



2026-1 Tagungsbericht

DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung

Beneath the Surface - engineering the future of energy



DGMK und Autor(en) haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Die DGMK übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind.

Alle Rechte vorbehalten

© DGMK e.V., Hamburg, 2026

Für Copyright in Bezug auf das verwendete Bildmaterial siehe Quellenangaben in den Abbildungsunterschriften.

Abbildungen ohne Quellenangabe sind von den Autoren.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der DGMK unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

The work including all its parts is protected by copyright. Any use outside the narrow limits of the German Copyright Law without the consent of the DGMK is prohibited and punishable by law. This applies in particular to reproduction, translation, microfilming and storage and processing in electronic systems.

Umschlaggestaltung: DIE NEUDENKER®, Darmstadt | DGMK e.V., Hamburg

Titelfotografie: © DEEP.KBB GmbH

ISSN 3052-1629

ISBN 978-3-947716-81-4

<https://www.dgmk.de>

Bentonitformsteine als Abdichtmaterial für Tiefbohrungen

Kai-Uwe Belohlavek¹; Thomas Wilsnack²; Torben Sander³

¹ExxonMobil Production Deutschland GmbH, Hannover; ²IBeWa-Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik; ³Harbour Energy Germany GmbH

Kurzfassung

Um einen dauerhaften Bohrlochabschluss zu erreichen, muss das verwendete Material ein langzeitstabiles, flüssigkeits- und gasdichtes Barriereelement unter den herrschenden und künftigen Bohrlochbedingungen bilden.

Die Langzeitstabilität von Bentonit als natürlichem Analogon gegenüber den geochemischen, gebirgsmechanischen und thermodynamischen Bedingungen ist allgemein und auch von den Genehmigungsbehörden akzeptiert. Schacht- und Streckenverschlüsse unter Verwendung von vorkonditionierten Bentonitformsteinen wurden bereits mehrfach realisiert.

Im Vortrag wird über die Anwendung dieser Technologie zur Verfüllung von Tiefbohrungen berichtet. Eine zu verfüllende Ölbohrung wurde als „in situ Labor“ ausgewählt, um die Machbarkeit eines Bohrlochverschlusses mit Bentonitformsteinen zu demonstrieren. Im Vorfeld wurden Labor- und Technikumversuche durchgeführt, die die Eignung der für den Bohrlochversuch gewählten Bentonitzusammensetzung und die zu erwartende Durchlässigkeit, die Haftscherfestigkeit und die Quelldrücke bestätigen.

Die Ausrüstung, mit der die Bentonitformsteine in die Bohrung eingebaut wurden, und die Versuchsplanung wurde so gestaltet, dass Tests sowohl von oben als auch von unten auf die gequollenen Formsteine möglich sind und Daten, zur Entwicklung der Quelldrücke im Bentonitelement über die Testdauer, aufgenommen werden können. Die Ergebnisse des Versuches bestätigen die Machbarkeit eines Bohrlochverschlusses mittels Bentonitformsteinen.

1 Einleitung

In Deutschland existieren, neben einer Vielzahl von bereits ausgeführten Bohrungen, zurzeit ca. 1300 aktive Bohrungen aus denen Kohlenwasserstoffe produziert werden. Hinzu kommen weitere Bohrungen für die Speicherung von fluiden Rohstoffen in Kavernen und die Nutzung der Tiefengeothermie sowie Erkundungs- und Forschungsbohrungen. Zementstein ist das etablierte Abdichtmaterial. Zusätzlich kann auch Bentonit als quellfähiges Material zur dauerhaften Abdichtung genutzt werden. Bei geometrischen Änderungen infolge mechanischer Belastungen sorgt das plastische Verhalten für den Erhalt der Abdichtung. Als natürliches Analogon ist Bentonit zudem langzeitstabil gegenüber einer Vielzahl geochemischer Einflüsse. Der internationale Sachstand zum Einsatz von Bentonit zur Abdichtung von Tiefbohrungen zeigt, dass es derzeit an einer kontrollierten Anwendung in Tiefbohrungen fehlt. Im Rahmen einer Studie [7] wurde ein Konzept für die Verwendung von Bentonitformsteinen für die langzeitsichere Abdichtung von Erdöl- und Erdgasbohrungen entworfen. Für die Verwendung von Bentonitformsteinen zur Abdichtung von Strecken und Schächten im klassischen Bergbau liegen umfangreiche nationale und internationale Erfahrungen vor [8, 9]. In diesem Bereich ist deren Verwendung in Deutschland behördlich anerkannt. Für den Einsatz von Bentonit in einer Tiefbohrung liegen aus der Anwendung im klassischen Bergbau keine Erfahrungen vor. Im Rahmen eines umfangreichen Forschungsprojektes sollten die Planungsgrundlagen für die Anwendung von Bentonit zur Verfüllung von Tiefbohrungen gelegt werden. Dieses Forschungsprojekt sah Feldversuche in vorhandenen Tiefbohrungen vor. Eine zu verfüllende Ölbohrung wurde als „Labor“ ausgewählt, um die Machbarkeit eines Bohrlochverschlusses mit Bentonitformsteinen zu demonstrieren. Im Vorfeld wurden Laborversuche und

Technikumversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt. Für verschiedene Einbaudichten wurden die Quelldrücke, die Durchlässigkeit und die Haftscherfestigkeit ermittelt. Zum Einbringen der Bentonitformsteine in die Versuchsbohrung wurde ein Trägersystem konstruiert und gebaut, das es ermöglicht, die gequollenen Formsteine von oben und von unten zu testen und die Entwicklung des Quelldruckes zu erfassen. Die Laboruntersuchungen, die Technikumversuche, der erfolgreiche Einbau in die Versuchsbohrung und die aufgenommenen Drücke im Bentonitelement bestätigen das Quellen des Bentonites unter kontrollierten Bedingungen und somit die Machbarkeit eines Bohrlochverschlusses mittels Bentonitformsteinen.

