

Institut für Tiefbohrtechnik,
Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

Datum

Gutachterliche Stellungnahme

**zu den Antragsunterlagen für die Bereiche
Bohr- und Spülungstechnik
im Planfeststellungsverfahren Konrad.**

Nachweis der Langzeitstabilität

Das Gutachten enthält 12 Seiten

Clausthal-Zellerfeld, den 08.07.1992

Gutachterliche Stellungnahme

zu den Antragsunterlagen für die Bereiche Bohr- und Spülungstechnik
im Planfeststellungsverfahren Konrad.
Nachweis der Langzeitsicherung

1 Aufgabenstellung

Im Zusammenhang mit der geologischen und bergtechnischen Begutachtung waren im Bezug auf die Bereiche Bohr- und Spülungstechnik noch spezielle Fragen offen, die durch die vorliegende gutachterliche Stellungnahme behandelt werden. Nach Übergabe der entsprechenden erläuternden Unterlagen und einem Gespräch zwischen dem Gutachter und den Vertretern folgender Häuser:

- Niedersächsisches Umweltministerium (NMU):
[REDACTED]
- Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld:
[REDACTED]
- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, NLFb:
[REDACTED]

wurden die von mir zu behandelnden Fragen wie folgt festgelegt:

- 1 Wie sind die Wasserdurchlässigkeit und die Dichte der sedimentierten Bohrspülungen anzusetzen? (EU 449 und EU 437, Kap. 8).
- 2 Wie sind Bohrlöcherweiterungsfaktoren in Unterkreide-Tonsteinen anzusetzen? (EU 437, Kap. 5)
- 3 Wie ist die Standfestigkeit von Zementbrücken speziell in den vom Ing.-Büro [REDACTED] betrachteten Bohrungen einzuschätzen? (EU 437, Kap. 7, Bericht Schorn)
- 4 Sind die vom Ing.-Büro [REDACTED] angenommenen Füllhöhen in den Bohrungen plausibel? (EU 437, Kap. 10)
- 5 Wie ist die Wasserdurchlässigkeit des Nachfalls in den Bohrungen einzuschätzen? (EU 424, Kap. 7.6 und 7.7; EU 454, Kap. 8; EU 461; NATAU & PIMENTEL 1991).
- 6 Wie ist die Wasserdurchlässigkeit der Bohrlöcherfüllungen der Bohrungen Üfingen 1 und Bleckenstedt 1 im Vergleich zu den anderen relevanten Bohrungen anzusetzen? (EU 437, Kap. 9).

2 Unterlagen

Für die Erarbeitung des Gutachtens wurden mir folgende Unterlagen übergeben:

1. **NATAU, O. & PIMENTEL, E. (1991):** Laborversuche zur Selbstabdichtung von Bohrungen in Tonstein durch Bohrloch-wandausbrüche. EU 461
2. **SCHORN, H. (1990):** Korrosion von Zementbrücken, Gutachterliche Stellungnahme und baustoffliche Bewertung zur Dauer der Funktionsfähigkeit von Zementbrücken im Bereich der Schachanlage Konrad.
3. **HEUSLER, E. (1988):** Korrosion von im Bohrloch verbliebener Verrohrung. EU 220
4. **COLENCO (1989):** Modellrechnungen mit dem Program FEM 301 für ein alternatives geologisches-hydrologisches Modell; alte Bohrungen; Schachtverschluß. EU 309
5. **WITTKÉ, W. (1991):** Ergebnisse des Untersuchungsprogrammes im Bereich der Unterkreide (343 m-Sohle), Bericht Teil A I. EU 424
6. **GERARDI, J. (1991):** Darstellung der Verfüllzustände von ausgewählten Tiefbohrungen im Nahbereich des hydrogeologischen Modellgebietes Konrad. EU 434
7. **WITTKÉ, W. (1991):** Endlager Konrad: Schachtverfüllung/Alte Bohrungen, Bericht Teil E, Nachweis der Dichtigkeit alter Bohrungen. EU 437
8. **BUSS, J. & SCHMIDT, J. (1991):** Sedimentationsverhalten und Durchlässigkeit von Bohrspülungen. EU 449
9. **WITTKÉ, W. (1991):** Endlager Konrad; Schachtverfüllung/Alte Bohrungen, Bericht Teil A II, Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541 m-Sohle). EU 454
10. **COLENCO (1991):** Einfluß der alten Tiefbohrungen, Rechenfall R 47. EU 455

