

Abdichtungen

Qualitätskriterien für Abdichtungssuspensionen im Brunnenbau

Im Rahmen eines vom DVGW geförderten F&E-Vorhabens wurden zur Erstellung überprüfbarer Qualitätskriterien für Abdichtungssuspensionen Laborversuche und Vor-Ort-Untersuchungen durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse dazu werden im Folgenden vorgestellt.

Abdichtungen dienen im Brunnenbau zur Vermeidung unerwünschter Sickerwasser- und Grundwasserzuflüsse. Abdichtungsmaterialien werden entweder als Tonformlinge geschüttet bzw. als Suspensionen verpresst. Die Materialien, die heute für den Brunnenbau angeboten

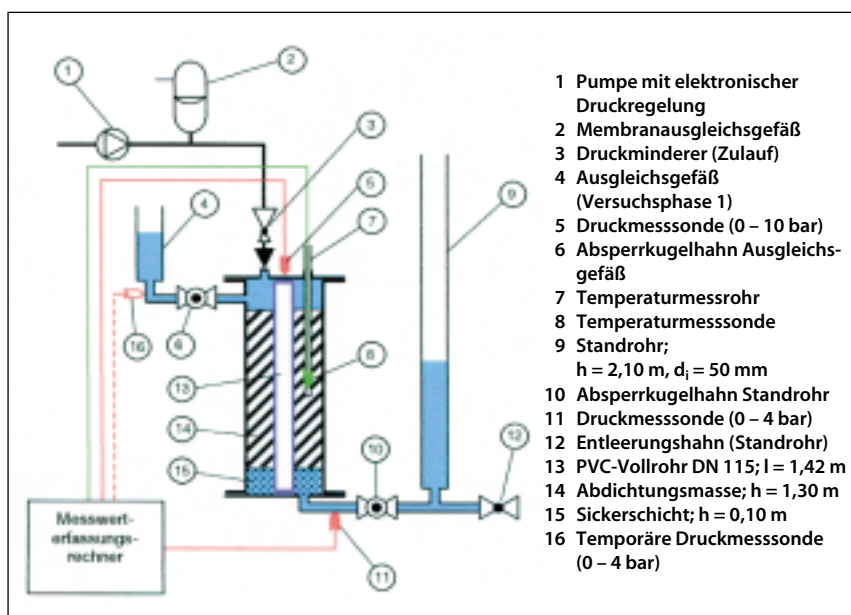
werden, werden von den Herstellern mit materialspezifischen Kenngrößen charakterisiert und beschrieben. Diese Kenngrößen beziehen sich jedoch auf Modellrezepturen unter Laborbedingungen ohne Berücksichtigung der Einwirkungen des Umgangs auf der Baustelle

und der Bohrlochrandbedingungen. Überprüfbare Qualitätskriterien und einheitliche Bewertungsmöglichkeiten der auf der Baustelle verwendeten Materialien liegen aber nur in unzureichendem Maße vor.

Mit Hilfe eines vom DVGW geförderten F&E-Vorhabens sollten nachvollziehbare und auf der Baustelle überprüfbare Qualitätskriterien für Suspensionen erarbeitet werden. Hierzu wurden Laborversuche und Vor-Ort-Untersuchungen von verschiedenen Abdichtungssuspensionen vom Ort ihrer Entstehung auf der Baustelle bis zur Aushärtung im Bohrloch durchgeführt. Neben der Beurteilung des Durchströmungsverhaltens der Abdichtungsmaterialkörper wurde die Abhängigkeit der hydraulischen Wirksamkeit des Systems „**Abdichtungskörper – innere/äußere Kontaktflächen (Ausbauverrohrung/Bohrlochwand)**“ von den jeweiligen Materialzusammensetzungen der Suspensionen in Labor- und Geländeversuchen ermittelt. Die Arbeiten wurden im Rahmen von zwei Diplomarbeiten durchgeführt (RUBBERT, 2002; TRIMPIN, 2002).