2 Sachstand zum Einsatz von Bentonit

2.1 Anwendung von Bentonit in Bohrungen

Für die Verwahrung von Bohrungen wurden in den letzten Jahrzehnten von einzelnen Erdöl-/Erdgasunternehmen in mehr als 1000 Bohrungen in den USA, in Nigeria und Australien Bentonitpresslinge bis in Teufen > 2000 m eingesetzt [1]. Diese wurden in die Bohrungen, von oben eingefüllt bzw. eingeschwemmt.

Details zu den in situ erreichten Sedimentationsdichten und zu Quelldrücken und zu Permeabilitäten konnten nicht recherchiert werden. Zum Nachweis der erreichten Dichtheit liegen nur einzelne qualitative Angaben vor.

In einem Joint-Industry Forschungsprojekt in den Niederlanden wurde der Einsatz von Bentonit für die Verwahrung von Tiefbohrungen untersucht [2]. Ein Fokus lag auf der Bestimmung der Scherfestigkeit des gequollenen Bentonits, als Parameter für den Widerstand gegen Versagen der Dichtheit. Die Durchlässigkeit selbst wird als ausreichend gering angesehen, um eine Durchströmung mit Wasser zu verhindern. Die Autoren kommen zum Ergebnis, dass das natürliche Aussedimentieren von in ein Bohrloch unkontrolliert eingebrachte Bentonitpellets einen stabilen Bohrlochverschluss bildet.

Im Bereich von Flachbohrungen (Brunnenbau, oberflächennahe Geothermie) finden Tonpellets mit geringen Qualitätsanforderungen bereits breite Anwendung für die Abdichtung von Ringräumen sowie zur Querschnittsabdichtung im Bereich ausgewählter Horizonte. In der Schweiz wurde das Abdichten von Bohrungen durch eingeschwemmte Bentonitpellets untersucht [3, 4].

Das Einbringen von quellfähigem Bentonit erfolgte in allen oben genannten Anwendungen durch Einfüllen/Einwerfen von vorgeformten Bentonitpresslingen in die Bohrung bzw. durch Einschwemmen. Das kann man sich so, wie in Abbildung 1 gezeigt, vorstellen. Die Einbaudichte, ein maßgeblicher Parameter für den Quelldruck und die Durchlässigkeit, kann auf diese Weise nicht gesteuert werden.



Abb. 1: Bentonitpresslinge in Wasser [5]

2.2 Eigenschaften von Bentonit als Dichtmaterial

Bentonite besitzen auf Grund des Quellverhaltens, der geringen Permeabilität und der Sorptionsfähigkeit gute Voraussetzungen für die Verwendung als Dichtmaterial. Für Bentonite liegen natürliche Analoga vor, die eine Langzeitbeständigkeit und Dichtheit belegen. Die Permeabilität von Bentoniten ist sehr gering und reduziert sich mit abnehmender Porosität und Erhöhung des Anteils an quellfähigen Mineralen.

Die Eigenschaften die Bentonit als ein geeignetes Material für Bohrlochabdichtung ausmachen sind:

- 1) Langzeitstabilität (natürliches Analogon) des natürlichen, arteigenen Materials für die geochemischen, gebirgsmechanischen und thermodynamischen Bedingungen - u. a. mineralisierte Wässer, korrosives CO₂, wechselnde Temperatur- und Druckbedingungen,
- 2) vollständige Querschnittsabdichtung und aktive Abdichtung des Kontaktes zwischen Dichtmaterial und Gebirge bzw. zur Verrohrung in Abhängigkeit von Einbaudichte und Smektitgehalt,
- 3) geringe Permeabilität in Abhängigkeit von Einbaudichte und Smektitgehalt, daraus folgend Reduzierung/Verhinderung des Volumenstromes von Gas oder Flüssigkeit,
- 4) keine Undichtheiten durch Rissbildung und/oder Wegsamkeiten zwischen Dichtmaterial und Gebirge,
- 5) langfristig Erhöhung des Sicherheitsniveaus durch die plastische Verformung und rissfreie Kompaktion der allseitig eingespannten Bentonitabdichtung unter dem Einfluss der Gebirgskonvergenz.

Der Smektitgehalt und die Einbaudichte können durch ein kontrolliertes Einbringen in eine Bohrung gesteuert werden, wodurch der maximal erreichbare Quelldruck und die minimal erreichbare Durchlässigkeit bestimmt werden.

Quelldruck

Der Quellprozess von Bentoniten beruht auf der Einlagerung von Wassermolekülen in die Schichtgitterstruktur der Tonminerale und der Tonaggregate. Man unterscheidet eine intrakristalline Quellung, bei der Wasser zwischen die Lagen des Tonminerals eingelagert wird, und eine interkristalline (osmotische) Quellung, die zwischen den Kristalliten bzw. Partikeln abläuft. Für eine hohe Quellfähigkeit der verwendeten Bentonitmaterialien sollten diese mit einem geringen Ausgangswassergehalt und mit einer vordefinierten Dichte zum Einsatz kommen. Der Anteil der Tonminerale der Smektitgruppe, die Mineralisation der zum Quellen notwendigen wässrigen Lösung und die Einbautrockendichte (Porosität und Volumenbegrenzung), bestimmen den erreichbaren Quelldruck und die Permeabilität. Unter der Wirkung des Quelldruckes verspannt sich der Bentonitkörper im Einbaubereich und dichtet aktiv den Kontakt zum Gebirge bzw. zur Verrohrung ab. Wie in den Abbildungen 2 und 3 zu erkennen, kann - in Abhängigkeit vom Smektitgehalt und von der Einbautrockendichte - ein Quelldruck von über 5 MPa (50 bar) erreicht werden. Je höher der Smektitgehalt bezogen auf das Porenvolumen ist und je höher die erreichbare Einbaudichte sind, umso höher ist der Quelldruck.

