

# **Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätskriterien für Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau**

## **Abschlussbericht (März 2003)**

### **Verfasser:**

Dipl.-Geol. K. Baumann, Storkow  
Dipl.-Geol. B. Niehues, Bonn  
Dipl.-Ing. M. Tholen, Oldenburg  
Prof. Dr. C. Treskatis, Siegburg

***Gefördert durch: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn***

### ***Beteiligte Firmen und Institutionen:***

Bau-ABC Rostrup, Bad Zwischenahn  
Anneliese Baustoffe für Umwelt und Tiefbau GmbH (AZBUT), Ennigerloh  
Bohrlochmessung-Storkow GmbH, Storkow  
Braun Tonbergbau, Alfter  
Dyckerhoff Baustoffsysteme GmbH, Wiesbaden  
NBB Nord Bohr und Brunnenbau GmbH, Hamburg  
SBF-Hagusta, Peine  
Stephan Schmidt KG, Dornburg  
STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH, Rietberg

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	3
2	Ziele und Arbeitsprogramm des Vorhabens .....	4
2.1	Ziele.....	4
2.2	Arbeitsprogramm .....	4
3	Laborversuche .....	4
3.1	Versuchsdurchführung.....	4
3.2	Versuchsergebnisse und deren Interpretation.....	7
3.2.1	Vorbemerkungen .....	7
3.2.2	Einfluss der Materialzusammensetzung.....	7
3.2.3	Einfluss des Verpressvorganges.....	10
3.2.4	Einfluss der CMC-Konzentration.....	11
4	Feldversuche .....	12
4.1	Versuchsdurchführung.....	12
4.2	Versuchsergebnisse und deren Interpretation.....	14
4.2.1	Vorbemerkungen .....	14
4.2.2	Entwicklung und Beeinflussung der Materialeigenschaften einer Suspension ...	15
4.2.3	Setzungen.....	17
4.2.4	Farbtracerversuche.....	18
4.3	Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen.....	21
4.3.1	Versuchsdurchführung .....	21
4.3.2	Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen .....	21
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	24
	Literaturverzeichnis .....	25

## 1 Einführung

Abdichtungen dienen im Brunnenbau zur Vermeidung unerwünschter Sickerwasser- und Grundwasserzuflüsse in die Brunnenbohrung. Die Abdichtungsmaterialien werden entweder als Granulate, Pellets oder Stückware geschüttet bzw. als Suspensionen verpresst. Die Materialien, die heute im Brunnenbau verwendet werden, werden von den Herstellern mit materialspezifischen Kenngrößen charakterisiert und beschrieben. Diese Kenngrößen beziehen sich jedoch auf Modellrezepturen unter Laborbedingungen ohne Berücksichtigung des Umgangs auf der Baustelle und der Bohrlochrandbedingungen.

Abdichtung im Brunnenbau werden in der Fachliteratur erst in neueren Veröffentlichungen in ihrem Stellenwert und hinsichtlich ihrer materiellen Anforderungen beschrieben (z. B. THOLEN 1997, BIESKE et al. 1998, BALKE et al. 2000). Frühere Arbeiten führen Abdichtungen als Element der Ringraumverfüllungen an und zählen die damals zeitgemäßen Abdichtungsmedien auf. Eine Auseinandersetzung mit überprüfbaren und an Zahlen festzumachenden Kriterien hat bisher mangels verfügbarer Daten und auf der Baustelle nachvollziehbarer Kenngrößen nicht stattgefunden.

Die besonderen Randbedingungen und Anforderung an Abdichtungen von defekten oder zu sanierenden Brunnen werden in mehreren Publikationen beschrieben (z. B. TRESKATIS 2001, KLEEBERGER 2000, DVGW 2001, DVGW 1998). Systematische und auf die Brunnenbaupraxis übertragbare Vor-Ort-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Abdichtungen sind bisher noch nicht durchgeführt worden. In der Praxis werden auch Abdichtungen eingebaut, die aus „selbstgemischten“ Rezepturen hergestellt wurden. Diese basieren meist auf regionalen Erfahrungswerten der Brunnenbauer und werden unter sehr verschiedenen Randbedingungen gemischt und in das Bohrloch eingebracht. Überprüfbare Qualitätskriterien und einheitliche Bewertungsmöglichkeiten der auf der Baustelle verwendeten Materialien liegen für den Brunnenbauer und Bauherrn daher nur in unzureichendem Maße vor.

An zahlreichen Brunnenbauwerken und Grundwassermessstellen wurde durch verbesserte Untersuchungs- und Kontrollmessungen nachgewiesen, dass die Funktion der Ringraumabdichtungen trotz Beachtung der gängigen Materialspezifikationen der Hersteller nicht gewährleistet ist. Dadurch kann eine Gefährdung von Trinkwasservorkommen nicht ausgeschlossen werden.

Mit Hilfe des Vorhabens sollten nachvollziehbare und auf der Baustelle überprüfbare Qualitätskriterien für Suspensionen aus quellfähigen und hydraulisch wirksamen Gemischen erarbeitet werden. Hierzu wurden Vor-Ort-Untersuchungen und Laborversuche von verschiedenen Abdichtungssuspensionen vom Ort ihrer Entstehung auf der Baustelle bis zur Aushärtung im Bohrloch durchgeführt. Im Gelände wurden Materialproben zu verschiedenen Zeitpunkten der Misch- und Einbringungsprozeduren untersucht und tracerhydrologische Tests an Bohrungen sowie geophysikalische Bohrlochmessungen zur Verifizierung der auf der Baustelle und im Labor ermittelten Kenngrößen durchgeführt. Parallel dazu wurde in Laborversuchen die abdichtende Wirkung von Suspensionen im Bohrlochringraum unter verschiedenen Randbedingungen untersucht.

## **2 Ziele und Arbeitsprogramm des Vorhabens**

### **2.1 Ziele**

Ziele des Vorhabens waren:

- Ermittlung von überprüfbaren und auf der Baustelle nachvollziehbaren Qualitätsparametern, wie z. B. zum Absetzmaß, Schrumpfmaß, Viskosität und Dichte
- Ermittlung von Setzungsverhalten, Druckfestigkeit, Filtratwasserabgabe und Absetzmaß von Suspensionsabdichtungen
- Überprüfung der Materialeigenschaften einer Ringraumabdichtung im Bohrloch und Vergleich mit Laborergebnissen definierter Rezepturen
- Definition von Nachweiskriterien für die Beurteilung der Qualitätsparameter von Abdichtungen auf der Baustelle
- Erarbeitung von Dokumentationshilfen für die Herstellung und Anmischung der Produkte auf der Baustelle, den Einbau, die Aushärtung im Bohrloch sowie während der hydraulischen Beanspruchung

### **2.2 Arbeitsprogramm**

Das Vorhaben wurde in folgenden Arbeitsschritten durchgeführt:

- Herstellung ausgewählter Suspensionen aus herstellereigenen und brunnenbauerspezifischen Rezepturen und Prüfung der Einwirkungen und Beeinflussungsmöglichkeiten der physikalischen Materialeigenschaften durch die Verarbeitung auf der Baustelle
- Herstellung von Prüfkörpern zur Ermittlung von Absetz- und Schrumpfmaß sowie der Druckfestigkeit; Überprüfung der Herstellerangaben und der zeitabhängigen Entwicklung der Probenkörper
- Laboruntersuchungen zur Ausbildung der Kontaktflächen und zur Auswirkung von (simulierten) physikalischen Beanspruchungen (Setzungen, Schrumpfungen und hydraulische Beanspruchungen)
- Abteufen und Ausbau von fünf Versuchsbrunnen
- Geophysikalische Vermessung der unausgebauten und nur mit Rohren ausgebauten Bohrungen als Referenzmessung
- Verpressung der Ringräume mit verschiedenen Rezepturen
- Probennahmen von Abdichtungssuspensionen an der Anmischstelle, an der Eingabestelle in das Bohrloch und am Wiederaustritt
- Geophysikalische Vermessungen der ausgebauten Bohrlöcher
- Farbtracerversuche im Labor und in den Versuchsbrunnen

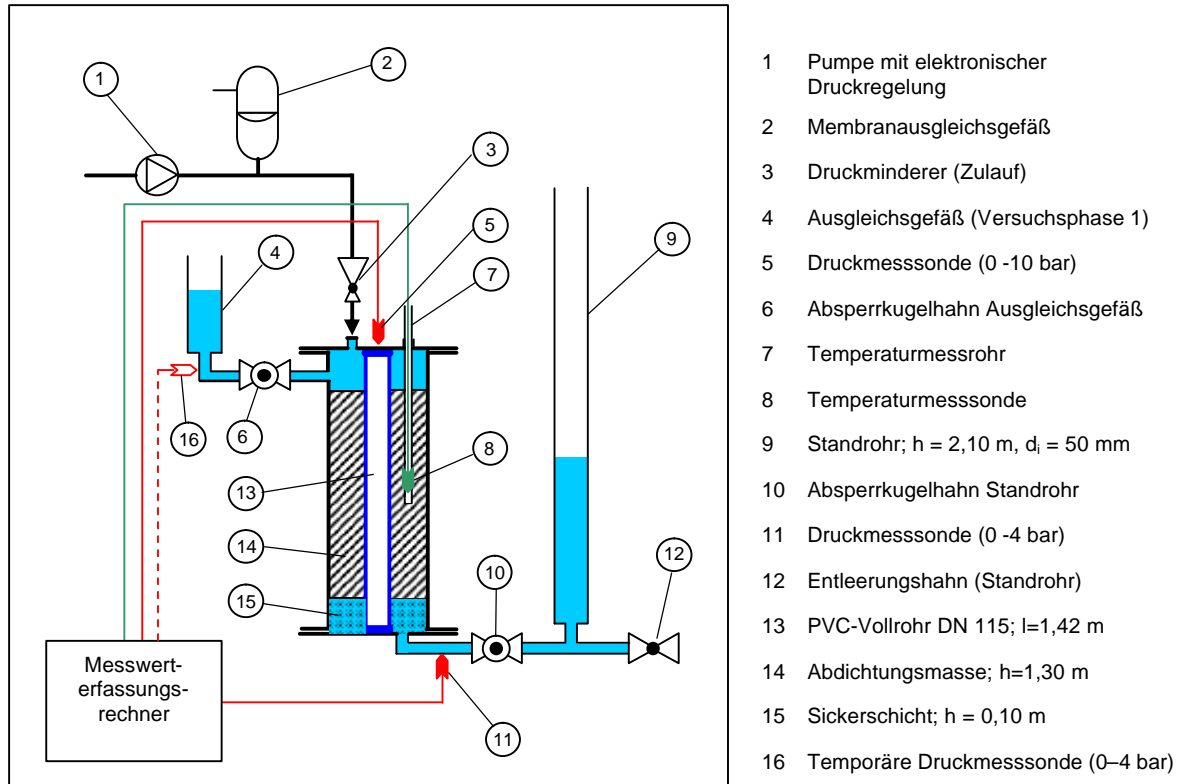
## **3 Laborversuche**

### **3.1 Versuchsdurchführung**

Im ersten Schritt der Laborversuche wurden zwei geeignete Versuchsanordnungen entwickelt und gebaut. Sowohl die Herstellung der Versuchsbehälter als auch die Durchführung der Versuche erfolgte im Bau-ABC-Rostrup.