Tabelle 1: Herstellerangaben zu den physikalischen Eigenschaften der untersuchten Suspensionen

Parameter	Produkt	A	B	C	D	E
Versuche Nr.		1,90	2, 10	3, 40	5, 60	7, 80
W/F-Wert		0,80	0,80	1,20	1,54	0,50
Dichte in g/cm ³		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	



- 1 Pumpe mit elektronischer Druckregelung
- 2 Membranausgleichsgefäß
- 3 Druckminderer (Zulauf)
- 4 Ausgleichsgefäß (Versuchsphase 1)
- 5 Druckmesssonde (0 – 10 bar)
- 6 Absperrkugelhahn Ausgleichsgefäß
- 7 Temperaturmessrohr
- 8 Temperaturmesssonde
- 9 Standrohr; h = 2,10 m, d_i = 50 mm
- 10 Absperrkugelhahn Standrohr
- 11 Druckmesssonde (0 – 4 bar)
- 12 Entleerungshahn (Standrohr)
- 13 PVC-Vollrohr DN 115; l = 1,42 m
- 14 Abdichtungsmasse; h = 1,30 m
- 15 Sickerschicht; h = 0,10 m
- 16 Temporäre Druckmesssonde (0 – 4 bar)

Bild 1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Anordnung der Messwertaufnehmer.

Quelle: TRIMPIN (2002)

Ein zusammenfassender Abschlussbericht kann auf der Homepage des DVGW unter www.dvgw.de heruntergeladen werden.

1. Versuchsdurchführung

1.1 Laborversuche

Für die Bestimmung der Systemdurchlässigkeit wurde eine Versuchsanordnung mit veränderlicher Druckhöhe gemäß **Bild 1** gewählt. Dabei kamen vier Fertigmischungen (A bis D) und eine Baustellenmischung (E) mit den in **Tabelle 1** dargestellten Eigenschaften zum Einsatz.

Die Auswirkungen des Kontaktes der Abdichtungssuspensionen mit CMC-Spülungen auf die Wirksamkeit der Ringraumabdichtungen wurden durch die Befüllung der Versuchsbehälter vor dem Verpressvorgang mit praxisüblichen

0,2%igen und 0,05%igen CMC-Spülungen untersucht. Alle untersuchten Suspensionen wurden nach den Vorgaben der Hersteller in einem Kolloidalmischer aufgeschlossen. Der Verpressvorgang erfolgte über ein im Ringraum angeordnetes Verpressgestänge in Verbindung mit einer Exzentrerschneckenpumpe.

Die Versuche teilten sich in eine eintägige Erhärtungsphase und in eine insgesamt fünftägige Belastungsphase auf. 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. Zur späteren optischen Untersuchung der Wegsamkeiten innerhalb der Abdichtungssysteme wurde das zulaufende Trinkwasser eingefärbt.

Nach Abschluss der Belastungsphase wurden die Abdichtungsmassen von unten her mit Druckluft beaufschlagt. So konnten Wegsamkeiten im oberen Bereich der Abdichtungsmassen visualisiert werden. 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. Aus den Versuchen wurde deutlich, dass die Faktoren Verpressvorgang, Konzentration der CMC-Spülung und die Materialzusammensetzung der Suspensionen Auswirkungen auf die Wirksamkeit der einzelnen Abdichtungssysteme ausüben. Die unterschiedlichen Druckbelastungsstufen zeigten dagegen keine signifikanten Auswirkungen.

1.2 Feldversuche

Die Ringräume von fünf 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 (Bild 2). Die Kenndaten der jeweiligen Suspensionen sind in Tabelle 2 gelistet.

Beim Verpressvorgang wurden Suspensionsproben zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Entnahmestellen zwischen Mischer und Rücklauf gewonnen (Bild 3) und jeweils Messungen zu Dich-

te, Marsh-Zeit, Absetzmaß und Druckfestigkeit durchgeführt.

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.

Farbtracerversuche konnten die Ergebnisse der Laborversuche zumindest für den untersuchten Bereich des oberen halben Meters der Abdichtungsstrecke unterstützen und visualisieren.

2. Versuchsergebnisse und deren Interpretation

2.1 Materialzusammensetzung

Anhand der Laborversuche konnte eine **Systemdurchlässigkeit** bestimmt werden. Als Systemdurchlässigkeit wird die druckabhängige Durchströmung des Ringraumes verstanden. Bild 4 zeigt, dass unterschiedliche Systemdurchlässigkeiten je nach Abdichtungsprodukt zu beobachten waren.