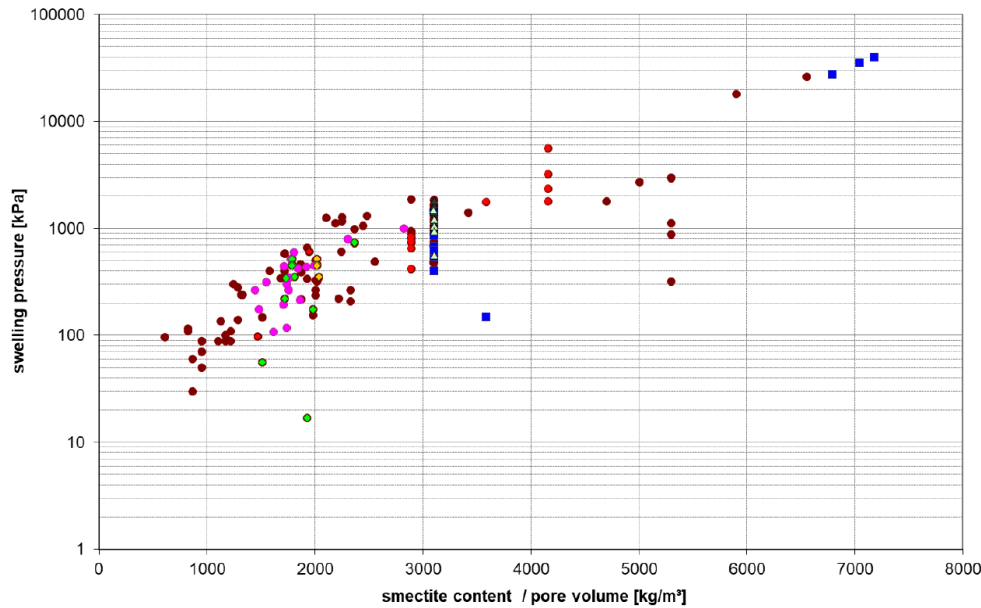


Abb. 2: Beispiele für den Quelldruck in Abhängigkeit vom Smektitgehalt je Porenvolumen [7]

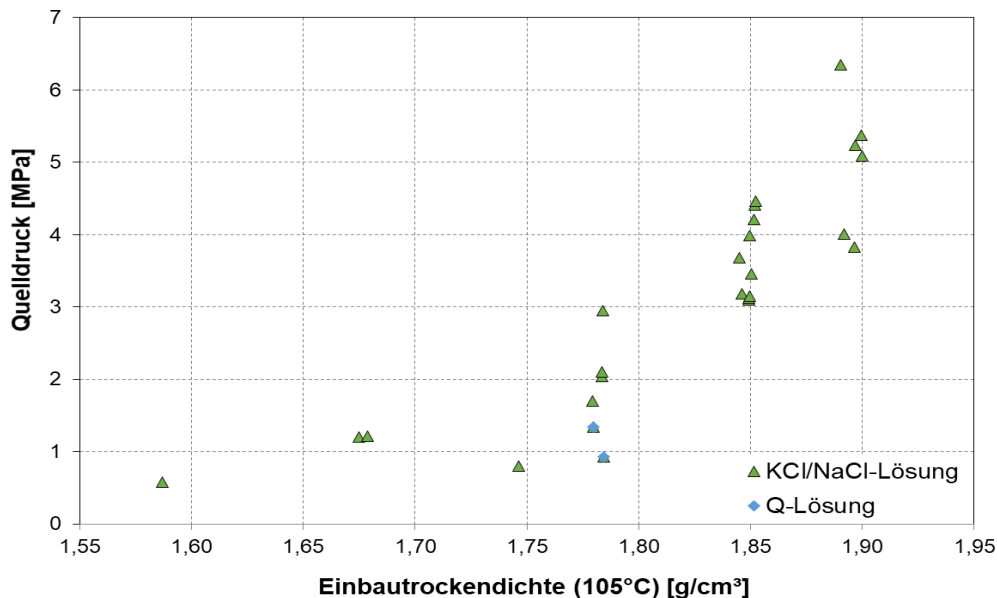


Abb. 3: Beispiel für erreichbare Quelldrücke in Abhängigkeit der Einbautrockendichte

Je höher der Smektitgehalt bezogen auf das Porenvolumen ist und je höher die erreichbare Einbaudichte ist, umso höher ist der Quelldruck.

Permeabilität

Die Permeabilität von Bentoniten ist sehr gering und reduziert sich mit abnehmender Porosität und Erhöhung des Anteils an quellfähigen Mineralen (z.B. Smektite). Bei Anwesenheit vor allem einwertiger Kationen im Bentonit (z.B. Natrium) bildet sich im Inneren eine größere diffuse Ionenschicht aus, in der sich durch den Ionengehalt die Viskosität der Wasseranteils erhöht, so dass sich Strömungsprozesse verlangsamen und somit die ermittelte Permeabilität mit steigendem Natriumionenanteil sinkt [6]. Mit zunehmender Mineralisation der strömenden Lösung verringert sich die Mächtigkeit der diffusen Ionenschicht und erhöht sich der strömungswirksame Anteil des Porenraumes [6] und in der Folge dadurch auch die Permeabilität.