Bild 1 enthält eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Die Versuchszellen aus Stahlrohren verfügen über einen Innendurchmesser von 300 mm und eine lichte Höhe von 1500 mm. Hiermit konnte ein Ringraumquerschnitt mit praxisnahen Abmessungen und einer möglichst langen Verpressstrecke realisiert werden. In die Versuchszellen wurden an den Enden druckdicht verschlossene PVC-Vollrohre DN 115 gestellt. Somit konnten Ringraumabdichtungen mit einer inneren und einer äußeren Kontaktfläche simuliert werden.

Um ausreichende Druckhöhendifferenzen aufbauen zu können, wurden die Behälter für einen Betriebsdruck von bis zu 4,0 bar ausgelegt. Den oberen und den unteren Abschluss der Behälter bildeten Abdeckplatten, die mittels Flanschverbindungen druckdicht mit den Stahlbehälterrohren verbunden wurden.



**Bild 1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Anordnung der Messwertaufnehmer**

Zur Durchströmung der Abdichtungssysteme wurden mit Hilfe einer Pumpe mit elektronischer Konstantdruckregelung, eines Membranausgleichsgefäßes und manueller Druckminderer künstliche Druckhöhendifferenzen aufgebaut. Die Ermittlung der Systemdurchlässigkeiten erfolgte nach dem Verfahren mit veränderlicher Druckhöhe. Die automatische Aufzeichnung der hierzu erforderlichen Druckhöhendifferenzen erfolgte mit Hilfe eines Messwert-erfassungssystems.

Um stets gleich bleibende Umgebungsbedingungen während der Versuche zu gewährleisten, wurden die Behälteraußenflächen durch eine Berieselung mit Wasser gekühlt.

Die Untersuchungen der Wirksamkeit von verpressbaren Abdichtungsmaterialien wurden an fünf verschiedenen Produkten durchgeführt. Es kamen vier Fertigmischungen (A bis D) und eine Baustellenmischung (E) mit den in Tabelle 1 dargestellten Eigenschaften zum Einsatz.

**Tabelle 1: Herstellerangaben zu den physikalischen Eigenschaften der untersuchten Suspensionen**

Parameter \ Produkt	A	B	C	D	E
	<b>Versuche Nr.</b>	1, 9	2, 10	3, 4	5, 6
W/F-Wert	0,80	0,80	1,20	1,54	0,50
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	1,53	1,55	1,42	1,34	1,80
Absetzmaß in Vol.-%					
Viskosität (Marsh-Zeit) in s/l	57			> 50	
Filtratwasserabgabe nach 30 min in ml				85	

Neben der Beurteilung des Durchströmungsverhaltens des Materialkörpers wurde die Abhängigkeit der hydraulischen Wirksamkeit des Systems „Materialkörper-äußere Kontaktflächen-interne Inhomogenitäten“ von den jeweiligen Materialzusammensetzungen der Suspensionen untersucht.

Bei Verpressarbeiten im Brunnenbau besteht ein verfahrensbedingter Kontakt der Suspensionen mit der Bohrspülung. Die Spülungen enthalten dabei im Regelfall Carboxymethylcellulose (CMC), ein halbsynthetisches Polymer. Auswirkungen des Kontaktes der Suspensionen mit den CMC-Spülungen auf die Wirksamkeit der Abdichtungen wurden durch die Befüllung der Versuchsbehälter vor dem Verpressvorgang mit praxisüblichen 0,2 %igen und 0,05 %igen CMC-Spülungen untersucht. Hierzu wurden mit jedem Produkt zwei Versuche durchgeführt, wobei als einziger Faktor die Konzentration der CMC-Spülung variiert wurde.

Die Suspensionen wurden den Vorgaben der Hersteller entsprechend in einem Kolloidalmischer aufgeschossen. Der Verpressvorgang erfolgte über ein im Ringraum angeordnetes Verpressgestänge in Verbindung mit einer Exzentrerschneckenpumpe.

Die Durchführung der Versuche teilte sich in eine eintägige Erhärtungsphase und in eine insgesamt fünftägige Belastungsphase auf. Während der Erhärtung wurden die Behälter drucklos betrieben. Die zu- und ablaufseitigen Druckmesseinrichtungen wurden dazu benutzt, eventuelle Quell- oder Schrumpfvorgänge der Abdichtungsmassen zu erfassen. Zur Erfassung eventueller Hydratationswärmeentwicklungen dienten in die Abdichtungsmassen eingebaute Temperaturmesssonden.

Während der Belastungsphase wurden für jeweils 24 Stunden zulaufseitige Druckhöhen von 0,5 bar bis 2 bar (mit einer Abstufung von jeweils 0,5 bar) und abschließend erneut 0,5 bar aufgebaut. Als Durchströmungsmedium wurde Trinkwasser verwendet. Hinsichtlich der späteren optischen Untersuchung der Wegsamkeiten innerhalb der Abdichtungssysteme wurde das Wasser eingefärbt.

Nach Abschluss der Belastungsphase wurden die Abdichtungsmassen von unten her mit Druckluft beaufschlagt. Auf diese Weise wurden Wegsamkeiten im oberen Bereich der Abdichtungsmassen visualisiert. Der Luftdruck wurde so lange gesteigert, bis sich entweder

die PVC-Vollrohre oder aber die kompletten Abdichtungsmassen nach oben bewegten. Aus den zugehörigen Druckkräften und den entsprechenden Reibungsflächen wurden die Mantelreibungen zwischen den Abdichtungsmassen und den Vollrohren bzw. Behälterinnenwänden bestimmt.

Im letzten Schritt wurden die Abdichtungsmassen aus den Behältern ausgebaut. Anhand der Eindringtiefen der Farbmarkierung entlang der Kontakt- und Diskontinuitätsflächen erfolgte eine qualitative Beurteilung des Durchströmungsverhaltens.

## **3.2 Versuchsergebnisse und deren Interpretation**

### **3.2.1 Vorbemerkungen**

Anhand der gemessenen Wasservolumina und der Druckdifferenzen konnte auf der Grundlage des Kontinuitätsgesetzes eine „Systemdurchlässigkeit“ bestimmt werden. Als Systemdurchlässigkeit wird die druckabhängige Durchströmungsfähigkeit des Ringraumes verstanden.

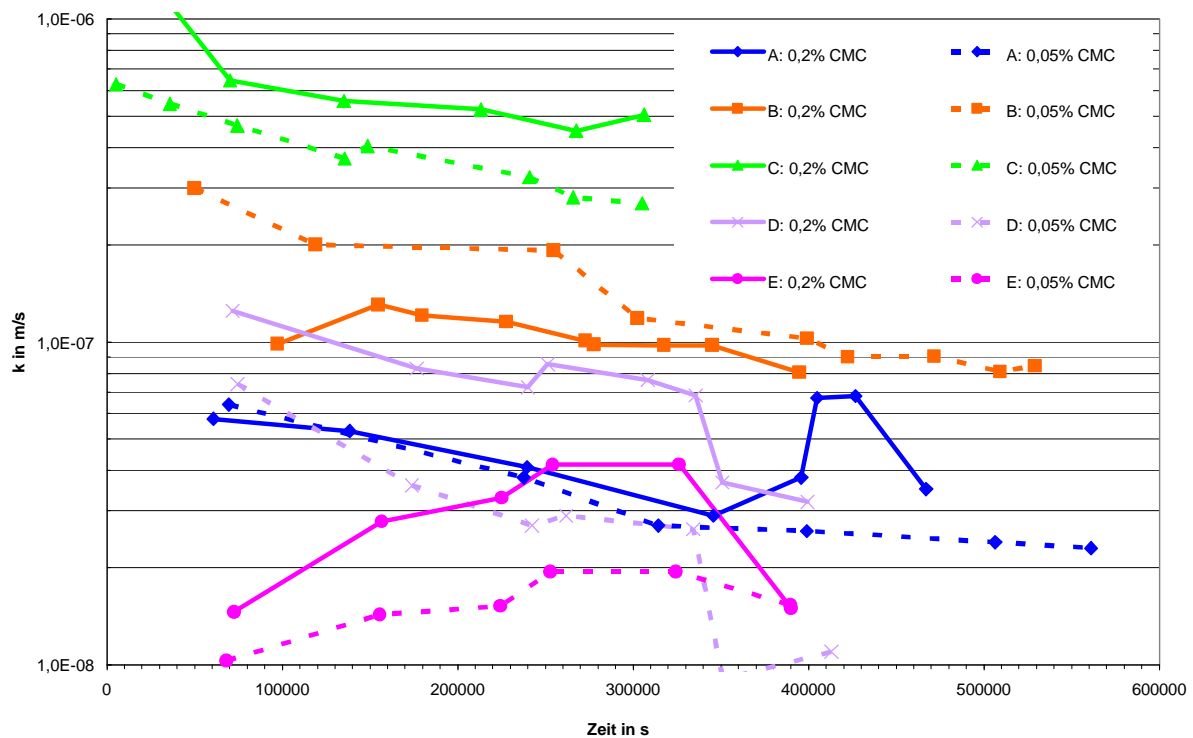
Aus den Versuchen wurde deutlich, dass die Faktoren Verpressvorgang, Konzentration der CMC-Spülung in den Behältern und die Materialzusammensetzung der Suspensionen Auswirkungen auf die Wirksamkeit der einzelnen Abdichtungssysteme ausüben. Die unterschiedlichen Druckbelastungsstufen zeigten dagegen keine signifikanten Einflüsse auf die hydraulischen Eigenschaften des Abdichtungssystems.