Durch die Luftdurchlässigkeitsversuche wurden Mantelreibungen an den inneren Kontaktflächen zum PVC-Ausbaurohr von 2,4 kN/m² (Produkt C) bis zu 11,5 kN/m² (Produkt D) ermittelt, wobei ▶

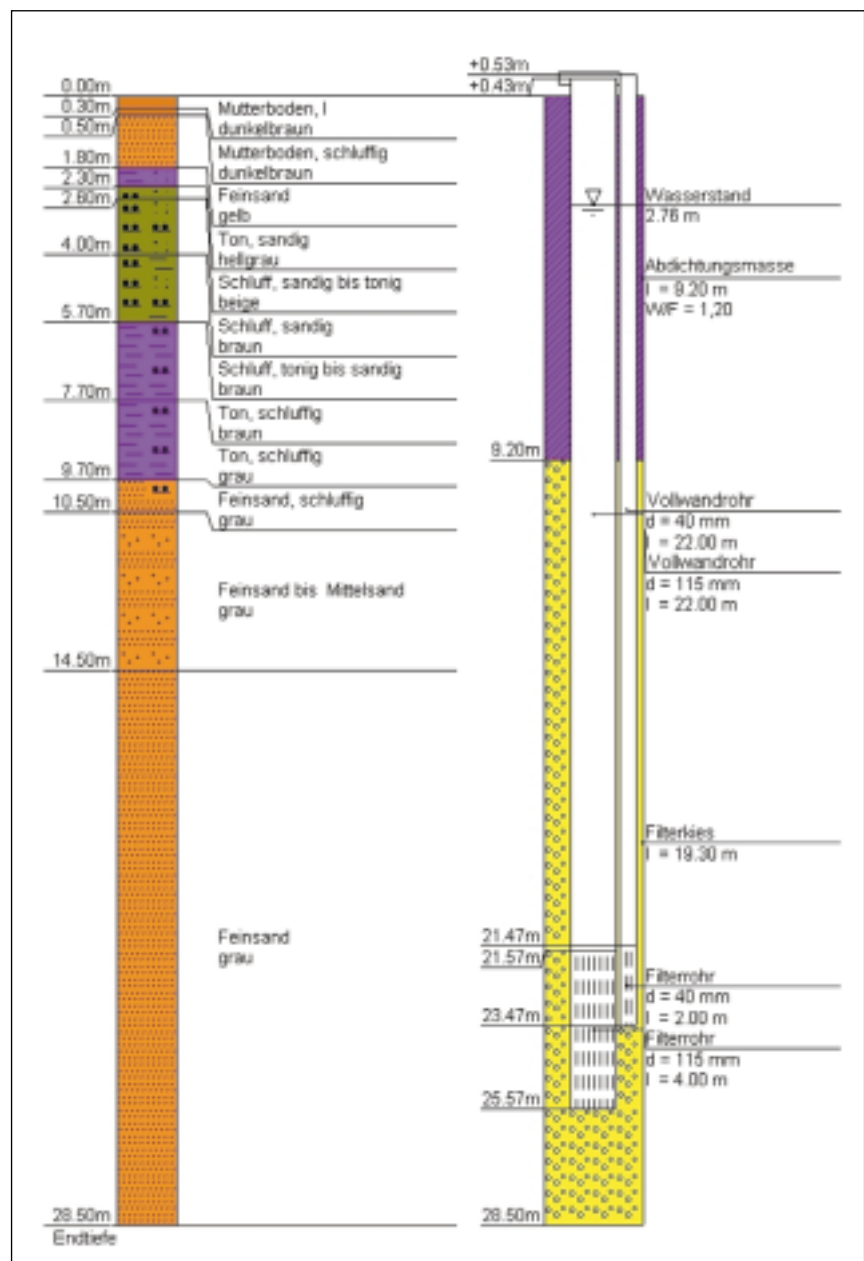


Bild 2: Bohrprofil und Ausbau am Beispiel des Versuchsbrunnens 3.

Quelle: RUBBERT (2002)

Tabelle 2: 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

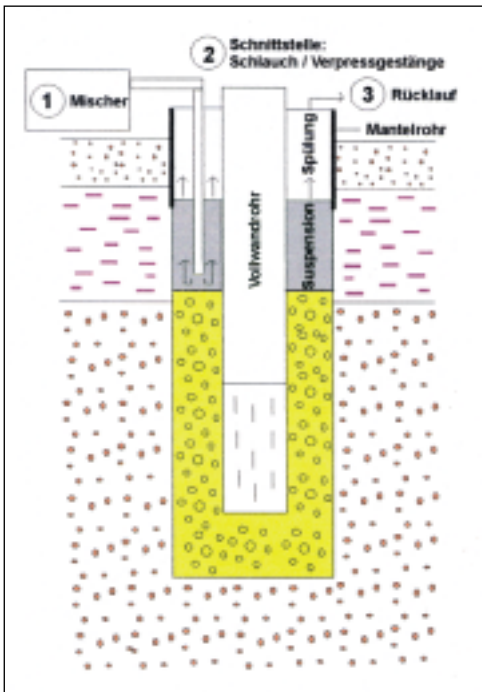


Bild 3: Prinzipskizze der Probenentnahmepunkte (Probe 1: Direkt aus dem Mischer, unmittelbar nach dem Anmischen der ersten Charge; Probe 2: An der Schnittstelle Schlauch/Verpressgestänge; Probe 3a: Nach einem deutlichen Farbumschlag von Spülungsfarbe (farblos bis hellbraun) zu Suspensionsfarbe (grau oder beige); Probe 3b: Nach Verpressen der berechneten theoretischen Verpressmenge; Probe 3c: Nach Erreichen der Ausgangsdichte (s. Probe 1)). Quelle: RUBBERT (2002)

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.