- 11 **WITTKE, W. (1992):** Fortschreibung der Ergebnisse des Untersuchungsprogrammes im Bereich der Unterkreide (343 m-Sohle), Bericht Teil A I (Ergänzung). EU 460
- 12 **Bfs (1992):** Stellungnahme zum Arbeitsbericht Nr. 1 von Prof. Natau über Modellversuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit einer durch Nachsedimentation verschlossenen Bohrung. EU 461
- 13 **COLENCO (1992):** Einfluß des Schachtverschlusses, Rechenfall R 49. EU 463
- 14 **GRÜNEBERG, G. (1992):** Stellungnahme zum Sachstandsbericht 3/91 des NLF. EU 464
- 15 **REPPERT, D. & BEHRENS, J. (1985):** Untersuchungsbohrung Konrad 101. Bericht der DBE.

Die Unterlagen wurden numeriert (1 bis 15), um sie im Text besser ansprechen zu können. Sie werden im Text in runde Klammern (.....) gesetzt.

3 Bewertung

3.1 Wie sind die Durchlässigkeiten für Wasser und Dichte der sedimentierten Bohrspülungen anzusetzen?

Die Zahl der zu betrachtenden Bohrungen bei der Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse im Modellgebiet wird mit 25 angegeben (6) und entsprechend in den anderen Unterlagen (z.B. 7) konsequent übernommen.

Die Verfüllung bei Aufgabe der Bohrungen wurde entsprechend dem Stand der Technik und entsprechend der gültigen Tiefbohrverordnung vorgenommen. Die Art der Verfüllung mußte dem Bergamt angezeigt und von diesem genehmigt werden.

Grundsätzlich bestand die Verfüllung in folgenden Maßnahmen:

- Zementation des Korallenoolith (Oxford) bei den Explorationsbohrungen auf Eisenerz mit einer durchschnittlichen Länge von 60 - 80 m für die Zementbrücke. Bei den zahlenmäßig wenigen Bohrungen, die tiefere Untersuchungsziele beinhalteten, war eine Bodenzementation nicht erforderlich.

- Dickspülung bzw. Dickspülung mit Bohrklein versetzt bzw. anderen Zuschlagstoffen (3 Bohrungen) über weite Bereiche des Bohrloches.

Meist wurden mehrere Zementbrücken von durchschnittlich 5 – 10 m Länge in unterschiedlichen Positionen eingebracht, um Grundwasserhorizonte zu schützen.

Die Verfüllung endete stets mit der Entfernung des Bohrkellers und dem sicheren Verschluss der noch verbliebenen, zutage geführten Verrohrung durch Schneiden der Rohre in 1,50 bis 2,00 m Teufe, Aufschweißen einer Stahlplatte und Absicherung durch Beton oder eine Betonplatte. Anschließend wurde mit Bodenaushub (zumeist Mutterboden) verfüllt (6). Die längsten Bohrlochabschnitte sind demnach mit Dickspülung verfüllt. Die verwendeten Bohrspülungen hatten eine Dichte von durchschnittlich $\rho = 1,25 \text{ kg/l}$ (7, Abb. E-8.4). Die Schwankungsbreite lag zwischen $\rho = 1,2$ und $1,38 \text{ kg/l}$.

Aus der Spüldichte kann bei einer festgestellten Sedimentationshöhe die Dichte des Spülungssediments ermittelt werden. Vom Leichtweiß-Institut in Braunschweig (LWI) wurde für verschiedene Spülmateriale und verschiedene Anmachwasser eine Sedimentationshöhe von $S_s = 50\%$ ermittelt (8). Dieses deckt sich mit den Erfahrungen aus der Tiefbohrtechnik. Bemerkung: Der Mittelwert gilt für Sedimentationen von reinen Spülungen (Dickspülungen) ohne Zuschlagsstoffe. Der Fall von Verfüllung mit Bohrspülung und Zuschlagsstoffen soll später behandelt werden.