Zur qualitativen Beurteilung und Quantifizierung dieser Einflüsse wurden die Ergebnisse folgender Untersuchungen herangezogen:

- Materialspezifische Eigenschaften der Suspensionen
- Bestimmung der Systemdurchlässigkeit und Mantelreibung
- Luftdurchlässigkeitsprüfung
- Einfärbung bzw. Durchströmung der Kontaktflächen

### **3.2.2 Einfluss der Materialzusammensetzung**

Bild 2 zeigt, dass unterschiedliche Systemdurchlässigkeiten je nach Ausgangsprodukt zu beobachten waren.



**Bild 2: Vergleich der ermittelten Systemdurchlässigkeiten der Suspensionen**

Die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeitsversuche und der Begutachtung der Kontaktflächen bestätigen die qualitativen und quantifizierbaren Unterschiede zwischen den einzelnen Abdichtungsprodukten. So wurden Mantelreibungen an den inneren Kontaktflächen zum PVC-Ausbaurohr von 2,4 kN/m<sup>2</sup> (Produkt C) bis zu 11,5 kN/m<sup>2</sup> (Produkt D) erreicht, wobei hohe Mantelreibungen mit geringen Systemdurchlässigkeiten gleichgesetzt werden können. Ein ähnliches Verhalten zeigte sich bei den Farbeindringtiefen entlang der Kontaktflächen. Bei Systemen mit niedrigen Durchlässigkeiten waren die inneren Kontaktflächen auf einer Länge von maximal 100 cm eingefärbt, die äußeren Kontaktflächen zur Behälterwand zeigten Farbspuren bis in Tiefen von ca. 50 cm. Bei den durchlässigeren Systemen lagen hingegen Einfärbungen sowohl der inneren als auch der äußeren Kontaktflächen auf ganzer Länge (130 cm) vor.

Aus der Tatsache heraus, dass nur die Kontaktflächen, nicht aber die Abdichtungsmassen selbst eingefärbt waren, kann geschlossen werden, dass die Wasserwegsamkeiten im System überwiegend an die Kontaktflächen gebunden sind.

Ein Vergleich der materialspezifischen Eigenschaften der Suspensionen mit den zugehörigen Systemdurchlässigkeiten lässt nur sehr wenige Zusammenhänge erkennen. Einziger Parameter, der einen Zusammenhang mit der Systemdurchlässigkeit aufzeigt, ist die einaxiale Druckfestigkeit (s. Tabelle 2).



**Tabelle 2: Druckfestigkeiten der Suspensionen (Entnahme aus dem Rücklauf nach Verpressvorgang) im Vergleich zu den Systemdurchlässigkeiten im Versuchszylinder**

Produkt	Versuch Nr.	7-Tage-Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	28-Tage-Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Systemdurchlässigkeit nach ca. 2 Tagen Druckbelastung in m/s
A	1	2,2	1,7	4,8 x 10 <sup>-8</sup>
	9	< 0,2	0,3	
B	2	0,7	1,8	1,05 x 10 <sup>-7</sup>
	10	< 0,2	< 0,2	
C	3	0,3	0,5	4,5 x 10 <sup>-7</sup>
	4	< 0,2	< 0,2	
D	5	1,4	3,2	5,5 x 10 <sup>-8</sup>
	6	1,7	3,7	
E	7	12,3	14,6	2 x 10 <sup>-8</sup>
	8	12,4	15,4	

Ein Vergleich der Druckfestigkeiten aus der Tabelle 2 mit den Systemdurchlässigkeiten aus Bild 2 zeigt, dass Abdichtungsmassen mit höheren Druckfestigkeiten niedrigere Systemdurchlässigkeiten aufweisen.

Da die Wegsamkeiten im System im Wesentlichen an die Kontaktflächen gebunden sind, erfolgte die Untersuchung der Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Systemdurchlässigkeit anhand des optischen Zustandes der Kontaktflächen. Besonders auffällig waren Kontaktflächen bei den Systemen, die mit dem Produkt C verpresst wurden. Dieses verfügte über eine vergleichsweise geringe Festigkeit. Bei der relativ frühzeitigen hydraulischen Belastung der Ringraumabdichtungen, wie sie in der Praxis auf der Baustelle nicht zu vermeiden ist, fand eine Durchströmung im Bereich der noch nicht verfestigten Suspension an den Kontaktflächen statt. Dieser Vorgang führte zu einer Erosion der Dichtmasse in diesen Bereichen, da eine Erosionsstabilität von 0,3 N/mm<sup>2</sup> zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht wurde. Es ist davon auszugehen, dass die Wegsamkeiten in diesen Fällen vergleichbaren Ursprungs sind wie die Diskontinuitäten im Verpresskörper, die durch die Durchmischungsvorgänge während der Verpressarbeiten entstehen können. Durch die Erhöhung des Wasseranteils der Suspensionen in diesem Grenzbereich erfolgte eine weitere Herabsetzung der Druckfestigkeit. Dieses Verhalten kann jedoch nur erfolgen, wenn schon zu Beginn der Belastung unterschiedliche Festigkeiten z. B. durch Inhomogenitäten in der Verpressmasse vorliegen.

Eine Modellvorstellung für das oben beschriebene Verhalten liegt in der hohen Viskosität der Suspension. Aus der Hydromechanik ist der Zusammenhang bekannt, dass der Widerstand, den Fluide bei der Durchströmung von Rohren erfahren, proportional zur Viskosität ist (LENZ 1989, SCHNEIDER 2001). Durch Reibung der Suspensionen an Kontaktflächen wird ein Widerstand ausgeübt. Im zentralen Querschnitt des Ringraums eilt die Suspension gegenüber dem Kontaktbereich zum Brunnenrohr und zur Bohrlochwand voraus. Aufgrund der geringeren Aufstiegs geschwindigkeit in den Randbereichen kann dort keine wirksame Verdrängung der Bohrspülung erfolgen. Die beobachtete weiche Konsistenz der

Abdichtungsmassen scheint also durch eine Durchmischung der Suspensionen an den Kontaktflächen während des Verpressvorganges hervorgerufen worden zu sein.

Bei den Abdichtungsmassen, die eine hohe Druckfestigkeit erreichten, trat dieser Effekt nicht auf. Die Strömung entlang der Kontaktflächen lässt sich in diesem Fall auf sekundäre Wegsamkeiten im Grenzbereich der Kontaktflächen zu den Ausbauten zurückführen (s. Bild 3). Ursache für die Ablösung der Abdichtungsmassen an den Kontaktflächen können in minimalen Schwindvorgängen der Abdichtungsmassen während der Hydratation gesehen werden.



**Bild 3: Einfärbungen der inneren Kontaktfläche auf der ganzen Länge (Versuch Nr. 8, aufgrund der hohen Druckfestigkeit wurden die Abdichtungsmassen beim Ausbau aus den Behältern weitgehend zerstört)**

### **3.2.3 Einfluss des Verpressvorganges**

Die Auswirkungen des Verpressvorganges auf die Wirksamkeit der Abdichtungssysteme werden bei alleiniger Betrachtung der materialspezifischen Eigenschaften der Suspensionen vor und nach den Verpressarbeiten nicht direkt deutlich. Es ließ sich jedoch optisch feststellen, dass bei allen Versuchen eine Durchmischung der Suspensionen mit den Behälterfüllungen stattgefunden hat. Des Weiteren ließen sich Auswirkungen eventueller, während der Verpressarbeiten eingetretener Verzögerungen auf die Homogenität der Abdichtungsmasse feststellen. Durchmischungserscheinungen ließen sich besonders gut an den Produkten A und B nachvollziehen. Im Zuge der Verpressarbeiten wurden die Durchmischungszonen nicht restlos aus den Behältern herausgedrückt. Es standen somit in den oberen Bereichen der Abdichtungsstrecken Suspensionen mit einem erhöhten Wasser-Feststoffwert (W/F-Wert) an.

Erhöhte Wasseranteile in den Suspensionen machten sich in einem Rückgang der Druckfestigkeit und einer Erhöhung der Durchlässigkeit des Materials bemerkbar. Bei den Produkten A und B (Versuche Nr. 9 und Nr. 10) konnte dieser Sachverhalt anhand der gegenüber den Vergleichsversuchen Nr. 1 bzw. Nr. 2 wesentlich stärkeren Einfärbung der oberen Bereiche der Abdichtungsmassen nachvollzogen werden. Aufgrund des auf die Oberkante der Abdichtungsmassen beschränkten Einflussbereiches übte sich diese lokale Durchlässigkeitserhöhung jedoch nicht auf die Durchlässigkeit des Gesamtsystems im Versuchszylinder aus.

Die Entstehung von Durchmischungszonen wird durch Suspensionen niedriger Viskosität begünstigt. Danach stellten sich bei denjenigen Suspensionen die stärksten Durchmischungserscheinungen (Rückgang der Dichte und der Druckfestigkeit; Erhöhung des Absetzmaßes sowie der Filtratwasserabgabe) ein, die über eine relativ niedrige Viskosität verfügten (Produkte A und B). Dies konnte durch die Feldversuche bestätigt werden. Suspensionen hoher Viskositäten (Produkte C und D) verursachten während der Verpressarbeiten Verzögerungen im Bauablauf. Grund hierfür war das erschwerte Befüllen der Förderpumpe. Aufgrund nicht ausreichender Fließeigenschaften konnte nur ein Teil der angemischten Suspensionen in den Ringraum eingebracht werden. Der Rest musste mit Wasser verdünnt und anschließend aus dem Mischer entfernt werden. Durch diese Prozedur wurden Unterbrechungen des Verpressvorganges von bis zu 15 Minuten verursacht.