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

Ein Vergleich der materialspezifischen Eigenschaften der Suspensionen (s. **Tabelle 1**) mit den ermittelten Systemdurchlässigkeiten lässt keine direkten Abhängigkeiten erkennen. Einziger Parameter, der einen direkten Zusammenhang mit der Systemdurchlässigkeit aufzeigt, ist die einaxiale Druckfestigkeit (s. **Tabelle 3**).

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 äußeren und inneren Kontaktflächen gebunden sind.

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 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/mm² zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht wurde (s. **Tabelle 3**).

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 Kontakt-

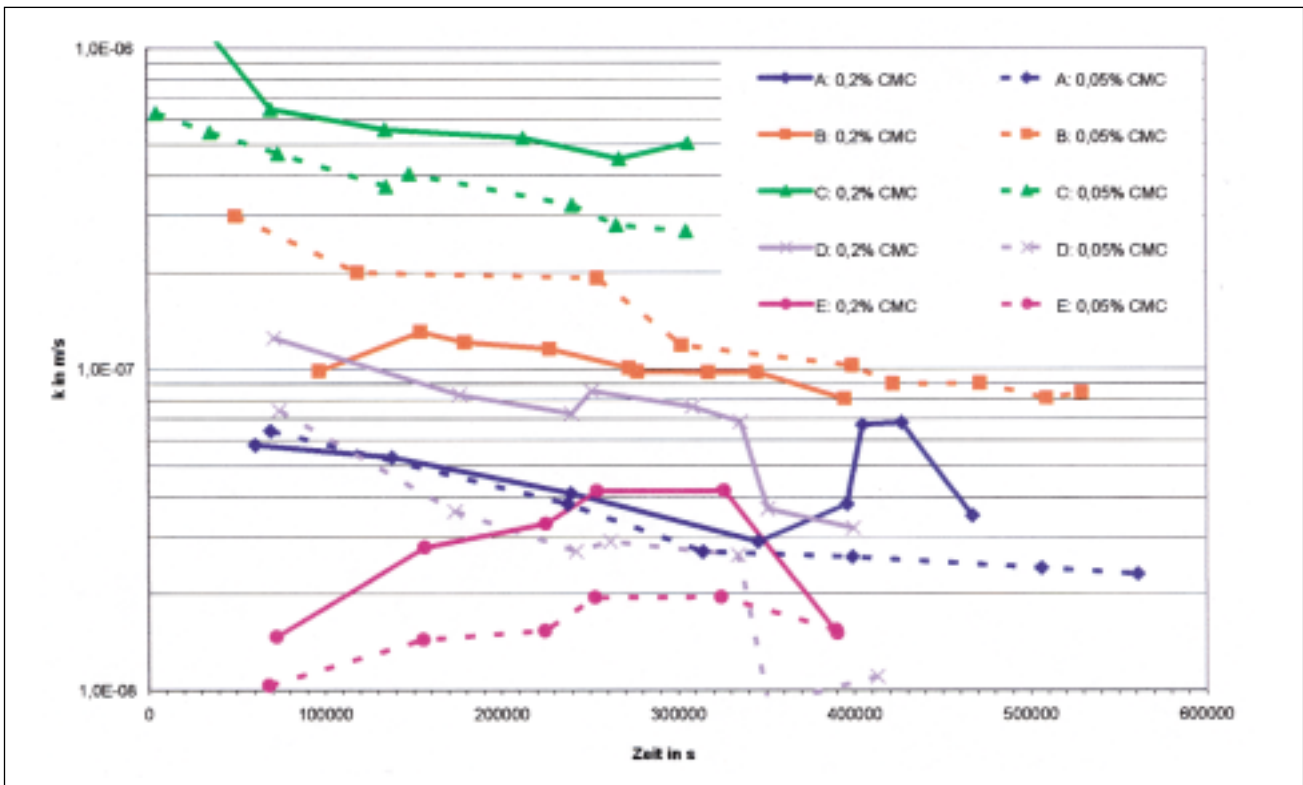


Bild 4: Vergleich der ermittelten Systemdurchlässigkeiten der Abdichtungen im Versuchsbehälter.

