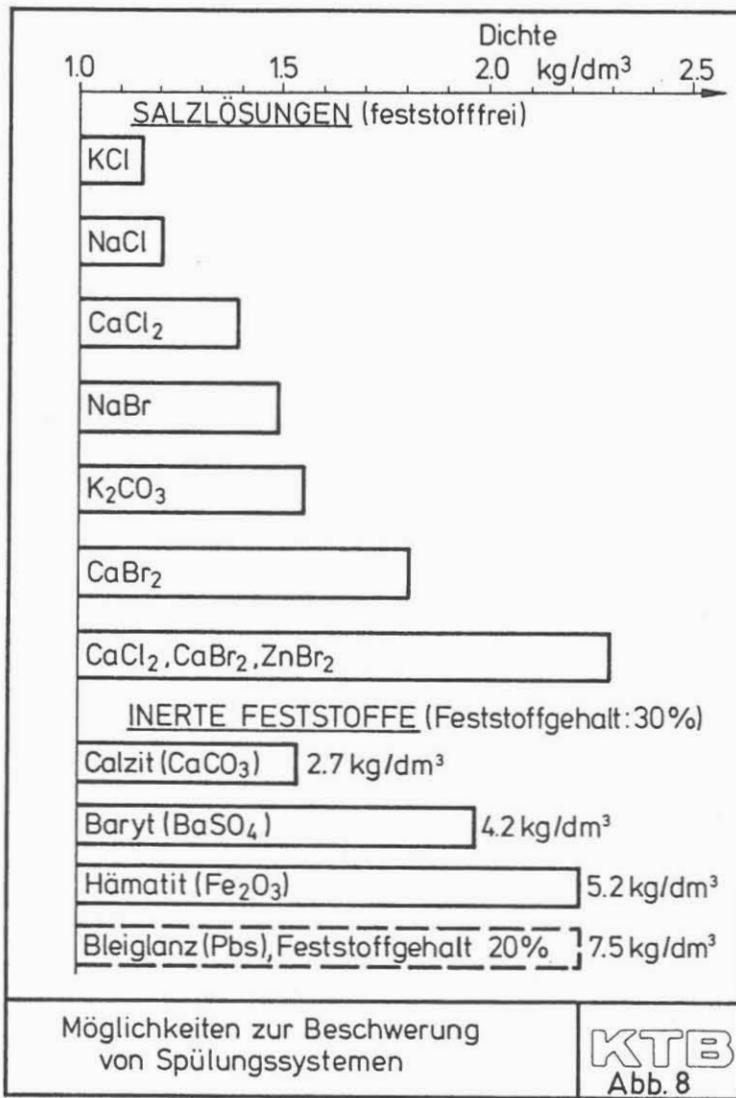
2.4.4.1.1 Feststoffgehalt/Dichte

Seit langem ist bekannt, daß die Effizienz des Bohrprozesses gerade beim Bohren im Hartgestein durch den Einsatz einer geeigneten Spülung ganz entscheidend gesteigert werden kann. Die Spülung hat dabei nicht nur auf den reinen Bohrprozeß, sondern auch auf die Standzeit der Werkzeuge großen Einfluß (Abb. 7).



Das Bohren mit Luft brachte im dargestellten Beispiel eine Reduktion der gesamten Bohr- und Roundtripzeit um fast 75 % im Vergleich zur tonwasserbasierten Spülung.

Wie bereits für die Vorbohrung aufgezeigt, sind allerdings reines Wasser ebenso wie gasförmige Spülmedien oder Schaumspülungen in ihren Einsatzmöglichkeiten beschränkt. Alternativ sind daher möglichst leichte, feststofffreie oder feststoffarme Spülungen anzustreben. Dies macht voraussichtlich unkonventionelle Maßnahmen zur Feststoffkontrolle notwendig, um auch noch Feinstfeststoffe im γ -Bereich wirksam abtrennen zu können. Das Auftreten von überhydrostatischen Druckgradienten macht möglicherweise höhere Spüldichten erforderlich. Im Interesse eines möglichst niedrigen Feststoffgehaltes sollten zunächst die Möglichkeiten der Beschwerung durch Salzlösungen ausgeschöpft werden (Abb. 8).