Beim Ausbau der Abdichtungsmassen aus den Behältern konnten Folgeerscheinungen dieser häufig in der Praxis vorkommenden Unterbrechungen beobachtet werden. Beim Produkt C (Versuch Nr. 4) war ca. 30 cm von der Unterkante der Abdichtungsmasse entfernt eine deutlich ausgebildete horizontale Trennfläche zu verzeichnen. Die erhärtete Abdichtungsmasse brach beim Ausbau genau an dieser Stelle auseinander. Aus der Form und der Beschaffenheit der Bruchfläche konnte geschlossen werden, dass dieser Bruch nicht Folge des Ausbaus war, er musste also schon frühzeitig entstanden sein. Beim Produkt D (Versuch Nr. 6) war im unteren Bereich eine vertikale Trennfläche in Verbindung mit Inhomogenitäten (unverfestigte Stellen) zu beobachten, die ebenfalls mit einer Unterbrechung des Verpressvorganges in Zusammenhang gebracht werden konnte.

Bei einigen Versuchen konnten erhöhte Luftdurchlässigkeiten in dem Bereich beobachtet werden, in dem während des Verpressvorganges das Verpressgestänge eingebaut war. Am deutlichsten waren Diskontinuitäten im Bereich des Verpressgestänges erneut bei den Produkten C und D (Versuche Nr. 3 bis Nr. 6) zu erkennen. Die Verzögerungen fanden dabei jeweils gegen Ende des Verpressvorganges statt. Die Suspensionen standen zu diesem Zeitpunkt ca. 1 m hoch in den Behältern. Nach Beendigung der Verpressarbeiten wurde das Verpressgestänge aus den Abdichtungsmassen ausgebaut. Aufgrund der hohen Viskosität der Suspensionen verschlossen sich die so entstandenen Hohlräume in den Abdichtungen nicht mehr vollständig von selbst, wodurch in diesen Zonen Undichtigkeiten bzw. bevorzugte Wegsamkeiten hervorgerufen wurden.

### **3.2.4 Einfluss der CMC-Konzentration**

Im Rahmen der Laborversuche wurde der Einfluss unterschiedlich konzentrierter CMC-Bohrspülungen auf die Suspension untersucht. Die Versuche zeigten eine Abhängigkeit der Wirksamkeit der Abdichtungssysteme von der Konzentration der CMC-Bohrspülungen (s. Bild 2). Ein höherer Anteil an CMC ergab in der Mehrzahl der Fälle auch eine höhere Systemdurchlässigkeit. Dies wurde auch durch die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeitsversuche und der optischen Untersuchung der Kontaktflächen bestätigt. Bei der Luftdurchlässigkeitsprüfung wurden höhere Mantelreibungen und somit bessere

Verbundwirkungen an den Kontaktflächen registriert, bei denen die Suspensionen mit den schwächer konzentrierten CMC-Bohrspülungen in Kontakt kamen. Unter der Annahme, dass gute Verbundwirkungen zu niedrigen Durchströmungen der Kontaktflächen führen, lässt sich feststellen, dass sich niedrigere CMC-Konzentrationen günstig auf die Wirksamkeit der Abdichtungssysteme auswirken.

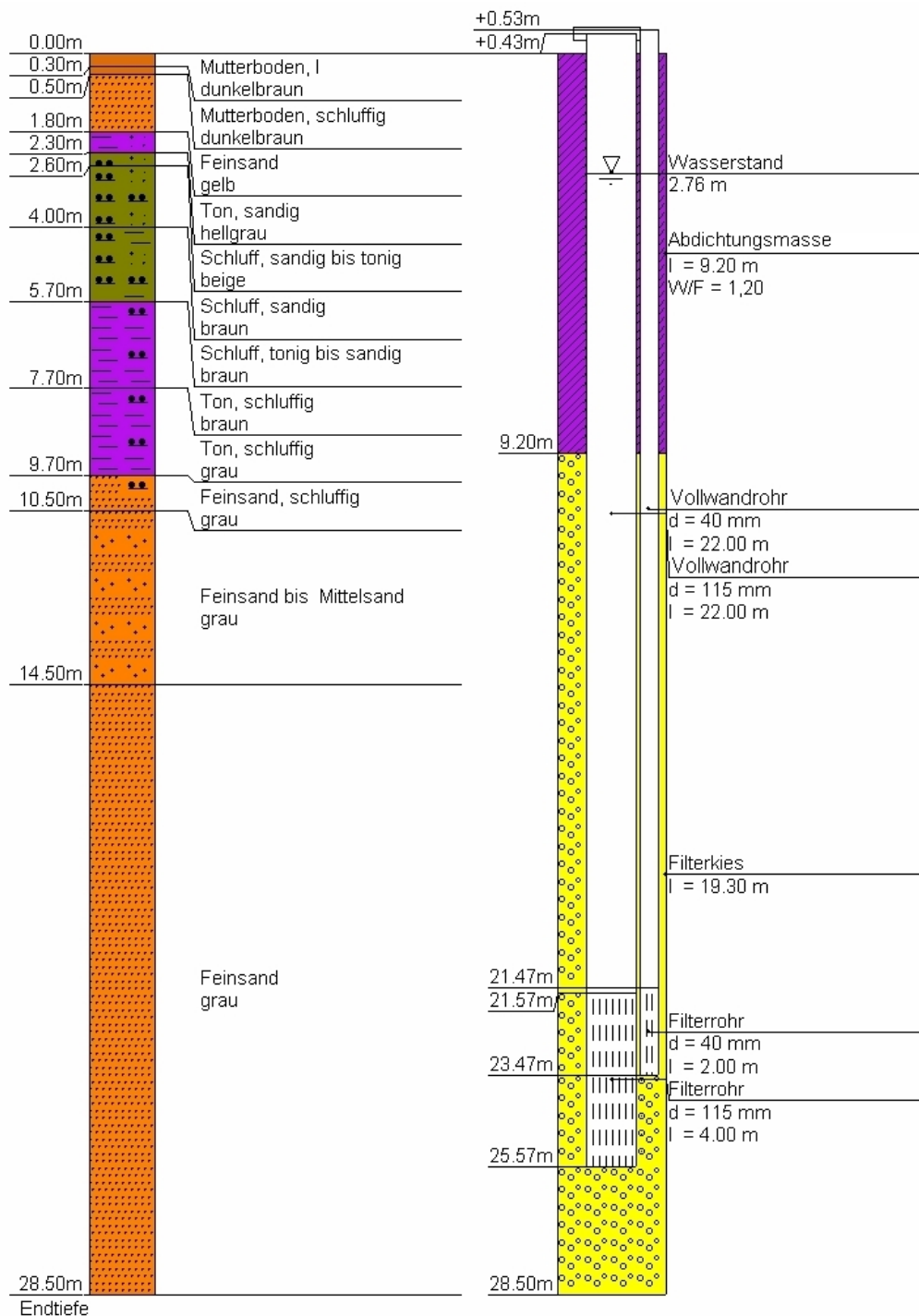
Bestätigt wird dieser Zusammenhang anhand einer Betrachtung der Farbeindringtiefen entlang der Kontaktflächen in Abhängigkeit der CMC-Konzentrationen. Danach fanden in den meisten Fällen geringere Einfärbungen statt, wenn die Suspensionen zuvor mit geringer konzentrierten CMC-Bohrspülungen in Kontakt geraten waren. Diese Abhängigkeit ist bei den einzelnen Versuchen unterschiedlich stark ausgeprägt, teilweise auch gar nicht vorhanden.

Die Mechanismen, die zu den beschriebenen Auswirkungen der unterschiedlichen CMC-Konzentration führen, sind weitgehend unklar. Es steht jedoch fest, dass die Feststoffbestandteile der Suspensionen (Tonmehle und Zemente) durch den Kontakt mit CMC-Molekülen beeinflusst werden. Zu nennen wären in diesem Zusammenhang die Verlangsamung der Hydratation des Zementes und die Reduzierung der Wasseraufnahmekapazität der Tonminerale. Weiterhin ist von einem gewissen Schmiereffekt durch die Anhaftung der CMC-Moleküle an den Kontaktflächen (Ausbauverrohrung, Bohrloch- bzw. Behälterinnenwand) auszugehen. Inwieweit diese Schmierschicht die Bildung wasserdurchlässiger Wegsamkeiten entlang den Kontaktflächen beeinflusst, kann nicht beurteilt werden.

## **4 Feldversuche**

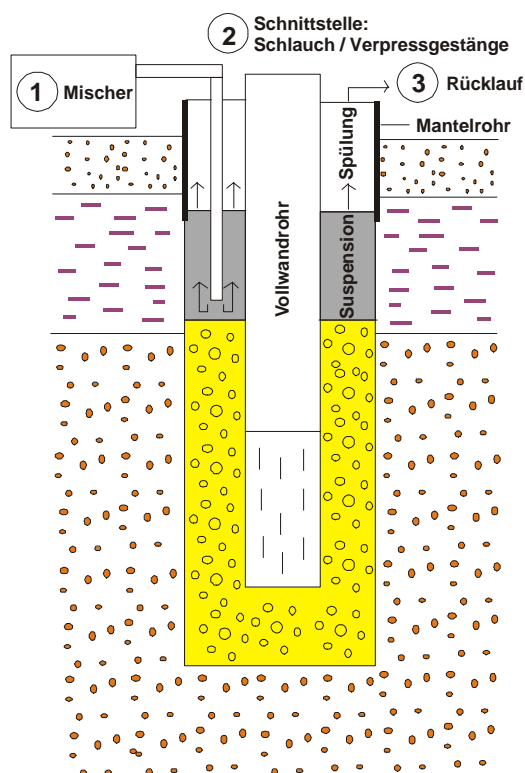
### **4.1 Versuchsdurchführung**

Zur weiteren Untersuchung der Abdichtungssuspensionen wurden fünf Versuchsbrunnen auf dem Gelände des Bau-ABC Rostrup in die anstehenden quartären Lockergesteine bis in eine Tiefe von jeweils 28,5 m unter GOK abgeteuft und ausgebaut. Die Ringräume der Versuchsbrunnen wurden jeweils mit einem der untersuchten Produkte im Kontraktor-Verfahren von der Basis des Grundwasserstauers im Hangenden des zur Grundwasserfassung vorgesehenen Grundwasserleiters bis zur Geländeoberkante verpresst (s. Bild 4).