Quelle: DVGW

flächen wird ein Widerstand ausgeübt. Im zentralen Querschnitt des Ringraums eilt die Suspension gegenüber dem Kontaktbereich zum Brunnenrohr und zur Bohrlöcherwand 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 Grenzflächen während des Verpressvorganges hervorgerufen worden zu sein.

Bei den Abdichtungsmassen, die eine hohe Druckfestigkeit erreichten, trat dieser Effekt nicht auf. Die Wasserwegsamkeiten entlang der Kontaktflächen lassen sich in diesen Fällen auf Ablösungen der Suspensionskörper von den Kontaktflächen zurückführen. Ursache für diese Ablösung können minimale Schwindvorgänge der Abdichtungsmassen sein, die während der Hydratation hervorgerufen werden.

2.2 Verpressvorgang

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 mehr oder weniger starke 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. Die Entstehung von Durchmischungszonen wird durch Suspensionen niedriger Viskosität begünstigt. Dies konnte durch die Feldversuche bestätigt werden. Insbesondere Suspensionen hoher Viskositäten (Produkte C und D) verursachten während der Verpressarbeiten Verzögerungen im Bauablauf. Grund hierfür war das er-

schwerte Befüllen der Förderpumpe. Aufgrund nicht ausreichender Fließeigenschaften konnte nur ein Teil der angesetzten Suspensionen in den Ringraum eingebracht werden. Der Rest musste mit Wasser verdünnt und anschließend aus dem Mischer entfernt werden.

Sondier- spitzen

- DPH (SRS 15)



Boden- kappen

- von DN 50 – DN 200
- Material PP



Verschluss- kappen

- Material PA 6
- versch. Größen
- 2" – 6"



Michael Colshorn

Kirchstrasse 5
D 73240 Wendlingen

Telefon:
07024/929242
Telefax:
07024/929244

www.m-colshorn.de



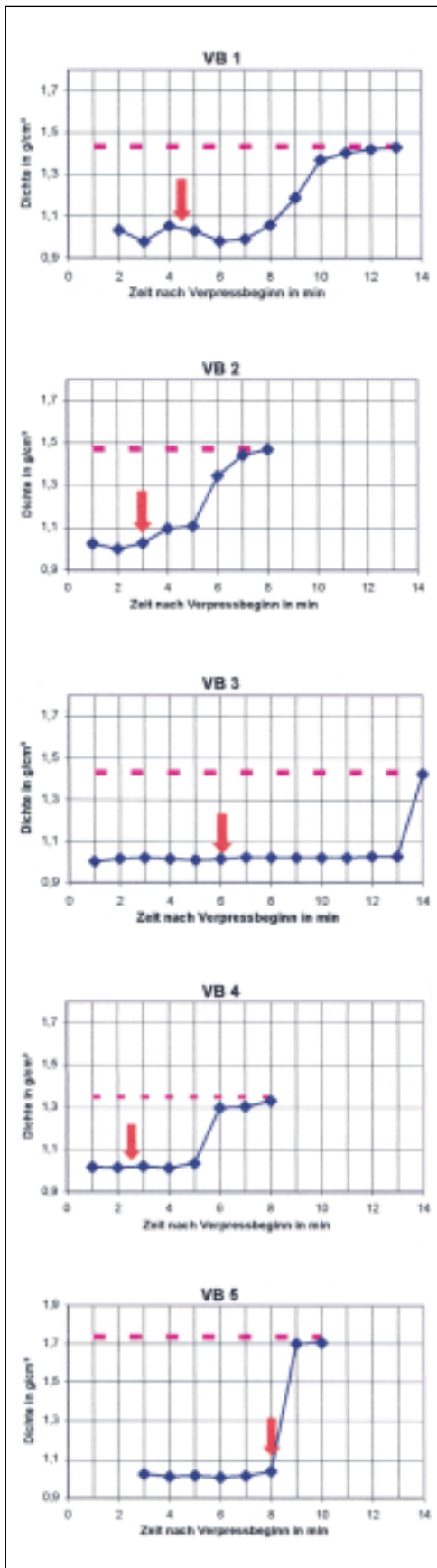


Bild 5: Entwicklung der Suspensionsdichten der Versuchsbrunnen 1 bis 5 (gestrichelte Linie: Ausgangsdichte im Mischer; durchgezogene Linie: Dichte im Rücklauf; Pfeil: erkennbarer Farbumschlag beim Verpressen).