Die Bestimmung der Durchlässigkeit der sedimentierten Bohrspülungen wurde mit genormten Verfahren vorgenommen. Der reproduzierbar mit verschiedenen Ausgangsmaterialien und verschiedenen Anmachwässern nach Sedimentationszeiten zwischen 670 und 1150 h ermittelte Wert betrug $k_f = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ bis $2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

In einer Probe, die mit "Bodenmaterial aus Sand (stark schluffig, etwas tonig)" bezeichnet wurde, und in den Berichten auch unter der Bezeichnung "Preußag" erscheint, wurden höhere Werte der Durchlässigkeit ermittelt. Für die 3 unterschiedlichen Wässer für die Herstellung der Spülung ergeben sich nach 200 bis 332 h Sedimentationszeit Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 3,4 \times 10^{-6}$ bis $5,2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Das Ergebnis weist darauf hin, daß bei Zugabe von nichtquellfähigen Zuschlagsstoffen bei gleicher Beobachtungszeit das Sediment eine höhere Durchlässigkeit ergibt.

Auf Grund des nachgewiesenen Zeiteffektes der Sedimentation wurde in keinem Fall ein Endwert bestimmt, sondern ein Zeitwert nach weniger als 1000 h. Die Sedimentationskurven des LWI (6) zeigen außerdem, daß bereits durch die geringe Filtration für die Durchführung der Durchlässigkeitsmessung eine Nachkompaktion (Sedimentation) stattfindet.

Der vom Ingenieurbüro [REDACTED] gewählte Ansatz für die Durchlässigkeit von Spülungssedimentationen mit $k_f = 1 \times 10^{-8}$ m/s ist als äußerst vorsichtig und konservativ anzusehen, da hier wie auch in den weiter zu betrachtenden Fällen der Selbstverfüllung und Verfüllung mit Spülung und Zuschlagstoffen jeder Ansatz außer acht gelassen wird, der sich aus der Bohrlochkompaktion auf Grund der Spannungsverteilung um ein Bohrloch zwangsweise ergibt. Je nach Richtung der Untersuchungsbohrungen aus den aufgefahrenen Strecken in 343 m und 541 m hat sich gezeigt, daß ein sehr schneller Prozeß der Bohrlochverschließung (Selbstverfüllung) und Kompaktion stattfindet.

Wie bereits erwähnt, gilt dieses natürlich auch für ein Bohrloch, das mit Dickspülung und Zuschlagstoffen verfüllt wird. Die "Preußag-Probe" wurde mit Recht für die Betrachtung der Beurteilung der Spülungssedimentation ausgeklammert. Auf den festgestellten Wert für $k_f = 3 - 5 \times 10^{-6}$ m/s ist bei der Verfüllung von Bohrungen mit Spülung und Zuschlagstoffen noch einmal einzugehen (s. Abschnitt 3.6).

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, daß die von Prof. Wittke (7) eingeführten Werte für die Sedimentationshöhen für Bohrspülungen mit $S_s = 50\%$ und den Durchlässigkeitsbeiwert von Spülungssedimentationsmaterial mit $k_f = 1 \times 10^{-8}$ m/s konservativ angesetzt wurden.

3.2 Wie sind die Bohrlocherweiterungsfaktoren in Unterkreide-Tonsteinen anzusetzen?

Abweichungen im Bohrlochdurchmesser vom nominellen Durchmesser des Bohrwerkzeugs, also Bohrlochverengung bzw. Bohrlocherweiterung, sind Folgen eines allgemein als Bohrlochinstabilität beschriebenen komplexen Vorganges. Man kann die Ursachen der Bohrlochinstabilität in zwei Gruppen einteilen: physikalische Ursachen und chemische Ursachen. Es soll in diesem Zusammenhang nicht näher auf die mannigfaltigen Ursachen eingegangen werden; es genügt hier die Nennung der Hauptursachen.

Physikalische Ursachen:

- Gebirgsspannungen einschl. tektonischer und bergbaulicher Herkunft sowie Änderungen der örtlichen Gebirgsspannungen um das Bohrloch herum.
- Druck in der Poren- bzw. Kluftfüllung im durchbohrten Gebirge.
- Druckschwankungen in der Bohrspülung, hervorgerufen durch Bewegung des Bohrstranges.