**Bild 4: Bohrprofil und Ausbau am Beispiel des Versuchsbrunnens 3**

Beim Verpressvorgang wurden Suspensionsproben zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Entnahmestellen zwischen Mischer und Rücklauf gewonnen (s. Bild 5) und jeweils Messungen zu Dichte, Marsh-Zeit, Absetzmaß und Druckfestigkeit durchgeführt. Außerdem wurden Rückstellproben für weitere Labortests gewonnen.



**Bild 5: Prinzipskizze der Probennahmepunkte (Probe 1: Direkt aus dem Mischer, unmittelbar nach dem Anmischen der ersten Charge; Probe 2: An der Schnittstelle Schlauch/Verpressgestänge; Probe 3a: Nach einem deutlichen Farbumschlag von Spülungsfarbe (farblos bis hellbraun) zu Suspensionsfarbe (grau oder beige); Probe 3b: Nach Verpressen der berechneten theoretischen Verpressmenge; Probe 3c: Nach Erreichen der Ausgangsdichte (s. Probe 1))**

Geophysikalische Untersuchungen wurden im offenen Bohrloch und in den Brunnen zu verschiedenen Bauphasen durchgeführt. Abschließend erfolgte eine Kontrolle der Ringraumabdichtung über diverse bildgebende indirekte Messverfahren sowie eine neuartige Messmethode, bei der Wegsamkeiten über den Aufstieg von Stickstoffgas im Ringraum nachgewiesen werden sollten (s. Abschnitt 4.3).

Farbtracerversuche an den fünf Versuchsbrunnen sollten diese Ergebnisse zumindest für den jeweils untersuchten Bereich des oberen halben Meters der Abdichtungsstrecke unterstützen und visualisieren (s. Abschnitt 4.2.5).

## 4.2 Versuchsergebnisse und deren Interpretation

### 4.2.1 Vorbemerkungen

Die im Rahmen der Feldversuche durchgeführten Untersuchungen haben bezüglich des Verhaltens der verwendeten Suspensionen und der daraus hergestellten Ringraumabdichtungen zu einer Reihe von neuen Erkenntnissen geführt. Diese betreffen den Umgang mit Suspensionen auf der Baustelle, die Entwicklung und Beeinflussung von Materialeigenschaften der Suspensionen, die beobachteten Setzungen der verpressten Suspensionen sowie die hydraulische Wirksamkeit des Systems Ringraumabdichtung und seine potenziellen Schwachstellen.

#### 4.2.2 Entwicklung und Beeinflussung der Materialeigenschaften einer Suspension

Die fünf untersuchten Produkte haben sehr unterschiedliche physikalische Eigenschaften. Klar erkennbare Korrelationen zwischen den Materialeigenschaften der Suspension und der Wirksamkeit der Ringraumabdichtung zeichneten sich über die durchgeführten Einzelversuche nur bedingt ab.

Der W/F-Wert ist bei gegebenem Feststoff die entscheidende Steuerungsmöglichkeit der Eigenschaften der frischen und der erhärteten Suspension. Eine optimale Einstellung des W/F-Wertes ist daher unbedingt erforderlich. Der W/F-Wert einer Suspension alleine sagt aber noch nichts über ihre physikalischen und hydraulischen Eigenschaften im Ringraum aus. Entscheidend hierfür ist bei gegebenem W/F-Wert die Zusammensetzung des Feststoffs.

**Tabelle 3: Kenndaten zum Verpressen der Versuchsbrunnen**

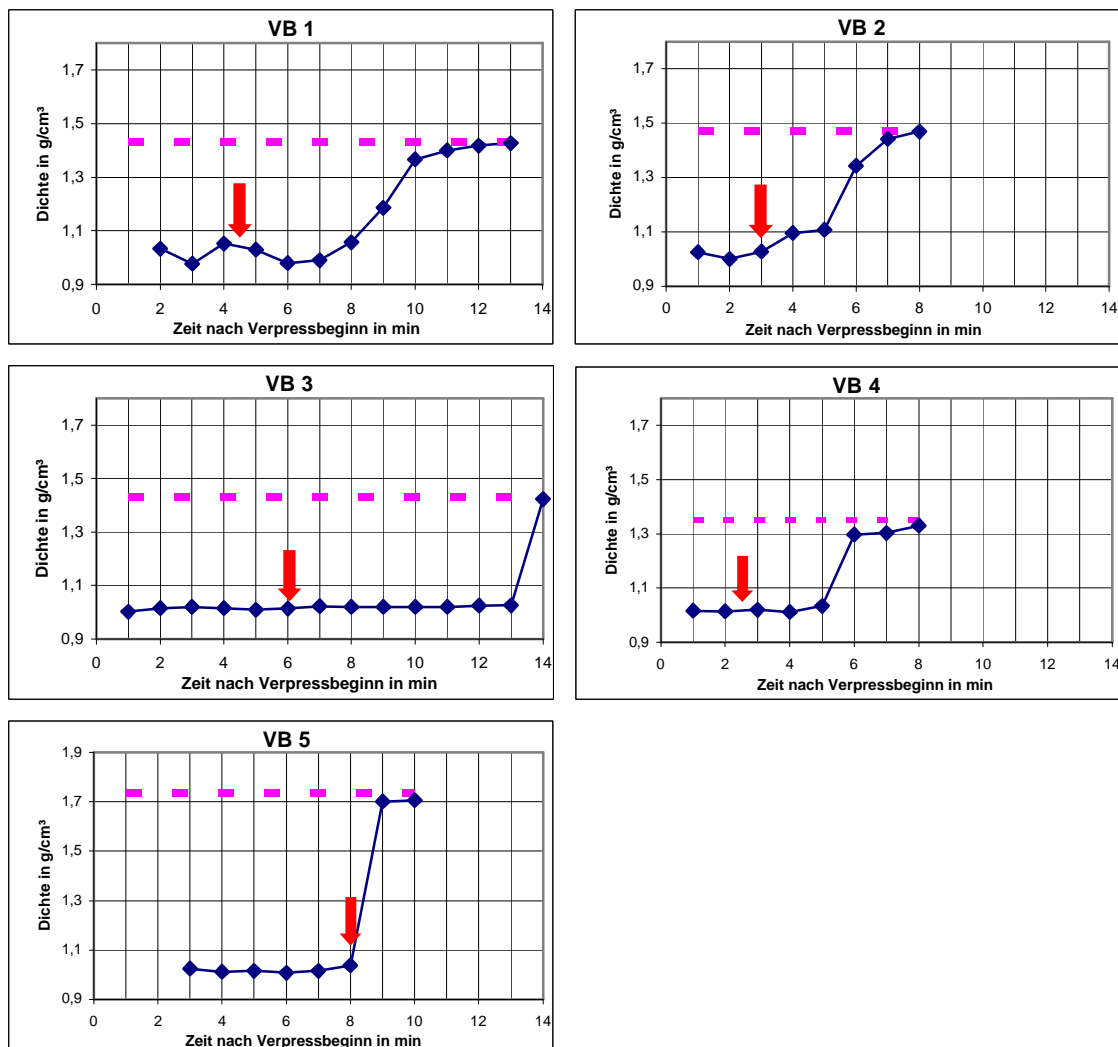
Kenndaten	VB 1	VB 2	VB 3	VB 4	VB 5
Produkt	A	B	C	D	E
Vom Hersteller empfohlener W/F-Wert	0,80	0,80	1,20	1,54	0,50
Auf der Versuchsbaustelle eingesetzter W/F-Wert	0,91	0,91	1,20	1,54	0,60
Verpressstrecke insgesamt	14,5 m	9,5 m	10,4 m	8,3 m	15,0 m
Theoretische Verpressvolumen	538 l	372 l	407 l	325 l	633 l
Tatsächliche Verpressvolumen	700 l	475 l	410 l	426 l	670 l
Zeit bis Farbumschlag	~ 4 - 5 min	~ 3 min	~ 6 min	~ 2 - 3 min	~ 8 min
Zeit bis Konsistenzänderung	~ 10 min 30 s	~ 7 min	~ 14 min 30 s	~ 6 min 20 s	~ 8 min 30 s

Qualitative Veränderungen der frischen und der erhärteten Suspension sind vom Wassergehalt abhängig und über die durchgeführten Materialprüfungen (Dichte, Marsh-Zeit, Absetzmaß, Druckfestigkeit) gut quantifizierbar. Die einfachste Kontrollmöglichkeit zur produktspezifischen W/F-Wert-Einstellung der Suspension auf der Baustelle ist die Dichtemessung. Die Messung der Marsh-Zeit war bei den untersuchten Produkten, wegen der verschiedenen Materialeinflüsse auf die Messergebnisse (z. B. zu hohe Viskositäten einzelner Produkte) nicht oder nur sehr bedingt geeignet. Die Messung von Absetzmaß und Druckfestigkeit eignet sich als nachträgliche Kontrollmöglichkeit und zur Beweissicherung über Rückstellproben. Der im Rücklauf beobachtete Farbumschlag kann keinesfalls als Kriterium für den Zeitpunkt des Verpressstopps dienen, da er nicht dem Zeitpunkt der vollständigen Füllung des Ringraums mit der eingebrachten Suspension entspricht.

Die Aufstiegscharakteristik ist abhängig von der Viskosität der Suspension: Je niedriger viskos die Suspension ist, desto mehr Durchmischung mit der Spülung findet statt, je höher viskos die Suspension ist, desto klarer ist die aufsteigende Suspensionsfront im Ringraum von der verdrängten Spülung abgegrenzt.

Eine Durchmischungszone mit der Spülung bildet sich in jedem Fall aus. Sie ist erkennbar über eine Dichte-Messung des im Rücklauf austretenden Materials und den Vergleich mit der im Vorfeld zu ermittelnden Dichte der optimal angemischten Suspension im Vorlauf. Die Durchmischungszone ist im Idealfall durch zusätzlich eingebrachte Suspension zu verdrängen.

Nur die Dichte-Messung im Rücklauf ist geeignet als Kriterium zur Festlegung des Verpress-Stopps (s. Bild 7) und zur Bestimmung des Zeitpunktes, an dem der Ringraum eine „homogene“ Suspensionssäule aufgenommen hat.