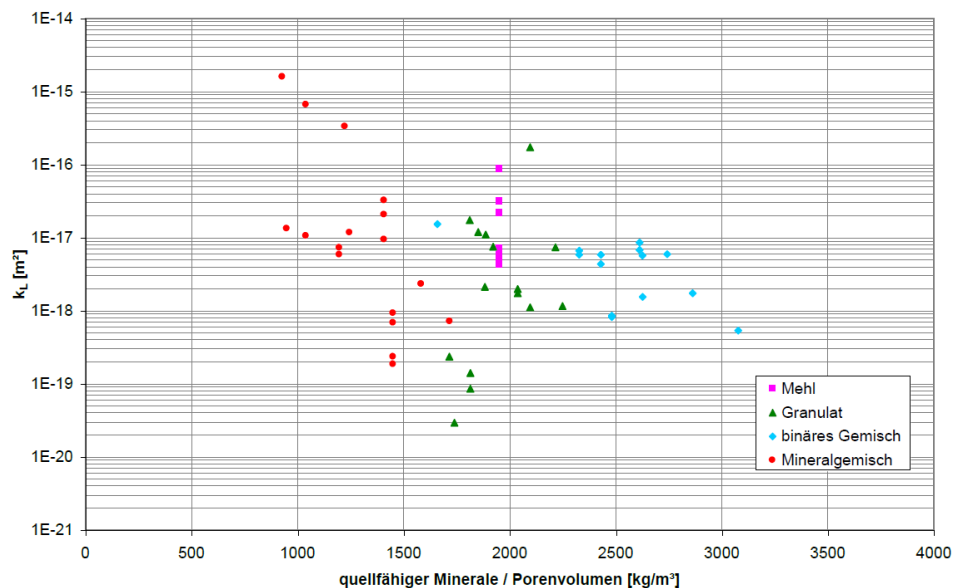


Abb. 4: Beispiele für die Permeabilität in Abhängigkeit von dem auf das Porenraumvolumen normierten Gehalt an quellfähigen Mineralien für verschiedene Formen von Bentonit und verschiedenen Mischungen mit anderen Materialien [7]

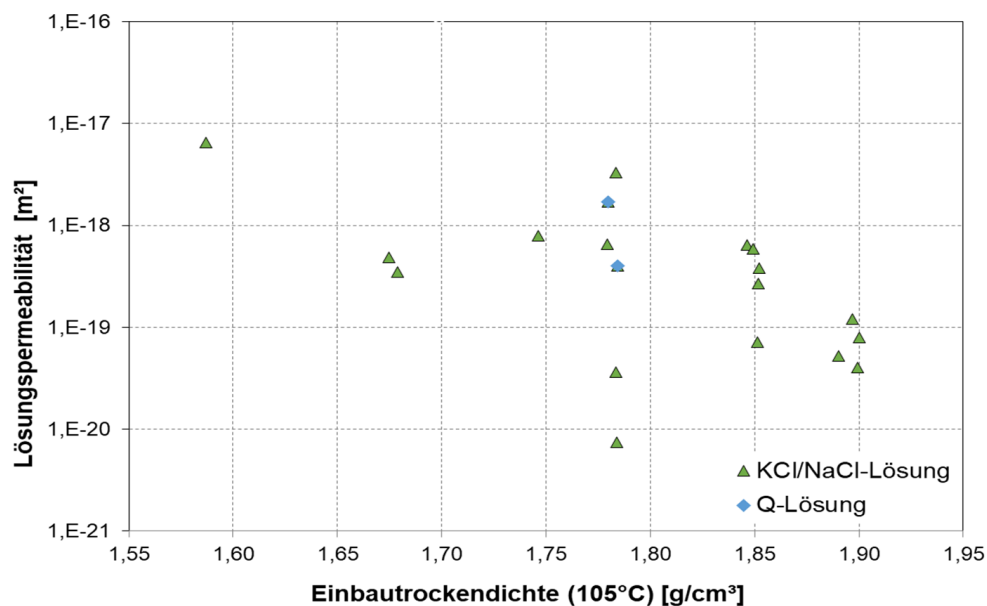


Abb. 5: Beispiel für die erreichbare Permeabilität in Abhängigkeit von der Einbautrockendichte (Trocknungstemperatur 105°C)

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die erreichbare Permeabilität in Abhängigkeit vom Gehalt an quellfähigem Material bzw. von der Einbautrockendichte für Formen von Bentonit, als Mischung mit anderen Materialien und gequollen in verschiedenen wässrigen Lösungen. Man kann Permeabilitäten bis in den μ -Darcy-Bereich ($< 10^{-18} \text{ m}^2$) bestimmen.

Je höher der Smektitgehalt bezogen auf das Porenvolumen ist und je höher die erreichbare Einbaudichte ist, umso kleiner ist die Permeabilität.

Tabelle 1 zeigt Mittelwerte ausgewählter Eigenschaften von Bentonitmaterial, das als Pressling oder als Granulat (ähnlich, wie in Abbildung 6), vorliegt.



a) Bentonitgranulat 0-3 mm

b) Bentonitpresslinge

Abb. 6: Beispiele für Bentonit als a) Granulat und als b) Presslinge [7]

Parameter	Einheit	Presslinge	Granulate	Bemerkung
Korn-(Partikel-)größe	mm	Ellipsen 30 x 40 x 20	0 – 10	
Montmorillonitgehalt	Ma.-%		ca. 64	
Wassergehalt	Ma.-%		ca. 8,5	
Feuchtdichte	g/cm ³	2,2	1,54	
Quelldruck gegenüber NaCl-Lösung (Einbautrockendichte 1,7 g/cm ³)	MPa	1,0-1,5	0,2 – 1,0	Parameter abhängig von Einbaudichte und Smektitgehalt
Permeabilität gegenüber NaCl-Lösung (Einbautrockendichte 1,7 g/cm ³)	m ²	$\leq 10^{-18}$	$\leq 10^{-16}$	