Zu prüfen sind:

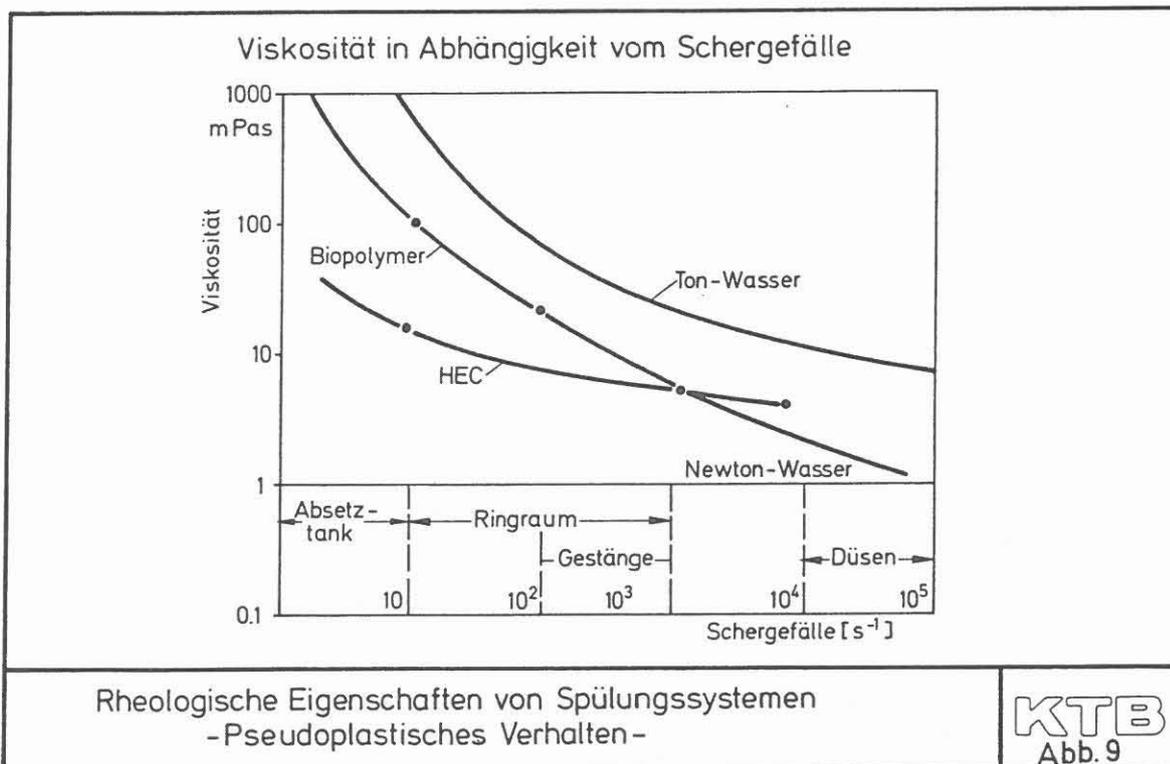
- Toxizität/Umweltverträglichkeit,
- Korrosion,
- Scaling,
- Beeinträchtigung des geowissenschaftlichen Meßprogrammes,
- Kosten.

Sind inerte Feststoffe zur Beschwerung erforderlich, ist die entsprechende Tragfähigkeit der Spülung zu gewährleisten, um ein Absedimentieren zu verhindern.

2.4.4.1.2 Hydraulik

Seit langem ist bekannt, daß ohne eine sofortige und ausreichende Reinigung der Bohrlochsohle durch die Spülung die Arbeit des Bohrwerkzeuges höchst unwirksam bleibt. Die Optimierung der Bohrlochhydraulik ist daher ein wichtiges Instrument zur Effizienzsteigerung des Bohrprozesses.