**Bild 7: Entwicklung der Suspensionsdichten der Versuchsbrunnen 1 bis 5 (gestrichelte Linie: Ausgangsdichte im Mischer; durchgezogene Linie: Dichte im Rücklauf; Pfeil: erkennbarer Farbumschlag beim Verpressen)**



### 4.2.3 Setzungen

Nach Abschluss des Verpressvorganges wurde in allen Versuchsbrunnen eine vergleichbare Größenordnung der Setzung des Suspensionskörpers beobachtet (s. Tabelle 4 und Bild 8). In einem Zeitraum von nur wenigen Stunden nach dem Verpressen war die Suspension schon deutlich unter die Geländeoberkante abgesackt. Es ist daher davon auszugehen, dass der Großteil der beobachteten Setzungen unmittelbar im Anschluss an den Verpressvorgang und spätestens während der ersten Stunden nach Beendigung des Verpressens erfolgt ist.

**Tabelle 4: Setzungen der Abdichtungsmasse in den Versuchsbrunnen**

	VB1	VB2	VB3	VB4	VB5
~ OK Verpressmasse unter GOK in m	1,21	0,77	0,67	1,00	1,00
Verpresshöhe über GOK in m	0,50	1,20	1,20	0,20	1,20
Setzung der Verpressmasse in m	1,71	1,97	1,87	1,20	2,20
Ursprüngliche Verpressstrecke in m	14,50	9,50	10,40	8,30	15,00
Absacken Verpressmasse zu urspr. Verpressstrecke in %	11,8	20,7	18,0	14,5	14,7



**Bild 8: Freigelegte Oberkante der Verpressmasse nach Abschluss der beobachteten Setzungen am Beispiel von VB 3**

Als Ursache für die beobachteten Setzungen kommen grundsätzlich drei Prozesse in Frage:

- Die nachträgliche Verdrängung von Spülung oder Luft aus Zwischenräumen innerhalb der Verpressmasse, die während des Verpressens selber nicht homogen

mit Suspension gefüllt wurden, sowie die nachträgliche Füllung von Auskolkungen entlang der Bohrlochwand.

- Die Infiltration von Suspension in den Porenraum des angrenzenden Lockergesteins.
- Die Abgabe von Wasser aus der Suspension und Infiltration dieses Wassers in den Porenraum des angrenzenden Lockergesteins.

Das Ausmaß der Setzungen wird im Wesentlichen durch folgende Randbedingungen gesteuert:

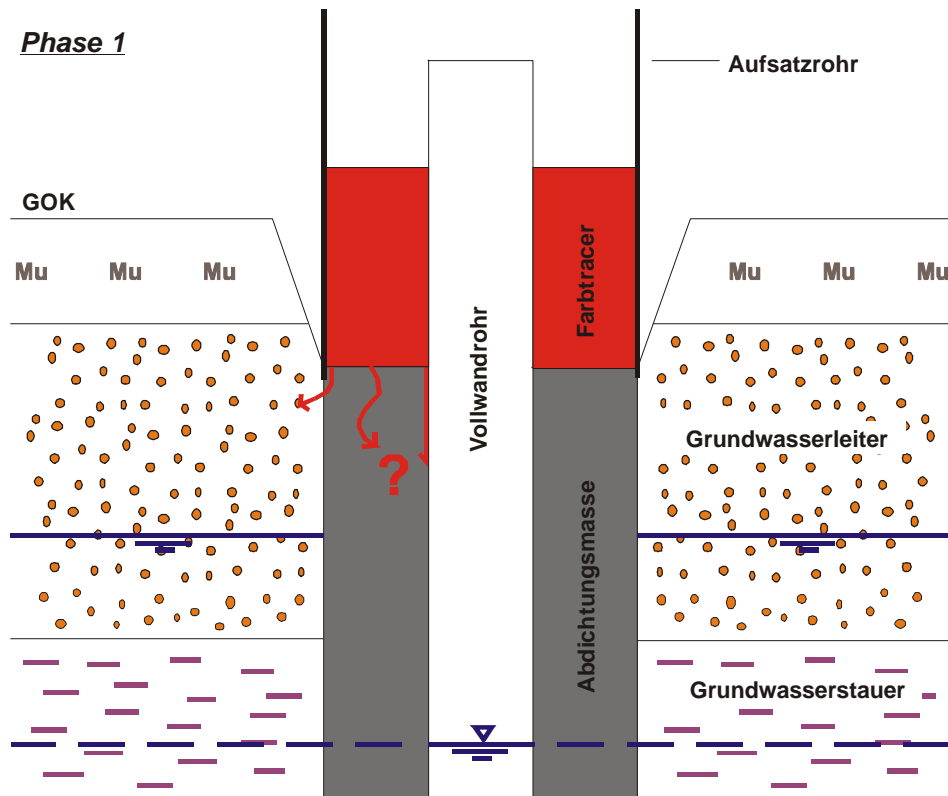
- Eigenschaften der Suspension
  - Je höher viskos eine Suspension ist, desto schwerer kann eine Infiltration in das umliegende Gebirge erfolgen. Je stabiler die Suspension ist, desto weniger neigt sie zur Wasserabgabe, und folglich wird weniger Filtratwasser freigesetzt, das relativ leicht in das angrenzende Gebirge entweichen kann.
- Angrenzendes Gebirge
  - Je größer der Porenraum und die Permeabilität des angrenzenden Gesteins ist, desto leichter können sowohl die Suspension selbst als auch das Filtratwasser in das Gebirge entweichen. Es leuchtet ein, dass eine deutlich höhere Infiltration von Suspension und Filtratwasser für den Fall eines angrenzenden Kieselgesteins als im Falle eines weniger durchlässigen Lockergesteins zu erwarten ist.
- Überlagerungsdruck (bzw. die Suspensionsdichte)
  - Es ist davon auszugehen, dass die Infiltration massiv vom Druck der auflastenden Suspensionssäule gesteuert wird. Je tiefer der betrachtete Punkt der Suspensionssäule ist, desto größer ist die zu erwartende Infiltration an diesem Punkt in das angrenzende Gebirge.
- Hydrostatischer Gegendruck aus dem Gebirge
  - Im ungesättigten Bereich kann eine Infiltration in das Gebirge leichter erfolgen, da kein Wasser verdrängt werden muss. Je höher die auflastende Wassersäule ist, desto mehr Arbeit erfordert das Verdrängen des Wassers.

Eine definitive Gefahr für die Wirksamkeit der Abdichtung besteht dann, wenn die Suspension trotz fortlaufender Wasserabgabe keine homogene Setzung durchlaufen kann. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Suspension zu schnell abbindet oder sich im Bereich der Muffenverbindungen der Rohre „aufhängt“.

Unter der Maßgabe, dass die Wasserabgabe aus der Suspension die wesentliche Ursache für die Setzungen darstellt, muss mit einer deutlichen Veränderung des W/F-Wertes der Suspension und damit auch seiner physikalischen Eigenschaften an der Kontaktfläche zum Gebirge gerechnet werden.

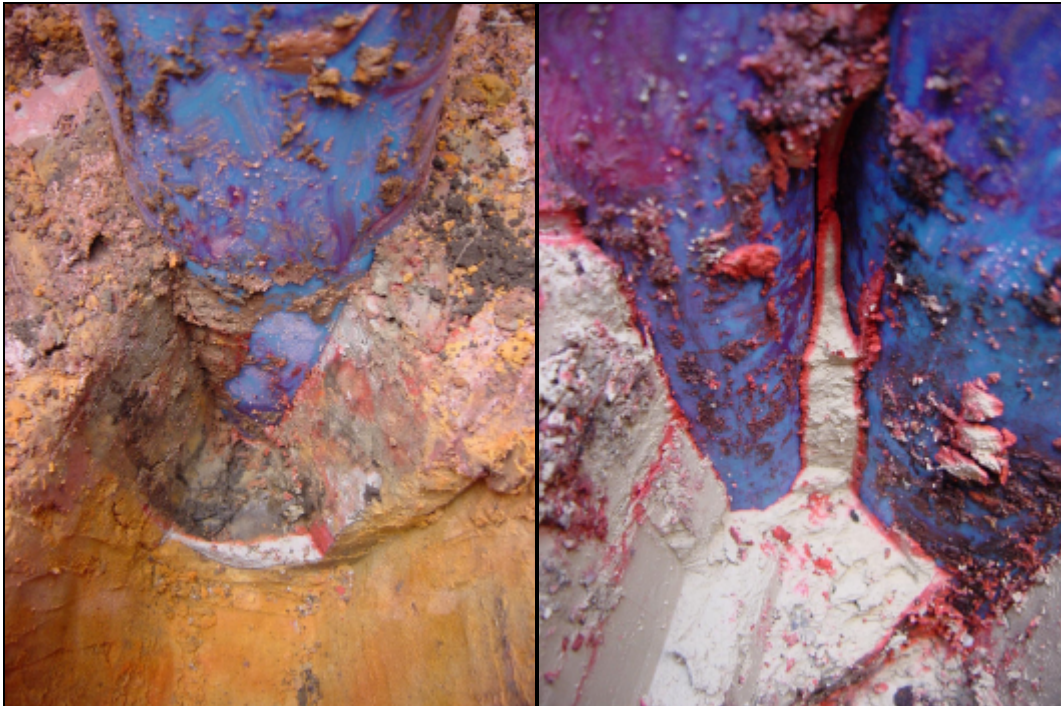
#### **4.2.4 Farbtracerversuche**

Mittels Farbtracerversuche wurden präferenzielle Fließwege im Ringraum der Versuchsbrunnen untersucht. Dabei sollte mit der in Bild 9 dargestellten Versuchsanordnung überprüft werden, inwiefern der Tracer die Abdichtungsmasse selbst bzw. die Kontaktflächen oder Inhomogenitäten als Migrationswege nutzt.