Quelle: RUBBERT (2002)

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. Aufgrund der hohen Viskosität dieser Suspensionen verschlossen sich Hohlräume in den Abdichtungen (z. B. hervorgerufen durch das Verpressgestänge) nicht mehr vollständig von selbst, wodurch in diesen Zonen Undichtigkeiten bzw. bevorzugte Wegsamkeiten hervorgerufen wurden.

Nach Abschluss des Verpressvorganges wurde in allen Versuchsbrunnen eine Setzung des Suspensionskörpers beobachtet. In einem Zeitraum von nur wenigen Stunden nach dem Verpressen war die Suspension in allen Versuchsbrunnen mehrere Dezimeter unter die Geländeoberkante abgesackt.

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.

Qualitative Veränderungen der frischen und der erhärteten Suspension sind vom Wassergehalt abhängig und über die durchgeführten Materialprüfungen gut quantifizierbar. Die einfachste Kontrollmöglichkeit zur produktspezifischen

W/F-Wert-Einstellung der Suspension auf der Baustelle ist die **Dichte-Messung**. Die Messung der Marsh-Zeit war bei den untersuchten Produkten aufgrund der verschiedenen Materialeinflüsse auf die Messergebnisse (z. B. zu hohe Viskositäten einzelner Produkte) nicht geeignet. Die Messung von Absatzmaß 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 (Bild 5).

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 in das angrenzende Gebirge.

• **Lithologie des angrenzenden Gebirges**

- 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.

• **Überlagerungsdruck (bzw. Suspensionsdichte)**

- Es ist davon auszugehen, dass die Infiltration vom Druck der auflastenden Suspensionssäule gesteuert wird. Je tiefer der betrachtete Punkt der Suspensionssäule ist, desto größer ist die zu erwartende Infiltration von Filtratwasser 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 Gebirgswassers.

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“.

Tabelle 4: Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen

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

2.3 CMC-Konzentration

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. 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 festhalten, dass sich niedrigere CMC-Konzentrationen günstig auf die Wirksamkeit der Abdichtungssysteme auswirken.

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.

2.4 Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen

Die Suspensionen lassen sich in allen untersuchten Bohrungen durch die eingesetzten geophysikalischen Bohrlochmessungen klar abgrenzen. Die aus den geophysikalischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse zur geophysikalischen Charakterisierung der Suspensionen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Auf der Grundlage der kombinierten bohrlochgeophysikalischen und gasdynamischen Untersuchungen ist es gelungen, die Ringraumdurchlässigkeit im Bereich der Abdichtungen qualitativ zu beurteilen. Als besonders aussagekräftig erwiesen sich die räumlichen Messungen des Ringraumscanners und die Neutron-Neutron-Messungen (s. Bild 6).

Zur Überprüfung der Dichtheit der Abdichtung im Ringraum wurde Stickstoff über das Filterrohr in den Ringraum geleitet und das Aufsteigen und die Ausbreitung des Gases in Funktion der Zeit mit einem Paket geophysikalischer Messverfahren aus dem Brunnenrohrstrang heraus verfolgt. Es wurden unterschiedliche Aufstiegsgeschwindigkeiten des Stickstoffgases bis zur Grundwasseroberfläche beobachtet. So war z. B. 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. In dieser Brunnenbohrung lagen die Vollwandrohre direkt an der Bohrungswand an und der Ringraum konnte somit nur unvollständig gegen das Gebir-

ge abgedichtet werden. Der Aufstieg des eingeleiteten Stickstoffes im suspensions-erfüllten Ringraum erfolgte in allen untersuchten Bohrungen auf seitlich begrenzten vertikalen Aufstiegsbahnen, die sich mittels des Ringraumscanners sehr gut nachweisen ließen.

2.5 Farbtracerversuche

Mittels Farbtracerversuchen wurden präferenzielle Fließwege im Ringraum der Versuchsbrunnen untersucht und überprüft, inwiefern der Tracer die Abdichtungsmasse selbst bzw. die Kontakt-

AGBO GmbH
 Nienhagener Str. 1
 D-29339 Wathlingen
 Telefon: 051 44/98 99-0
 Telefax: 051 44/98 99-30
 internet: <http://www.agbo.de>
 e-mail: AGBO-D@t-online.de

Die Antwort auf bohrende Fragen:
 Rotary-Bohranlagen
 Bohrstrangkomponenten
 Kernbohr-ausrüstungen
 Rollenmeißel