Wichtiger Einflußfaktor ist das Fließverhalten der Spülung in den bohrtechnisch interessanten Schergefällebereichen (Abb. 9). Während reines Wasser als Newton'sche Flüssigkeit durch die geringe Viskosität in den Meißeldüsen gute Sohlenreinigung bringt, ergeben sich durch die konstant geringe Viskosität im Ringraum schlechte Austragseigenschaften.



Ton-Wasserspülungen besitzen gute Austrageigenschaften, haben aber durch den Feststoffgehalt auch im höchsten Schergefällebereich in den Meißeldüsen eine nicht unterschreitbare Grenzviskosität. Feststofffreie Biopolymerlösungen besitzen die Vorteile beider Systeme: Gute Austrageigenschaften bei geringer Viskosität in den Meißeldüsen.

Für übertiefe und heiße Bohrungen muß die Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften von Temperatur und Druck in die Berechnung der Bohrlochhydraulik mit einbezogen werden. Ebenso ist der Einfluß der in der Abkühlungszone induzierten Zugspannungen auf die Bohrlochstabilität sowie die Fragen der gezielten Kühlung des Bohrloches durch die Spülungszirkulation vor oder während Bohrlochmessungen in einem Gesamtkonzept der Hydraulik-Optimierung zu berücksichtigen.

2.4.4.1.3 Korrosion/Reibungsverminderung

Wie die Erfahrungen aus Geothermie-Bohrungen zeigen, muß bei Zuflüssen von korrosiven Fluiden oder Gasen unter hohen Temperaturen mit extremen Korrosionsraten gerechnet werden.

Mögliche spülungstechnische Schutzmaßnahmen sind:

- Einsatz von Öl oder Emulsionsspülungen,
- Einsatz von O₂-Scavengern,
- pH-Wert-Erhöhung,
- "schutzfilmbildende" Additive.

Schmierfähigkeit und Reibungsverminderung zwischen Gebirge und Bohrstrang sind in tiefen Bohrungen im kristallinen Gebirge eine wichtige Spülungseigenschaft. Durch die temperaturbedingten Einsatzgrenzen der meisten Untertageantriebe ist die Minderung der Reibungsverlustrate gerade im ultratiefen Bereich von hoher Priorität. Möglichkeiten zur Reibungsverminderung sind:

- organische Additive wie Fettsäuregemische,
- Einsatz von Ölspülungen.

Für den Einsatz unter Hochtemperaturbedingungen ist die Wirksamkeit von alternativen, mechanischen Reibungsverminderern wie Glas- oder Keramikugeln zu prüfen.

2.4.4.2 Geowissenschaftliche Anforderungen

Wie bereits einleitend erwähnt, hat die geowissenschaftliche Zielsetzung einer Forschungsbohrung bedeutenden Einfluß auf die Planung der Spülungskonzeption. Vor allem im unteren Teufenbereich hat die Nutzung der in der Spülung enthaltenen Information besondere Priorität, da Bohrlochmessungen,

Kerngewinnung oder Zuflußteste durch die hohen Temperaturen zunehmend limitiert sind.

Wichtige Planungskriterien sind daher:

- Sorgfältige Auswahl der Spülungschemikalien und Beschränkung auf die technisch unbedingt notwendigen Additive,
- Einsatz einer möglichst feststofffreien Spülung um Mehrfachumläufe von Bohrklein zu verhindern und die teufengerechte Zuordnung des Bohrkleins zu erleichtern,
- Bilanzierung des ein- und auslaufenden Spülungsstroms, um Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften zu erkennen.

Besonders wichtig ist auch die teufengerechte Zuordnung der ausgewerteten Informationen, die eine mathematische Modellierung des Austragsprozesses von Bohrklein sowie Fluiden und Gasen erforderlich macht.

2.4.4.3 Spülungssysteme - Hauptbohrung

Die unterschiedlichen Anforderungen an die Thermostabilität machen eine Zerteilung des Spülungskonzeptes in der Hauptbohrung notwendig.