Tab. 1: Beispiel für Mittelwerte ausgewählter Eigenschaften von Bentonit [7]

2.3 Schlussfolgerungen für eine erfolgreiche Bohrungsabdichtung mit Bentonit

Wie oben beschrieben, bestimmen der Smektitgehalt, bezogen auf das Porenvolumen, und die Einbautrockendichte den maximal erreichbaren Quelldruck und die minimal erreichbare Permeabilität. Der Smektitgehalt, wird bei der Wahl des zu verwendenden Bentonites und der Herstellung der einzusetzenden Materialart – Granulat, Presslinge, Formsteine – vorgegeben. Die Einbautrockendichte kann durch die Einbaugeometrie des Bentonits gesteuert werden. Die in der Literatur gefundenen Methoden des Einbringens von Bentonitpresslingen durch Einwerfen/Einschwemmen mit nachfolgender Sedimentation kann, hinsichtlich Smektitgehalt und Einbaudichte und dem sich daraus ergebenden Quelldruck und Permeabilität, nicht als kontrolliert angesehen werden.

Ein definierter und kontrollierter Einbau des Bentonites in eine Bohrung ist als vorgefertigter Formstein mit definierten mineralogischen und geotechnischen Eigenschaften, abgestimmt auf die Bohrlochgeometrie, möglich.

Die Anforderungen an die Funktionsweise einer Abdichtung mit Bentonit bezüglich des Lastabtrages, der Haftscherfestigkeit im Kontakt zur Kontur können anwendungsbezogen konzipiert werden. So kann zum Beispiel auf die Berücksichtigung der Scherfestigkeit des gequollenen Bentonits verzichtet werden, wenn der Bentonit zwischen mechanischen Begrenzungen eingespannt wird, z.B. zwischen zwei Zementbrücken oder zwischen zwei Bridgeplugs.

3 Vorarbeiten für einen Demonstrationsversuch in einem Bohrloch

3.1 Vorhabensbeschreibung

Eine bis 360 m teilverfüllte Ölbohrung mit einer 5 ½“ Verrohrung (Innendurchmesser 127,2 mm) wurde als Labor genutzt, um eine Anzahl von zylindrischen Bentonitformsteinen mit vordefinierter Einbautrockendichte einzubauen. Die Bentonitformsteine wurden mit einer definierten Dichte, einem definiertem Smektitgehalt und mit einer definierten Geometrie

hergestellt. Nach dem Einbringen der Formsteine wurde Zeit zum Quellen gegeben und danach sollten Durchströmungsteste über den Bentonit stattfinden. Des Weiteren wurde die Quelldruckentwicklung in einem Bentonitformsteinen aufgezeichnet.

Um ein vorzeitiges Quellen der Bentonitformsteine beim Einbau in die Bohrung zu verhindern, wurden diese durch eine Ölspülung bis in einen wassergefüllten Bohrlochabschnitt eingebaut, welcher nach unten durch eine Teilzementation und einen Bridgeplug dichtend abgesperrt war. Der Raum zwischen dem Bentonit und dem Bridgeplug konnte somit als eine Druckkammer genutzt werden, die von Übertage durch das Bohrgestänge und durch die Hohlstange im Bentonitelement zugänglich war (Abbildung 7).

Dazu wurde ein Bentoniträger konstruiert und gebaut, der es ermöglicht, Bentonitformsteine über eine Länge von 1,5m (eingespannt zwischen zwei Kopfstücken) am Bohrgestänge in die Bohrung einzubauen. Die zylindrischen Formsteine wurden auf eine zentrale Hohlstange „aufgefädelt“. Das untere Kopfstück enthielt eine Berstscheibe auf der Hohlstange zum Test des Bohrgestänges auf Dichtheit. Das obere Kopfstück hat eine Durchführung für die Kabel der Drucksensoren, die sich in einem Bentonitformstein befinden. Die Sensordaten wurden in einem, für die Untersuchungen eigens entwickelten, Memorytool aufgezeichnet, welches sich im Übergangsrohr vom oberen Kopfstück zum Bohrgestängensanschluss befand.

Geplanter Ablauf des Versuches:

1. Einbau in den mit ölbasischer Spülung gefüllten Bohrlochabschnitt, bis kurz vor dem Wasserspiegel
2. Vor Einbau in das Wasser – Test des Gestängestranges auf Dichtheit
3. Einbau in den mit Wasser gefüllten Bohrlochabschnitt
4. Abwarten einer Quellzeit von mindestens 10 Tagen
5. Durchströmungsteste
6. Ausbau durch Abriss des Bentoniträgers am oberen Kopfstück

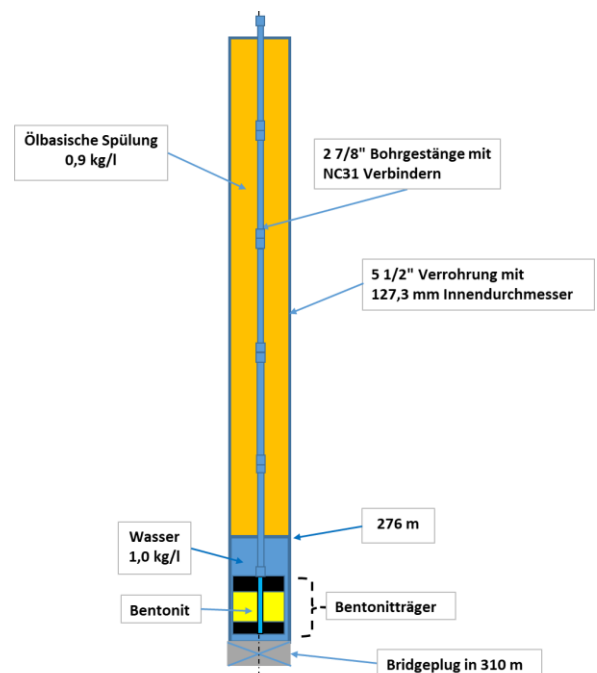


Abb. 7: Geplanter Demonstrationsversuch in einem Bohrloch

3.2 Laborversuche

An den anwendungsbezogen hergestellten Bentonitformsteinen (Abbildung 8) wurden Labortests zur Qualitätskontrolle sowie Technikumversuche zum Quellvermögen und zur Permeabilität durchgeführt.