**Bild 9: Prinzipskizze der Versuchsanordnung des Tracerversuches**

Als Tracer wurde der Farbstoff Eosin gewählt. Die Tracerlösung wurde mit Hilfe eines Vollwandrohres oberhalb des zuvor freigelegten Abdichtungskörpers eingestaut und zur Versickerung gebracht. Nach dem Versickern wurde das Vollwandrohr entfernt, die Oberkante der Verpressmasse freigelegt und anschließend ein vertikaler Schnitt durch die Verpressmasse und das anliegend Gebirge bis ca. 50 cm Tiefe angelegt. In Bild 10 sind die Anschnitte und die eingefärbten Kontaktflächen bzw. Inhomogenitäten erkennbar.



**Bild 10: Stark inhomogenes Material (links), Wegsamkeit an der Grenzfläche zur Ausbauverrohrung (rechts)**

Zusammenfassend lassen sich folgende Punkte als Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Versickerungsversuchen festhalten:

- Die Abdichtungsmaterialien zeigten sich während der kurzzeitigen Belastung des Tracerversuches als dicht. Die Materialdurchlässigkeit ist in Anbetracht der sich bietenden präferenziellen Fließwege für Sickerwässer nicht von Bedeutung.
- Eine wesentliche Schwachstelle des Systems bilden Inhomogenitäten und Risse im Material.
- Niedriger viskose Suspensionen scheinen anfälliger für die Ausbildung von Inhomogenitäten zu sein. Möglich ist aber auch, dass deren beobachtete Häufung mit einer verstärkten Wasserabgabe aufgrund der in den Versuchen zum Teil zu hoch angesetzten W/F-Werte verbunden ist.
- Harte, relativ spröde Materialien scheinen anfälliger für wasserwegsame Rissbildungen im Material zu sein als plastische Materialien.
- Die signifikanteste Schwachstelle der Abdichtung ist die Grenzfläche Verpressmasse-Ausbauverrohrung. Aufgrund einer mangelhaften Anbindung der Verpressmasse an das glatte PVC-Rohr ergibt sich in diesem Bereich eine ideale Wegsamkeit für Flüssigkeiten, die sich schon bei den verhältnismäßig niedrigen angewandten Überlagerungsdrücken deutlich zeigte.
- An der Grenzfläche zum umliegenden Lockergestein scheint sich zumindest für den vorliegenden Fall eines angrenzenden Feinsandes keine präferenzielle Wegsamkeit für Sickerwässer auszubilden. Es ist allerdings nicht gesichert, ob dies auch für andere Gesteinstypen gilt.

## 4.3 Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen

### 4.3.1 Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften des Grundwasserleiters und zur qualitativen Einschätzung der Abdichtwirkung der verschiedenen Suspensionen wurden die Versuchsbohrungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten geophysikalisch vermessen. Dafür war es erforderlich, zuerst die geologischen Verhältnisse und den Aufbau sowie den Zustand der fertig gestellten Brunnen zu klären.

Folgendes Messprogramm wurde durchgeführt:

- Vermessung der Aufschlussbohrung zur Bestimmung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Bohrlochgeometrie (Kalibermessung; elektrische Widerstandsmessung mit Kleiner und Großer Normalen; fokussierte elektrische Widerstandsmessung; Messung der natürlichen Gammastrahlung; dichtekalibrierte Gamma-Gamma-Messung; Neutron-Neutron-Messung)
- Ausbau-Nullmessung nach Rohreinbau ohne Hinterfüllung des Brunnenrohrstranges zur Kontrolle der Rohrtour und zur Normierung der geophysikalischen Ringraummessungen im zu vermessenden fertig ausgebauten Brunnen (fokussierte elektrische Widerstandsmessung; Induktionslog; Gamma-Messung; dichtekalibrierte Gamma-Gamma-Messung, kurzer/langer Sondenabstand; Neutron-Neutron-Messung)
- Statische bohrlochgeophysikalische Ausbaukontrolle zur Einschätzung des Rohrzustandes und der Lagerungsverhältnisse im Ringraum (Kalibermessung; fokussierte elektrische Widerstandsmessung; Induktionslog; Gamma-Messung; dichtekalibrierte Gamma-Gamma-Messung, kurzer/langer Sondenabstand; dichtekalibrierter Gamma-Gamma-Ringraumscanner, Neutron-Neutron-Messung)
- Kombinierte geophysikalische und gasdynamische Untersuchung zur Überprüfung der Durchlässigkeit der Abdichtung im Ringraum. Dazu wurde Stickstoff über das Filterrohr in den Ringraum geleitet und das Aufsteigen und die Ausbreitung des Gases in vorgegebenen Zeitintervallen mit verschiedenen geophysikalischen Messverfahren aus dem Brunnenrohrstrang heraus verfolgt (Induktionslog; mehrere zeitlich gestaffelte Neutron-Neutron-Messungen; dichtekalibrierter Gamma-Gamma-Ringraumscanner). Die eingesetzte Verfahrenskombination stellt eine im Versuchsstadium befindliche Neuheit dar. Auf Grund der hohen Empfindlichkeit der Gamma-Gamma-Messung gegenüber Dichteänderungen (Wasser wird durch Gas verdrängt) bzw. der Neutron-Neutron-Messung gegenüber Wassergehaltsänderungen, gelingt hiermit auch der Nachweis sehr geringer Gasmengen. Ein „Durchbrechen“ der eingeleiteten Gase im Bereich der hydraulischen Sperre, auch in geringen Mengen, kann durch diese Messverfahrenskombination zuverlässig erkannt werden.

### 4.3.2. Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen

Die Suspensionen lassen sich in allen untersuchten Bohrungen klar abgrenzen. Die aus den geophysikalischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse zur Charakterisierung der zu testenden Suspensionen lassen sich wie folgt zusammenfassen (s. Tabelle 4):

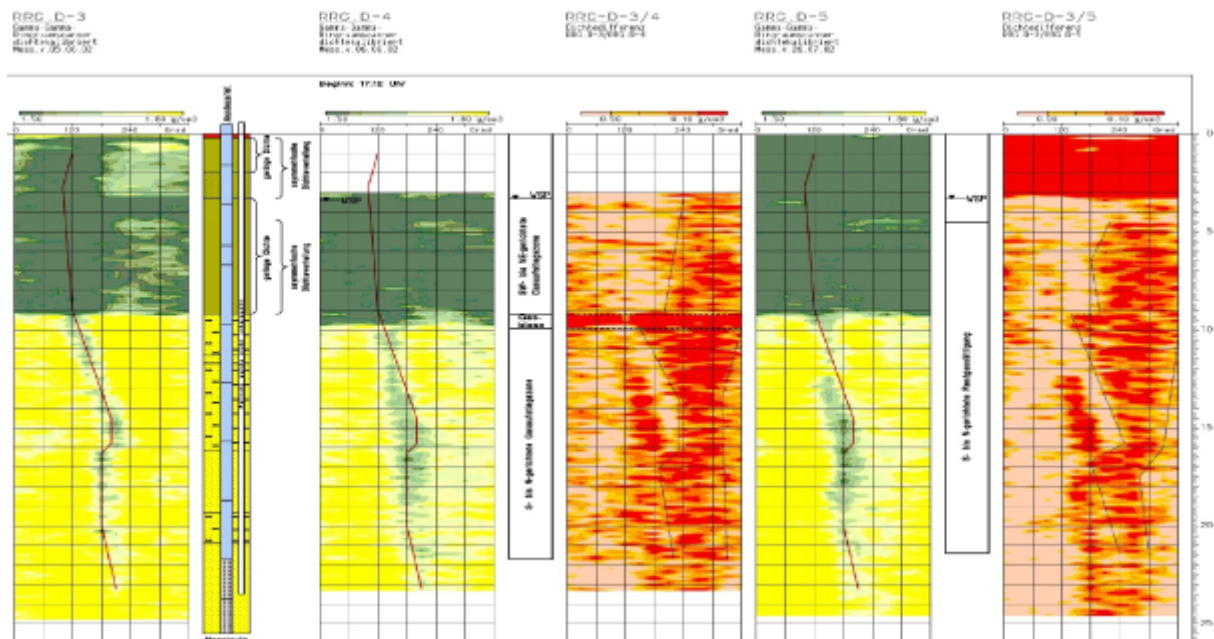
**Tabelle 4: Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen**

	Natürliche Gammastrahlung in API	Relative Ringraum-dichte in g/cm <sup>3</sup>	Wasseranteile im Ringraum		Wasseranteil der Feststoffmatrix in %	Bemerkungen
			GG.WR in %	NN.WR in %		
<b>VB 1</b>	30 – 35	1,30 - 1,90	43 - 80	70 – 92	5 - 25	sehr inhomogen schwach plastisch mittlere bis hohe Festigkeit
<b>VB 2</b>	30 – 35	1,37 – 1,60	70 – 80	80 – 89	5 – 10	mittlere Homogenität schwach bis mittlplastisch mittlere Festigkeit
<b>VB 3</b>	45 – 70	1,20 – 1,30	88 – 92	90 – 96	0 – 8	relativ homogen hoher Wassergehalt hohe Plastizität geringe Festigkeit
<b>VB 4</b>	45 – 70	~1,20	87	95	5 – 10	Aufsatzrohre streckenweise an Bohrlochwand anliegend relativ homogen hohe Plastizität hoher Wassergehalt geringe Festigkeit
<b>VB 5</b>	45 – 60	1,57 – 2,00	43 – 70	74 – 82	(5) – 38	relativ inhomogen hohe Festigkeit geringe Plastizität stellenweise Auflockerung an den Rohraußenwandungen

Bemerkenswert ist, dass die Suspensionen im Ringraum vielfach erhebliche Inhomogenitäten aufwiesen.

Auf der Grundlage der kombinierten bohrlochgeophysikalischen und gasdynamischen Untersuchungen ist es weitgehend gelungen, die Ringraumdurchlässigkeit im Bereich der Abdichtungen zu beurteilen. Als besonders aussagekräftig erwiesen sich die räumlichen Messungen des Ringraumscanners (s. Bild 11) und die Neutron-Neutron-Messungen.