2.4.4.3.1 Teufenbereich bis ca. 5 000 m

In diesem Teufenbereich können die bereits für die Vorbohrung vorgestellten tonfreien Polymer-Spülungen zum Einsatz kommen. Alternativ könnten hier auch gasförmige Spülmedien (Luft) angewendet werden.

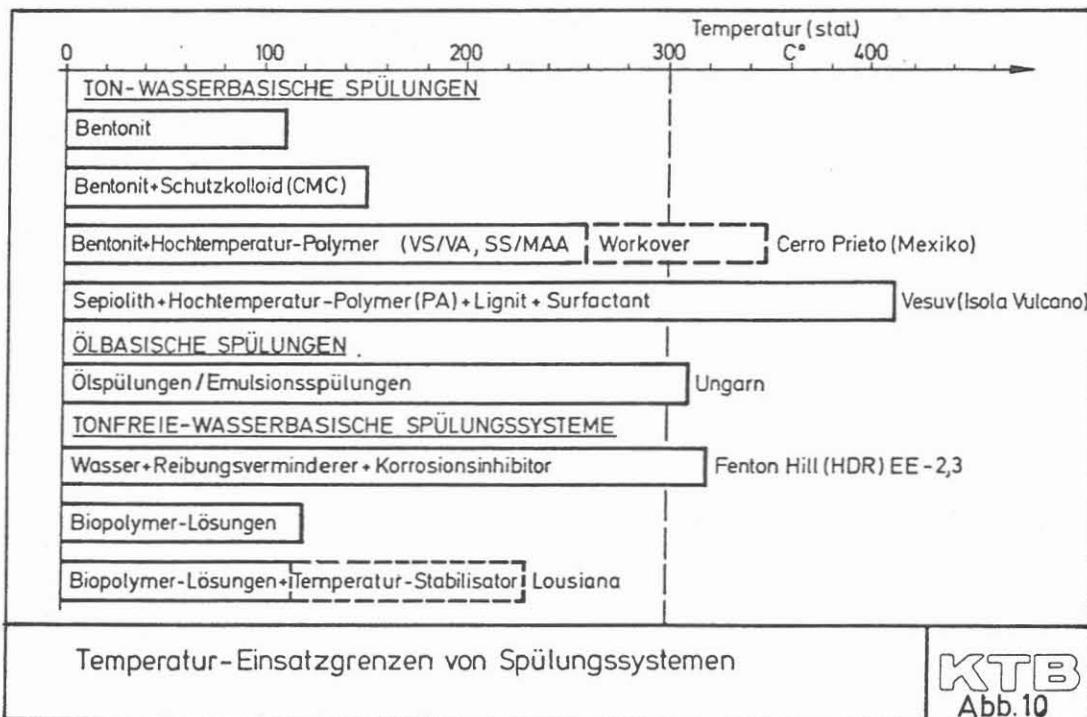
Allerdings ist der mögliche Einsatz durch eine Reihe von Einschränkungen limitiert:

- Teufenbegrenzung bis 5 000 m,
- sehr feines Bohrklein,
- anspruchsvolle Feststoffkontrolle,
- Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Auswertung durch das äußerst feine Bohrklein,
- schwierige Bohrlochkontrolle bei überhydrostatischen Druckgradienten,
- starker Verschleiß und bei Einsatz von Luft hohe Korrosion (Alternative: N₂)
- schwierige Beherrschung von Wasserzuflüssen.

2.4.4.3.2 Hochtemperaturstabile Spülungen

Wichtigste Anforderung an ein Spülungssystem für den tiefen Teil der Hauptbohrung ist die Thermostabilität in Verbindung mit Elektrolytbeständigkeit. Entscheidend ist hierbei die Stabilität der rheologischen Eigenschaften, während die Begrenzung des Filtratverlustes durch das überwiegend impermeable kristalline Gebirge nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Während konventionelle Bentonit-Spülungen durch die Anwendung von markt-gängigen Hochtemperatur-Polymeren bis max. 250 °C einsetzbar sind, wurden speziell für den Geothermie-Einsatz entwickelte Hochtemperatur-Spülungen mit dem temperaturstabileren Sepiolith-Ton bereits bis Temperaturen von 300 °C eingesetzt (Abb. 10).