- Temperaturänderungen durch die Spülungszirkulation, insbesondere bei tiefen Bohrungen.
- Erosion der Bohrlochwände durch Zirkulation.
- Beanspruchung der Bohrlochwände durch schlagende bzw. reibende Kräfte, die durch den Bohrstrang hervorgerufen werden.

Chemische Ursachen:

- Hydratation der gesteinsbildenden Minerale durch das Spülungsfiltrat.
- Osmotische Vorgänge.
- Lösung von Gesteinskomponenten in der Bohrspülung.

Wir haben zu unterscheiden zwischen Bohrlochinstabilitäten während des Bohrprozesses und solchen, die sich auch nach Beendigung der Bohrung, bzw ihrer Verfüllung abspielen. Während die Änderungen des Bohrlochdurchmessers (Verengungen bzw. Erweiterungen) während des Bohrens sehr stark durch die Bohrstrangdynamik und die Bohrlochhydraulik bestimmt sind, sind nach der Verfüllung des Bohrloches insbesondere die chemischen Faktoren und die spannungsbedingten Faktoren wirksam.

Kalibermessungen liegen lediglich von 3 der insgesamt 25 zu betrachtenden Bohrungen vor:

Konrad 101, Bleckenstedt 4 und Velchede 3.

Im Teil E von Prof. Wittke (7) wird der Versuch unternommen, aus den vorliegenden Kalibermessungen eine gewisse Generalisierung abzuleiten, die auch auf die nicht vermessenen Bohrungen übertragbar ist. Die auf diese Weise ermittelten Bohrlocherweiterungsfaktoren für den Bereich der Unterkreide werden für die höhere Unterkreide mit 1,4 und für die tiefere Unterkreide mit 1,6 angesetzt. Diese von Prof. Wittke empfohlenen Richtwerte sind nach meiner Ansicht zwar vertretbar, aber ganz sicher wiederum als äußerst konservativ anzusehen.

Die Bohrung Konrad 101 mit einer Endteufe von 1001,75 m wurde als spezielle Untersuchungsbohrung im Jahre 1985 abgeteuft und ist als kontinuierliche Kernbohrung mit abschnittsweiser Bohrlocherweiterung hergestellt worden. Außerdem wurde ein ungewöhnlich umfangreiches Meß- und Testprogramm durchgeführt:

- 17 Zuflußtests als sogen. Gestängetests mit Packern
- 12 Temperaturmessungen
- 6 Programme mit geophysikalischen Messungen.

Berücksichtigt man ferner die insgesamt lange Bohrzeit von über 6 Monaten, so wird klar, daß die hier aufgetretenen Bohrlocherweiterungen situationsbedingt waren und sicher über das normale Maß hinaus gehen. Die tatsächlich festgestellten Bohrlocherweiterungsfaktoren liegen für den Bereich Höhere Unterkreide in der Bohrung Konrad 101 bei 2,23 und für den Bereich Tiefere Unterkreide bei 1,68. Die Bohrung Vechelde 3, die ebenfalls eine lange Bohrzeit von 5 Monaten in Anspruch genommen hatte (Endteufe 1863,4 m) zeigt in dem Bohrlochbereich Höhere Unterkreide Bohrlochverengungen und damit Bohrlocherweiterungsfaktoren von 0,94 und im Bereich der Tieferen Unterkreide Bohrlocherweiterungsfaktoren von 0,91 bis 1,23. Die Bohrung Bleckenstedt 4 (Endteufe 1063 m, Bohrzeit 6 Wochen) zeigt Bohrlocherweiterungsfaktoren im höheren Bereich Unterkreide von 1,3 bis 1,37 und im tieferen Bereich der Unterkreide von 1,13 bis 1,26.

Auf Grund der aufgezeigten Gegebenheiten werden von mir die mittleren Bohrlocherweiterungsfaktoren für die beiden von Prof. Wittke eingeführten Teilbereiche der Unterkreide wie folgt angesetzt:

Höhere Unterkreide	1,3
Tiefere Unterkreide	1,2

Es sei jedoch ausdrücklich betont, daß die Festlegung der Bohrlocherweiterungsfaktoren für die Beurteilung der axialen Durchlässigkeit und Transmissivität der alten Bohrungen im Bereich der Unterkreide für die Langzeitbeurteilung keine wesentliche Rolle spielen, da die Bohrlochschließung durch Nachfall und/oder Konvergenz nachgewiesermaßen stattfindet.