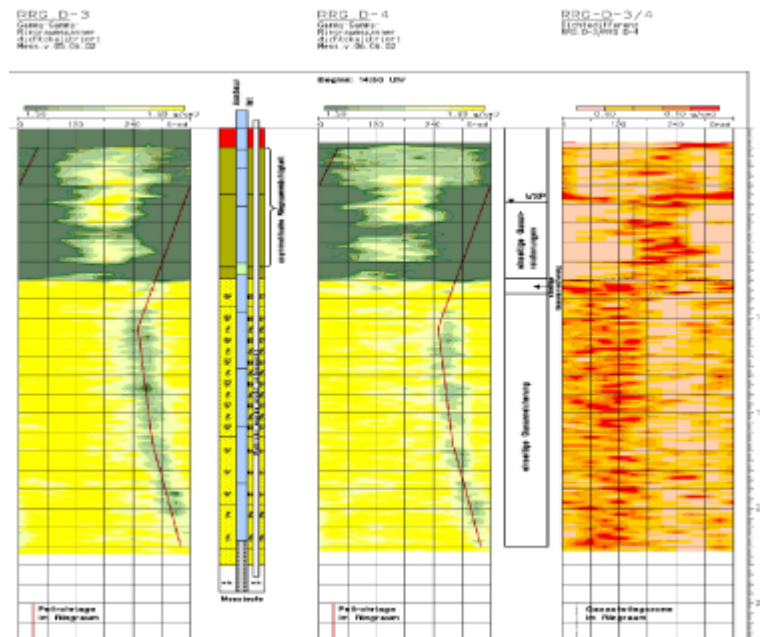


**Bild 11: Ringraumscannermessung am Beispiel des VB 3 (links: Dichteverteilung nach Aushärten des Suspension („Nullmessung“) mit deutlicher Dichteinhomogenität des Peilrohres (rote Linie); mitte: Dichteverteilung ca.1 h nach Stickstoffverpressung und Differenzbild zur Nullmessung; rechts: Dichteverteilung 7 Wochen nach der Stickstoffverpressung und Differenzbild zur Nullmessung)**

In allen untersuchten Aufschlüssen ist der verpresste Stickstoff im Ringraum bis zur Wasserspiegeloberfläche aufgestiegen, wobei die Aufstiegsgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich waren. Zum einen war das eingeleitete Gas nach sieben Wochen noch nicht vollständig abgebaut (Bohrung VB 1 und VB 5) während in der Bohrung VB 4 nach einer Stunde nur noch Gasreste nachweisbar waren. Die Ursache hierfür war, dass die Vollwandrohre direkt an der Bohrungswand anliegen und somit nur unvollständig gegen das Gebirge abgedichtet wurden (vgl. Bild 12 linke Abbildung).

Der Aufstieg des eingeleiteten Stickstoffes im suspensionserfüllten Ringraum erfolgte in allen untersuchten Bohrungen auf seitlich begrenzten vertikalen Aufstiegsbahnen, die sich mittels des Ringraumscanners sehr gut nachweisen ließen.

Die Kontaktflächen zwischen Ausbauperforierung und Abdichtungskörper zeichnen sich als potenzielle Wasserwegsamkeiten auch durch die Messergebnisse der Bohrlochgeophysik ab. Nicht ausgehärtete Abdichtungsmassen, wie z. B. in der Versuchsbohrung 2, sind ebenfalls identifizierbar.



**Bild 12: Ringraumscannermessung am Beispiel des VB 4 (links: Dichteverteilung nach Aushärten der Suspension („Nullmessung“) mit deutlicher Dichteinhomogenität; rechts: Dichteverteilung nach der Stickstoffverpressung und Differenzbild zur Nullmessung)**

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Ergebnisse der Labor- und Feldversuche konnten die unterschiedlichen Einflussnahmen des Verpressvorganges, des Kontaktes der Suspensionen mit CMC-Bohrspülungen unterschiedlicher Konzentration und der Zusammensetzung der Abdichtungsmassen auf die Systemdurchlässigkeit und damit auf die Wirksamkeit von Ringraumabdichtungen festgestellt und zum Teil quantifiziert werden.

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse für die Planung und Baustellenpraxis zusammengefasst:

- In Abhängigkeit der materialspezifischen Eigenschaften ergaben sich Unterschiede hinsichtlich der Verarbeitbarkeit der Suspensionen. Insbesondere bei hohen Viskositäten traten im Zusammenhang mit einer nicht optimalen Geräteausstattung (Mischer/Pumpe) Probleme und Arbeitsunterbrechungen auf, die zu der Ausbildung von Diskontinuitätsflächen und somit zu einer Einschränkung der Wirksamkeit der Abdichtungen führten.
- Es entstanden in allen Fällen Durchmischungszonen im oberen Bereich der Abdichtungen. Die Ausprägungen waren dabei sehr unterschiedlich. Niedrige Viskositäten der Suspensionen begünstigen die Entstehung von Durchmischungszonen, in denen sich Bohrfeld, Nachfall und Suspensionsmasse zu einem inhomogenen Gemisch vereinigen.
- Es besteht eine signifikante Beeinflussung der Wirksamkeit der Abdichtungssysteme von der CMC-Konzentration der Bohrspülung. Dabei wirkten sich niedrige CMC-Konzentrationen mehrheitlich günstiger auf die Wirksamkeit der Abdichtungen aus als höhere CMC-Konzentrationen. Aufgrund stärkerer Durchmischungszonen bei den Suspensionen mit niedrigen Viskositäten waren in diesen Fällen auch die Auswirkungen der CMC-Spülungen deutlicher.
- Die Durchlässigkeiten der Verpressmaterialien selbst sind für die praktische Anwendung als „dicht“ zu bezeichnen. Druckfestere Produkte scheinen anfälliger für die Bildung von Scherrissen zu sein.



- Es traten mit Ausnahme von Ablösungen im Kontaktbereich zu den Wandflächen keine nennenswerten Schrumpfungsprozesse, aber auch keine Quellvorgänge in den Abdichtungsmassen auf.
- Die optisch und hydraulisch festgestellten Wegsamkeiten der Systeme befanden sich entlang der Kontaktflächen der Abdichtungsmassen zur Bohrlochwand bzw. zur Ausbauperforierung. Diese Kontaktflächen stellen somit die signifikantesten Schwachpunkte des Systems dar.
- Es konnte eine Abhängigkeit der Wirksamkeit der Systeme von der Druckfestigkeit der Abdichtungsmassen festgestellt werden. Danach führten höhere Druckfestigkeiten zu niedrigeren Systemdurchlässigkeiten. Entscheidend ist hierbei die Festigkeit und Erosionsstabilität der Abdichtungsmasse im Bereich der Kontaktflächen.
- Eine Überprüfung der hydraulischen Wirksamkeit der Abdichtung im Ringraum sollte durch eine Kombination verschiedener bohrlochgeophysikalischer Verfahren nach Fertigstellung der Bohrung bzw. des Brunnens vorgenommen werden.

Für den Baustelleinsatz ergeben sich aus den Versuchen folgende Forderungen:

- Der zentrische Einbau der Ausbauperforierung ist eine notwendige Grundlage für eine funktionssichere Abdichtung.
- Vor Einbringung der Suspension ist die CMC-Konzentration im Bohrloch durch einen Spülsaustausch signifikant zu reduzieren.
- Die vom Hersteller angegebenen W/F-Werte sind in jedem Fall einzuhalten.
- Suspensionen sollten in geeigneten Anlagen kontinuierlich angemischt und eingebracht werden; Unterbrechungen im Verpressvorgang sind zu minimieren, um die Bildung von Inhomogenitäten in der Suspensionssäule zu vermeiden. Bei hochviskosen Mischungen ist der nicht mehr verarbeitbare „Rest“ im Mischer zu verdünnen und abzuschlagen. Das Einbringen dieser „Reste“ in die Verfüllstrecke des Bohrloches ist unzulässig, da hydraulisch wirksame Materialdiskontinuitäten erzeugt werden.
- Die Dichte der Suspension ist im Vor- und Rücklauf regelmäßig, zumindest chargenweise während des Verpressvorgangs zu messen. Abbruchkriterium für das Verpressen ist eine Angleichung der Dichte im Vor- und Rücklauf.
- Die Bestimmung der Viskosität ist in der Baustellenpraxis nicht notwendig, da die untersuchten Produkte zum Teil so hohe Viskositäten aufwiesen, dass sie nicht mehr mit dem Marsh-Trichter messbar waren.

Abschließend lässt sich festhalten, dass Ton-Zement-Suspensionen prinzipiell geeignet sind, Ringräume im Brunnenbau wirksam abzudichten. Es besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf, um die genannten Zusammenhänge in ihrer hydraulischen Wirkung im Brunnenbetrieb exakter beschreiben zu können.

### **Literaturverzeichnis**

BALKE et al. (2000): Grundwassererschließung.- Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 4, 740 S.; Stuttgart.

BIESKE, E. RUBBERT, W. & TRESKATIS, C. (1998): Bohrbrunnen.- 8. Aufl., 455 S.; München.

Bohrlochmessung-Storkow GmbH (2002): Bericht zu den geophysikalischen Untersuchungen in den Bohrungen und Brunnen des Objektes Rostrup (unveröffentlicht).

DVGW (1998): Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen.- DVGW-Arbeitsblatt W 135, Ausgabe November 1998; Bonn.

DVGW (2001): Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen.- DVGW-Arbeitsblatt W 123, Ausgabe Juli 2001; Bonn.

KLEEBERGER, U. (2000): Sanierung von grundwasserstockwerksübergreifend verfilterten Notbrunnen.- bbr, **3**, S. 17-19; Köln.

LENZ, J. (1989): Relining-Verfahren - Das Fließverhalten des Dämmers im Ringraum.- 3R international, **10**, S. 684-687; Essen.

RUBBERT, T. (2002): Untersuchung der Wirksamkeit von Suspensionen zur Ringraumabdichtung in Wassergewinnungsbrunnen.- Dipl.-Arbeit RWTH Aachen (unveröffentlicht).

SCHNEIDER, K.-J. [Hrsg.] (2001): Bautabellen für Ingenieure.- 14. Auflage; Düsseldorf.

THOLEN, M. (1997): Arbeitshilfe für den Brunnenbauer.- 212 S.; Köln.

TRESKATIS, C. (2001): Abdichtungen im Brunnenbau.- wwt awt, **3**, S. 47-50; Berlin.

TRIMPIN, M. (2002): Wegsamkeiten bei verpressbaren Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau.- Dipl.-Arbeit FH Oldenburg (unveröffentlicht).