1001/986

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Ton-bedingte Nachteile dieser Spülungen sind:

- schwierige Feststoffkontrolle,
- Schutzkolloide und Verflüssiger notwendig,
- geowissenschaftliche Beeinträchtigung,
- geringerer Bohrfortschritt.

Konventionelle Ölspülungen bieten zwar neben guter Temperaturstabilität auch ausgezeichnete Schmiereigenschaften und guten Korrosionsschutz; die Einsatzmöglichkeiten sind allerdings beschränkt durch:

- Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Interpretation,
- schwierige Feststoffkontrolle und Entsorgung,
- beträchtliche Löslichkeit von Gasen unter hohem Druck,
- Umweltbeeinträchtigung.

2.4.5 Entwicklungsschwerpunkte

Für die Entwicklung eines hochtemperaturstabilen Spülungssystems, das den bohrtechnischen und geowissenschaftlichen Anforderungen weitgehend entgegenkommt, zeichnen sich daher folgende Möglichkeiten ab:

- Anhebung der Temperatureinsatzgrenzen von Biopolymeren,
- gezielte Modifikation bekannter Hochtemperaturpolymere in Richtung auf zufriedenstellende rheologische Eigenschaften für den Einsatz in tonfreien Systemen,
- Entwicklung von ölbasischen Spülungen mit geowissenschaftlich verträglichem sowie umweltfreundlichem Trägeröl.

Weitere spülungstechnische Entwicklungsschwerpunkte sind:

- Untersuchung von industriellen Trenn- und Aufbereitungsverfahren zur vollständigen Abtrennung des Feststoffgehaltes,
- Mathematische Modellierung der Bohrlochhydraulik und des Bohrklein-Austrages unter Einbeziehung von Temperatur-Simulations-Modellen.

2.4.6 Schlußbetrachtung

Die Erforschung der kontinentalen Kruste mit einer ultratiefen Bohrung stellt ein ehrgeiziges bohrtechnisches und geowissenschaftliches Ziel dar, dessen Erfolg nicht unwesentlich vom eingesetzten Spülungssystem abhängt.

Die besondere spülungstechnische Herausforderung ist durch die Notwendigkeit der Bohrprozeßoptimierung unter extremen Temperatur- und Druckbedingungen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der geowissenschaftlichen Anforderungen gegeben.

Während für die Vorbohrung ein vernünftiger Kompromiß zwischen geowissenschaftlichen und bohrtechnischen Anforderungen möglich erscheint, ist für das Spülungskonzept der Hauptbohrung noch beträchtliche Entwicklungsarbeit zu leisten. Für die erfolgreiche Bewältigung dieser Aufgaben ist die verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geowissenschaftlern und Bohrtechnikern von besonderer Bedeutung.

2.4.7 Literatur

- AKSTINAT, M. (1978): Viskose Fluidmedien für die Tertiäre Erdölgewinnung in hochsalinaren Systemen - Auswahlverfahren, Testmethoden und Versuchsergebnisse - Dissertation TU Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hütten- und Maschinenwesen.
- MOORE, P.L. (1986) : Drilling Practices Manual, Second Edition. - Tulsa (Oklahoma/USA).
- NAGRA NTB 86-09 (1986): Sondierbohrung Kaisten Bau und Umweltaspekte, Bohrtechnik. - Baden (Schweiz).
- NALL, A.E. (1982) : How to Filter Workover and Completion Fluids, Petroleum Engineer International, July 1982, August 1982 Part 1 and 2.
- STARK, C.L., POLK, S.E. (1986) : Scientific Drilling Project in the Southern Appalachians - Drilling Fluids Program, Engineering Foundation Conference. - Dillard (Georgia/USA).
- WALTER, F. (1986) : Abschlußbericht 03E-4408-A Beteiligung am Fenton Hill Projekt in Los Alamos. - Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrergesellschaft, Lingen.