Durch die Verfüllung, Sedimentation und Kompaktion treten Vorgänge ein, die das Bohrloch sowie die temporären Bohrlocherweiterungen weitgehend abdichten und in der anschließenden Ruheperiode von mindestens 1000 Jahren gänzlich schließen. Der zeitbefristeten Bohrlocherweiterung messe ich daher nur eine untergeordnete Bedeutung zu.

3.3 Wie ist die Standfestigkeit von Zementbrücken speziell in dem vom Ing.-Büro Prof. Wittke betrachteten Bohrungen einzuschätzen?

In Tiefbohrungen werden sog. Tiefbohrzemente eingesetzt, die ohne Zuschlagstoffe zur Ringraumabdichtung von Futterrohren und als Zementstopfen bei der Verfüllung von Bohrungen eingesetzt werden. Der Wasser-Zement-Faktor (WZF) liegt bei Futterrohrzementationen normalerweise zwischen 4 und 5, um einen möglichst dichten Zementstein zu erzielen. Bei Verfüllungsarbeiten werden auch Faktoren von $WZF = 5 - 6$ eingesetzt. Die grundsätzlichen Vorgänge der korrosiven Zerstörung von Zementsteinen ist in dem Gutachten von Prof. Schorn (2) dargestellt worden. Die hier abgeschätzte Funktionstüchtigkeit von Zementsteinbrücken in Bohrungen für eine Zeitdauer von 10^3 bis 10^4 Jahren dokumentieren einen sicheren und gleichzeitig konservativen Ansatz, wie er für den hier zu behandelnden Fall grundsätzlich geboten ist.

Ich kann den Angaben uneingeschränkt zustimmen.

3.4 Sind die vom Ing. Büro Prof. Wittke angenommenen Füllhöhen in den Bohrungen plausibel?

Bei den Modelluntersuchungen wurden u.a. aus zwei Sohlen im Teufenbereich 343 m und 541 m Bohrungen in verschiedene Richtungen als Kernbohrungen mit 86, 116 bzw. 146 mm ausgeführt. Sie haben Bohrlochlängen zwischen 7,5 und 55,5 m. In diesen Bohrlöchern wurden u.a. Untersuchungen durchgeführt, um die Vorgänge der Selbstverfüllung zu beobachten und Material für weitergehende Laborversuche zu gewinnen.

Außerdem wurden in den Bohrungen Injektionstests vorgenommen, um die Durchlässigkeit des Gebirges festzustellen.

In der hier angesprochenen Frage kommt es darauf an, die Vorgänge, die mit der Selbstverfüllung von offenen Bohrungen bzw. Bohrlochabschnitten behandelt wurden, zu überprüfen und zu bewerten. Bei diesen nachfallbewirkten Selbstverfüllungen ist die Bohrung bereits abgeschlossen und verfüllt. In den zur Verfügung gestellten Unterlagen werden in getrennten Untersuchungen folgende Vorgänge behandelt:

- Sedimentation der Bohrspülungen
- Selbstverfüllung durch Nachfall von Formationsmaterial in das Bohrloch und
- Verfüllung mit Spülung und "Zuschlagstoffen".

Es ist in Abschnitt 3.1 meines Gutachtens dargelegt worden, daß es bei der Sedimentation von Bohrspülungen zur Trennung des zunächst kolloidalen Systems der Bohrspülungen in einen feststoffangereicherten unteren Teil (Absetzung von Sedimentationsmaterial) und in einen Bereich kommt, der praktisch mit reinem Wasser ausgefüllt ist. Beide Anteile sind, entsprechend den Ergebnissen des LWI (8), zum Zeitpunkt von etwa 1000 h nach Verfüllung etwa gleich groß, d.h. die Sedimentationshöhe beträgt $S_s = 50 \%$.

Hier ist nun der zweite Aspekt der ineinandergreifenden Prozeßabläufe zu betrachten. Zwischen einer stehenden Spülungs- oder Wassersäule im Bohrloch und dem Gesteinsmaterial der Bohrlochwand kommt es zu physiko-chemischen Wechselwirkungen. Dies betrifft insbesondere die wäßrige Phase der Bohrspülung und die quellfähigen Anteile der Gesteinsschichten. Als Resultat ist der Nachfall in das Bohrloch festzustellen.