Parameter der gefertigten Bentonitformsteine:

- Durchmesser [mm] : $121,77 \pm 0,013$

– Länge [mm]	: 60,09±0,60
– Trockendichte [kg/m³] /(105°C)	: 1,958±0,007
– Smektitgehalt [Ma.-%]	: 57,9 ± 1,3
– Xs [kg/m³]	: mind. 3100
– Quelldruck (Wasser) [MPa]	: > 1,5 (bei 1,70 kg/l Einbautrockendichte)
– Quelldruck (Wasser) [MPa]	: > 4,5 (bei 1,80 kg/l Einbautrockendichte)

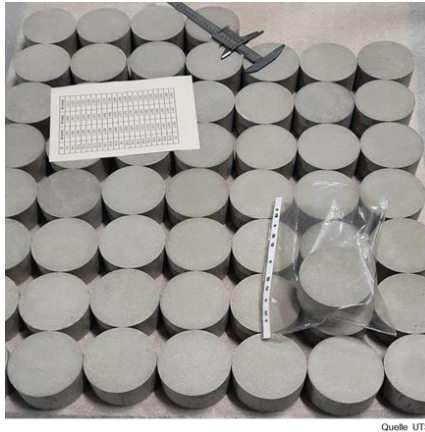


Abb. 8: Für den Demonstrationsversuch angefertigte Bentonitformsteine

Des Weiteren wurde untersucht, ob sich der Einbau durch eine ölbasische Spülung in die mit Wasser gefüllte Bohrlochsektion negativ auf das Quellvermögen auswirkt.

Die Laborversuche ergaben, dass eine Ölbenetzung des Bentonitmaterials das Quellvermögen nicht beeinträchtigt. Im Gegenteil wurden, bei ansonsten gleichen Randbedingungen, höhere Quelldrücke erreicht (Abbildung 10). Die beiden unteren Kurven zeigen die Quelldruckentwicklung mit der Zeit für die Versuche ohne vorherige Ölbenetzung. Die oberen Kurven zeigen die Versuchsergebnisse mit vorheriger Ölbenetzung. Erklärt wird dies dadurch, dass die in den Bentonit eindringende Ölphase initial gasgefüllte Porenräume besetzt, deren Kompressibilität dadurch verringert wird. Die geringere Kompressibilität des sich ergebenden Phasensystems aus Feststoff und Öl bewirkt die Ausbildung einen höheren Quelldruckes.

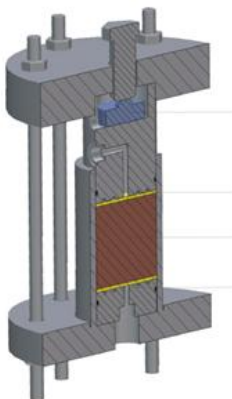


Abb. 9: Skizze des Testautoklaven zur Ermittlung der Quelldruckentwicklung mit verschiedenen Flüssigkeiten