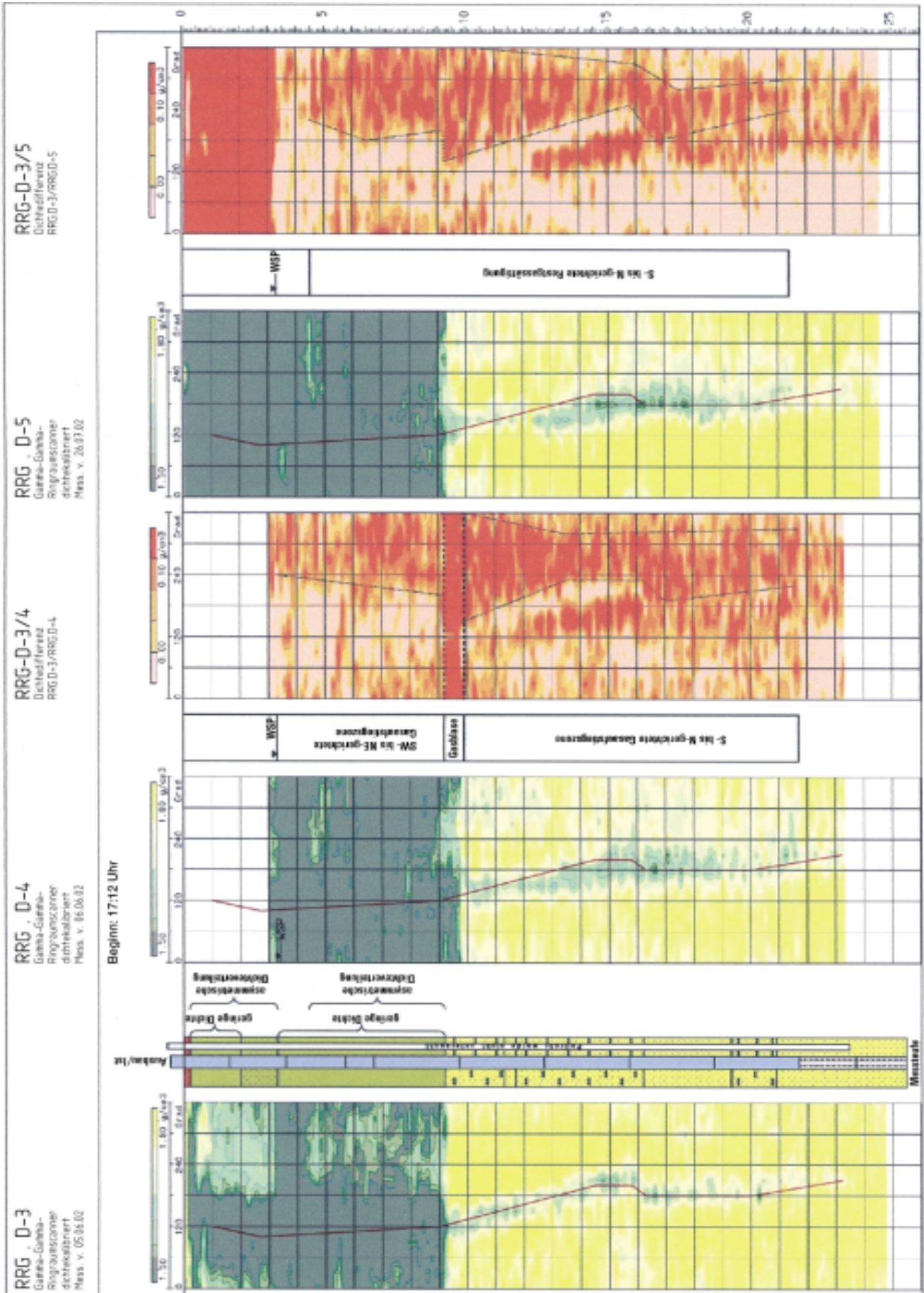


Bild 6: Ringraumschannermessung am Beispiel des VB 3 (links: Dichteverteilung nach Aushärten des Suspension („Nullmessung“) mit deutlicher Dichteinhomogenität des Peilrohres (rote Linie); Mitte: Dichteverteilung ca. 1 h nach Stickstoffverpressung und Differenzbild zur Nullmessung; rechts: Dichteverteilung 7 Wochen nach der Stickstoffverpressung und Differenzbild zur Nullmessung).

Quelle: Blm Storkow

flächen oder Inhomogenitäten im Ringraum der Versuchsbrunnen als Migrationswege nutzt. 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 anliegende Gebirge bis ca. 50 cm Tiefe angelegt (Bild 7).