Insbesondere Tone und tonhaltige Gebirgsschichten neigen zu diesen Wechselwirkungen, bei denen es durch Hydratation zum Hereinbrechen von Gebirgsmaterial in das Bohrloch kommt. Das Material füllt zunächst mit geringer Dichte das Bohrloch aus. Durch Sedimentation und erneute Aufnahme von Gebirgsmaterial aus dem Bohrlochbereich wird dieser Vorgang erst dann beendet, wenn entweder kein reaktionsfähiges Wasser aus der Bohrspülung mehr zur Verfügung steht oder das Bohrlochvolumen für weiteren Feststoff nicht mehr aufnahmefähig ist.

Weiterhin ist die im Bericht von Prof. Wittke (2) bewußt vernachlässigte Kompaktion zu berücksichtigen, die zum Verschließen des Bohrloches auf Grund der Gebirgsspannungen aus den auflastenden Gebirgsschichten führt.

Mit Kenntnis der mittleren Werte des anstehenden Felses (E-10.2 des Berichtes von Prof. Wittke):

Feuchtdichte	ρ	=	2,40	g/cm ³
Trockendichte	ρ_d	=	2,24	g/cm ³
Korndichte	ρ_s	=	2,68	g/cm ³
Wassergehalt	w	=	7,5	% und
Porenanteil	n	=	16,5	%

läßt sich bei Annahme eines Wertes für die Dichte des vom Nachfall eingenommenen Volumens (z.B. mit der Nachfülldichte $\rho_{dFüll} = 1,0 \text{ g/cm}^3$) bei bekanntem Bohrdurchmesser d_2 die Bohrlocherweiterung rechnerisch bestimmen, die erforderlich ist, um ein Bohrloch gerade vollständig auszufüllen. Dieser Wert ergibt sich als Bohrlocherweiterungsfaktor.

Mit den genannten Werten für den anstehenden Fels und $\rho_{\text{dFüll}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$ beträgt der Bohrlöcherweiterungsfaktor 1,35. Es gilt also

$$d_3 = 1,35 d_2$$

Da der Nachfall sich aus Material zusammensetzt, das auf Grund der Reaktion mit dem Wasser der Bohrspülung in das Bohrloch gelangt, kann der Erfahrungswert eingesetzt werden, der mit dem Originalmaterial aus den beiden Bereichen der Unterkreide (343 m und 541 m-Sohle) als Reaktionsprodukt aus den Versuchsbohrungen gewonnen wurde.

Während bei den Bohrspülungen eine Sedimentationshöhe von $S_s = 50\%$ nachgewiesen wurde (8), genügt es, daß die Sedimentationshöhe bei Nachfallmaterial einen Wert von $S_s = 75\%$ erreicht, um eine weitgehende Abdichtung zu bewirken.

Es ist für mich auf Grund der vorliegenden Unterlagen außer Frage, daß eine Sedimentationshöhe von S_s von mindestens 75 % mit Nachfallmaterial, das auf Grund des Zerfalls quellfähigen Materials gebildet wird, in den Unterkreidepartien des Modellgebietes Konrad als gesichert angesehen werden kann.

3.5 Wie ist die Wasserdurchlässigkeit des Nachfalls in den Bohrungen einzuschätzen?

Die Durchlässigkeit des Nachfalls in den verfüllten Bohrungen des Untersuchungsgebietes Konrad wurde durch die Untersuchungen von Prof. Wittke (7) in der Tabelle E-10.1 zusammengefaßt. Danach beträgt der Durchlässigkeitsbeiwert nach 110 Tagen Werte für $k_f = 10^{-8}$ bis 10^{-9} m/s. Die Werte wurden durch überzeugende – allerdings aufwendige – Maßnahmen direkt aus dem Untersuchungsgebiet beschafft und unter kontrollierten Bedingungen ermittelt. Es sei darauf hingewiesen, daß die genannten Werte für k_f sich mit der Zeit weiter reduzieren.

Es ist für mich nicht überraschend, daß sich diese Werte für die Durchlässigkeit von Nachfallmaterial recht gut mit den Werten decken, die vom LWI (8) an anderem Probenmaterial ermittelt wurde, da in beiden Fällen das Probenmaterial als Ausgang Ton, stark schluffig bzw. Schluff, stark tonig bzw. Schluff-tonig etwas feinsandig besteht, also die Grundvoraussetzungen erfüllt, einen hohen reaktiven Anteil zu besitzen.