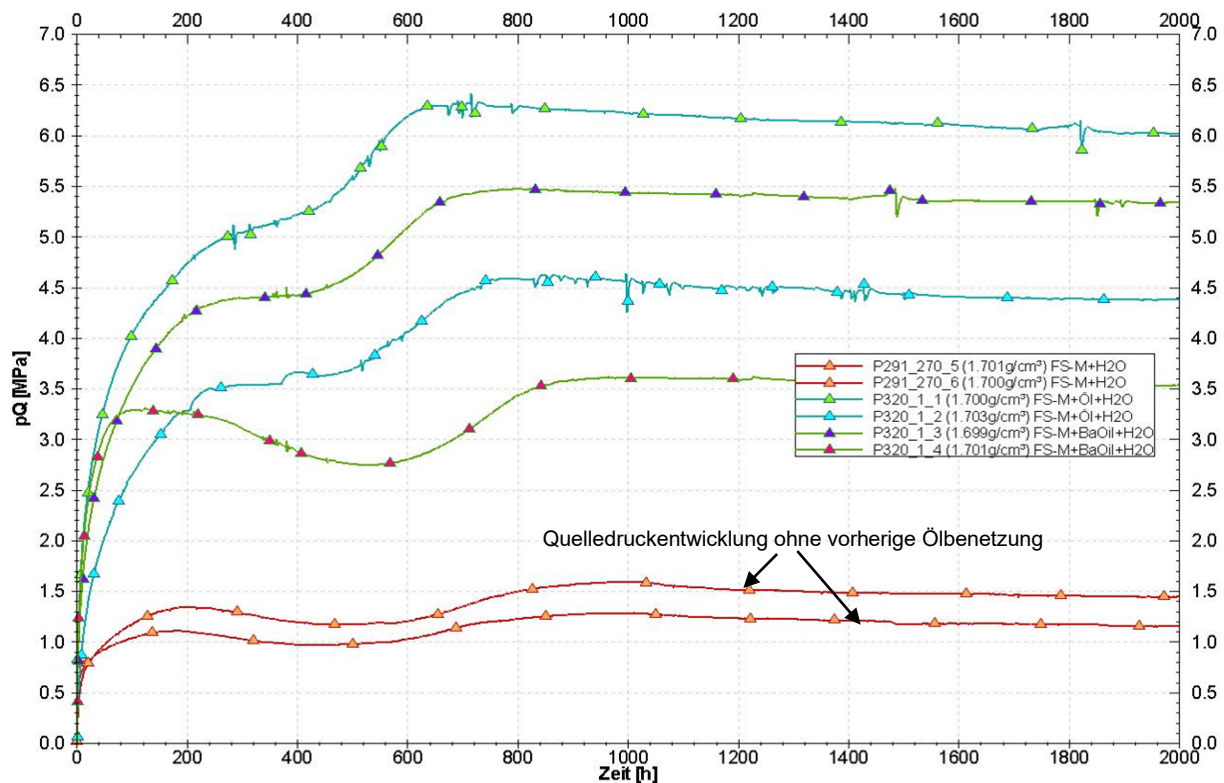


Abb. 10.: Quelldruckentwicklung mit verschiedenen Flüssigkeiten, mit und ohne vorherige Ölbenetzung, bei einer Einbautrockendichte von ca. 1,70 g/cm³

3.2 Technikumversuche

Um den erwartbaren Quelldruck und die Permeabilität für den Demonstrationsversuch in der Bohrung im Vorfeld zu bestimmen, wurden Technikumversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt. Die Technikumversuche erfolgten mit Bentonitformsteinen (Durchmesser 121,77 mm) in einem Rohr mit den gleichen Dimensionen (Rohrinnendurchmesser 127,3 mm), wie die Verrohrung des Versuchsbohrloches. Die Versuchsrandbedingungen wurden denen in der Bohrung angenähert.

Zwischen zwei, gegen das Rohr dichtende, Metallkopfstücke wurden die zylindrischen Bentonitformsteine in das Rohr eingebaut und bildeten das Bentonitelement (Abbildung 11). Die Höhe des Bentonitelementes betrug 360 mm.

Die Bentonitformsteine enthielten radial verteilte, axiale Löcher. Durch die Anzahl der axialen Löcher konnte der Benetzungsprozess und die Einbautrockendichte für den feststehenden Außendurchmesser der Formsteine und den vorgegebenen Rohrinnendurchmesser variiert werden. Die angestrebte Einbautrockendichte orientierte sich an den Erfahrungen und an den Ergebnissen der vorher durchgeführten Laboruntersuchungen.

Um während des Aufbaues der Technikumversuche mechanische Schäden an den Formsteinen zu vermeiden, wurden diese von außen mit Epoxidharz eingestrichen. Dies war auch für den Demonstrationsversuch in der Bohrung so vorgesehen.

Die Kopfstücke haben in axialer Richtung Durchgänge zur Aufnahme von Drucksensoren und waren gegen die Bentonitformsteine mit durchlässigen Sinterplatten gelagert – Abbildung 11b. Die Kopfstücke und das Testrohr wurden zwischen zwei Traversen verspannt- Abbildung 11c.

Durch das untere Kopfstück wurde das Bentonitelement an der Unterkante mit einem gleichbleibenden Wasserdruck beaufschlagt. Druck und Volumenstrom des eingepressten Wassers wurden gemessen. Das obere Kopfstück war geschlossen und es wurde der Fluiddruck an der Bentonitelementoberkante gemessen. Zwischen der oberen Traverse und dem oberen Kopfstück wurde eine Kraftmessdose zur Ermittlung des axialen Quelldruckes installiert. Auf die Ermittlung des radialen Quelldruckes wurde in den Technikumversuchen verzichtet. Der Testaufbau befand sich in einem Wärmeschrank, um eine gleichbleibende Versuchstemperatur zu realisieren – Abbildung 11d.



Abb. 11: a) durchbohrter Bentonitformstein, b) Formsteine zwischen den Kopfstücken, c) Anordnung zwischen den Traversen, d) Versuchsaufbau im Wärmeschrank

Versuchsablauf:

1. Einbau der Bentonitformsteine in das Testrohr
2. Verspannen der Kopfstücke gegen die Traversen
3. Befüllung des Testrohres mit Ölspülung
4. Drucksteigerung bis Erreichen des geplanten Druckes innerhalb eines festgelegten Zeitraumes
5. Fluidaustausch - Ölspülung gegen Süßwasser unter Beibehaltung des Druckes
6. Verschließen des Ausgangs am oberen Kopfstück, bei gleichzeitiger Druckbeaufschlagung durch das untere Kopfstück
7. Zuschalten des Volumenstromsensor am unteren Kopfstück
8. Start der Aufsättigung und Beginn der Messung

Abbildung 12 zeigt die Messwerte eines Technikumversuches über einen Zeitraum von 300 Stunden.