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Farbtracerversuchen festhalten:

- Die Abdichtungsmaterialien selbst 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.

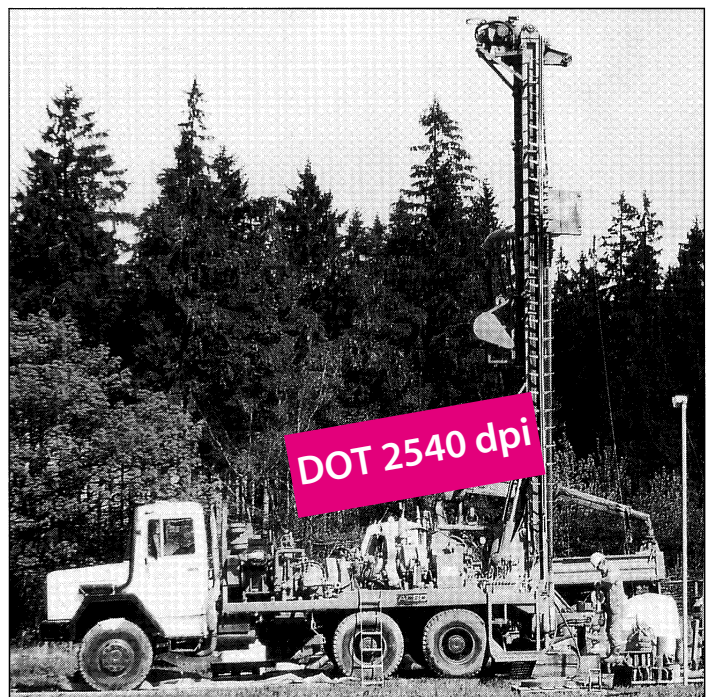
- Niedriger viskose Suspensionen scheinen anfälliger für die Ausbildung von Inhomogenitäten zu sein. Möglich ist aber auch, dass deren beobachtete Häufung mit einer verstärkten Wasserabgabe aufgrund der in den Versuchen zum Teil zu hoch angesetzten W/F-Werte verbunden ist.
- Harte, relativ spröde Materialien scheinen anfälliger für wasserwegsame Rissbildungen im Material zu sein als plastische Materialien.
- Die signifikanteste Schwachstelle der Abdichtung ist die Grenzfläche „Verpressmasse – Ausbaurohrung“. 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.

3. 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 zur Ausbildung von Diskontinuitätsflächen und somit zu einer ▶



celler brunnenbau^{gmbh} cb
 Postfach 1171 · 29201 Celle-Altencelle · Tel. (0 51 41) 88 44-0 · Fax (0 51 41) 88 44-10
 E-Mail: cb@celler-brunnenbau.de Internet: www.celler-brunnenbau.de

Brunnenbau • Aufschluß-, Meßstellen-, Baugrund-, Deponie- und Kernbohrungen • Ankerbohrungen • Pfahlbohrungen • Kampfmittelbeseitigungsbohrungen • Durchführung untergrundhydraulischer Messungen • Grundwasserhaltungen und Grundwasserabsenkungen
 Brunnenregenerierung und Pumpenaustauschservice • Elektronische Grundwasserdatenerfassung mit Funk- und Telefonübertragung

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 Bohrfluid, Nachfall und Suspensionsmasse zu einem inhomogenen Gemisch vereinigen.

den sich entlang der Kontaktflächen der Abdichtungsmassen zur Bohrlochwand bzw. zur Ausbauperforation. 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

den. Bei hoch viskosen 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.



Bild 7: Stark inhomogenes Material (links), Wegsamkeit an der Grenzfläche zur Ausbauperforation (rechts).
Quelle: RUBBERT (2002)

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. ■

Literaturhinweise

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

- 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 Schrumpfungsvorgänge, aber auch keine Quellvorgänge in den Abdichtungsmassen auf.
- Die optisch und hydraulisch festgestellten Wegsamkeiten der Systeme befanden

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 Ausbauperforation ist notwendige Grundlage für eine funktionssichere Abdichtung.
- Vor Einbringung der Suspension ist die CMC-Konzentration im Bohrloch durch einen Spülungsaustausch 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.

Kontakt

Dipl.-Geol. B. Niehues
DVGW Deutsche Vereinigung
des Gas- und Wasserfaches e.V.
Josef-Wirmer-Straße 1–3
53123 Bonn
Tel.: 02 28/91 88-6 52
Fax: 02 28/91 88-9 90
E-Mail: niehues@wvgw.de
Internet: www.dvgw.de

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