Demgegenüber wurden bei den Untersuchungen von Prof. Natau (1) 2 Probenmaterialien eingesetzt, die jeweils nur 20% quellfähige Minerale enthalten. Das Verhalten von Proben dieser Kategorie soll im Abschnitt 3.6 näher behandelt werden.

3.6 Wie ist die Durchlässigkeit der Bohrlochfüllungen in den Bohrungen Üfingen 1 und Bleckenstedt 1 im Vergleich zu den anderen relevanten Bohrungen anzusetzen?

Bei der Sedimentation von Feststoffen aus einer Bohrspülung bzw. aus Nachfall, der auf Grund von Reaktionen mit dem Wasser der Bohrlochfüllung in das Bohrloch gelangt ist, kommt es zur Ausbildung eines weitgehend dichten Sedimentationskörpers. Wird jedoch ein höherer Anteil von Feststoffmaterial das selbst nicht oder nur sehr schlecht quellfähig ist zusammen mit Bohrspülung in ein Bohrloch eingebracht, so wird durch dieses Material die Sedimentation anders ausgebildet. Dabei kommt es zunächst nicht zu gleichniedrigen k_f -Werten, wie bei der Sedimentation von Bohrspülungen, bzw. die Zeit zum Erreichen der niedrigen k_f -Werte ist länger anzusetzen.

Die Ergebnisse von Prof. Natau sind deshalb nicht vergleichbar, weil selbst bei den beiden von ihm eingesetzten Materialien die Quellwirkung stark unterschiedlich ausfällt. Während die Probe mit der Bezeichnung "Material 1" eine praktisch konstante Durchlässigkeit mit $k_f = 10^{-3}$ m/s aufweist, zeigt die Probe aus Material 2 die charakteristische Abnahme des k_f -Wertes mit der Zeit und erreicht nach ca. 2000 h den Wert $k_f = 10^{-6}$ m/s. Die Tendenz ist weiterhin abnehmend

Um sichere Werte für die Durchlässigkeit von Verfüllungsmaterial zu erhalten, das neben Tonspülungen einen erheblichen Anteil an nichtquellfähigen Zuschlagsstoffen enthält, wurde am Institut für Tiefbohrtechnik eine entsprechende Untersuchung durchgeführt. Dabei wurde eine Tonspülung mit 5 Gew.-% Tixoton und $\rho = 1,03$ kg/l angesetzt und mit grobstückigen Feststoffen (Korngröße bis 2 cm) in ein Standrohr eingefüllt. Die Probe hatte einschließlich der Feststoffe ein Dichte von $\rho = 1,25$ kg/l. Das Standrohr war entsprechend der Versuchsanordnung des LWI (8) ausgebildet und erlaubt die zeitliche Bestimmung der Sedimentationshöhe und die Bestimmung der Durchlässigkeit. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt:

Tabelle 1: Sedimentationshöhen in Prozent der Ausgangshöhe ($h = 100$ cm) bei den durchgeführten Durchlässigkeitsmessungen.

Meßzeit [h]	Sedimentationshöhe [%]	Durchlässigkeit [m/s]
300	69,8	$5,37 \cdot 10^{-6}$
348	63,0	$2,36 \cdot 10^{-7}$
420	56,5	$1,37 \cdot 10^{-7}$
756	51,8	$7,30 \cdot 10^{-8}$

Grundsätzlich zeigt sich das gleiche Sedimentationsverhalten wie es für die Dickspülungen bei den Untersuchungen des LWI (8) festgestellt wurde. Der zeitliche Ablauf der Sedimentation ist zwar durch die groben Feststoffe und den geringeren Feststoffgehalt der Ausgangsspülung etwas anders, führt jedoch hinsichtlich der gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte zum gleichen Ergebnis.

Ich empfehle daher, die Bohrungen, die mit zusätzlichem Feststoff verfüllt wurden, hinsichtlich der Durchlässigkeit gleich zu behandeln wie die mit Dickspülungen verfüllten Bohrungen.

Clausthal-Zellerfeld, den 08.07.1992