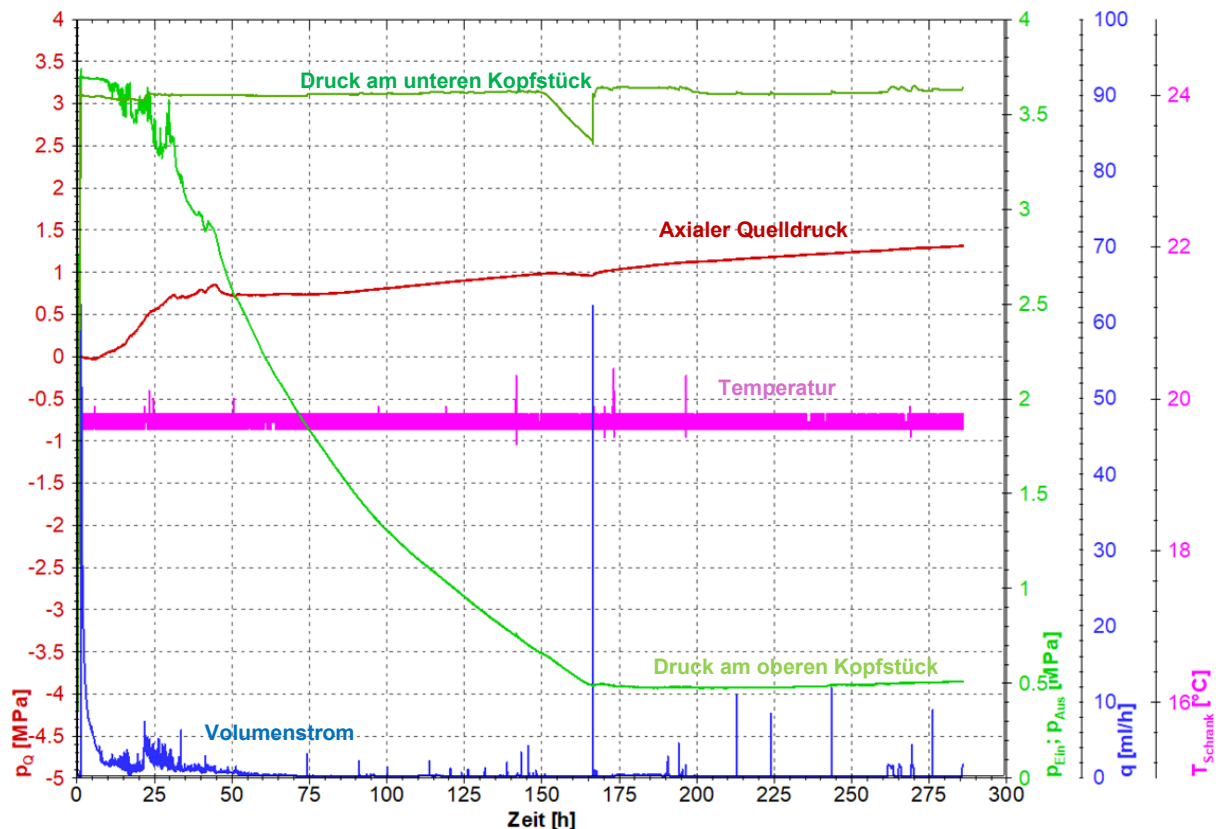


Abb. 12: Messwerte eines Technikumversuches, Magenta = Temperatur, Blau = Volumenstrom durch das untere Kopfstück, Hellgrün = Druck am oberen Kopfstück, Dunkelgrün = Druck am unteren Kopfstück, Rot = Axialer Quelldruck

In den ersten Stunden erfolgten das Fluten, der Druckaufbau und der Tausch von Ölspülung auf Wasser. Danach wurde der Wasserdruck am unteren Kopfstück konstant gehalten.

Es muss zu einem sofortigen Quellvorgang gekommen sein, der den Druckraum des oberen Kopfstückes (Durchgänge durch das obere Kopfstück und Porenraum der oberen Sinterplatten) vom Druckraum des unteren Kopfstückes hydraulisch trennte, da in den ersten 8 Stunden bereits ein Druckunterschied zu erkennen ist. Das heißt, auch die in den Formsteinen vorhandenen Löcher müssen zu gequollen sein. Nach diesem Zeitraum steigt auch der axiale Quelldruck an. Ein definitives Zeichen für das Quellen des Bentonits.

Um den Druck durch das untere Kopfstück aufrecht zu erhalten, wurden in den ersten 48 Stunden über 100 ml Wasser nachgefüllt. Zur Aufrechterhaltung des Wasserdruckes an der Unterkannte des Bentonitelementes war danach nur noch ein minimaler Volumenstrom erforderlich. Das heißt, es wurden vor allem in den ersten 48 Stunden Wasser von außen in den Bentonit aufgenommen. In diesen Zeitraum fällt auch die höchste Rate des Anstieges des axialen Quelldruckes.

Ein indirektes Zeichen für das Quellen, bei gleichzeitiger hydraulischer Abdichtung über das Bentonitelement, ist der Druckverlauf im Druckraum des oberen Kopfstückes. Der Bentonit nimmt das Wasser dort auf. Durch die Kompressibilität des Wassers fällt der Druck im Druckraum des oberen Kopfstückes, der nicht über das Bentonitelement aus dem Druckraum des unteren Kopfstückes ausgeglichen werden kann. Das heißt der Kontakt zwischen Bentonitelement und Rohr ist definitiv hergestellt. Die Druckdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Kopfstück (360 mm) erreicht 3,1 MPa.

Der Druckabfall am unteren Kopfstück (ab ca. 150 h) hatte technische Ursachen. Er macht sich auch leicht in der Aufzeichnung des axialen Quelldruckes bemerkbar. Der außerordentlich

große Unterschied zwischen der Änderung des Flüssigkeitsdruckes am unteren Kopfstück und der Änderung im axialen Quelldruck kann als Nachweis für einen Lastabtrag in axialer Richtung (über das Bentonitelement) gesehen werden. Deshalb ist von einem vollständigen mechanischen Kontakt zwischen dem unteren Kopfstück und dem oberen Kopfstück über das Bentonitelement auszugehen. Die Ausschläge in der Volumenstromkurve ab der 75. Stunde entstanden, wenn Laborpersonal am Klimaschrank vorbei ging. Der axiale Quelldruck erreicht nach 285 Stunden 1,3 MPa und steigt weiter an. Das Quellen war also noch nicht beendet.

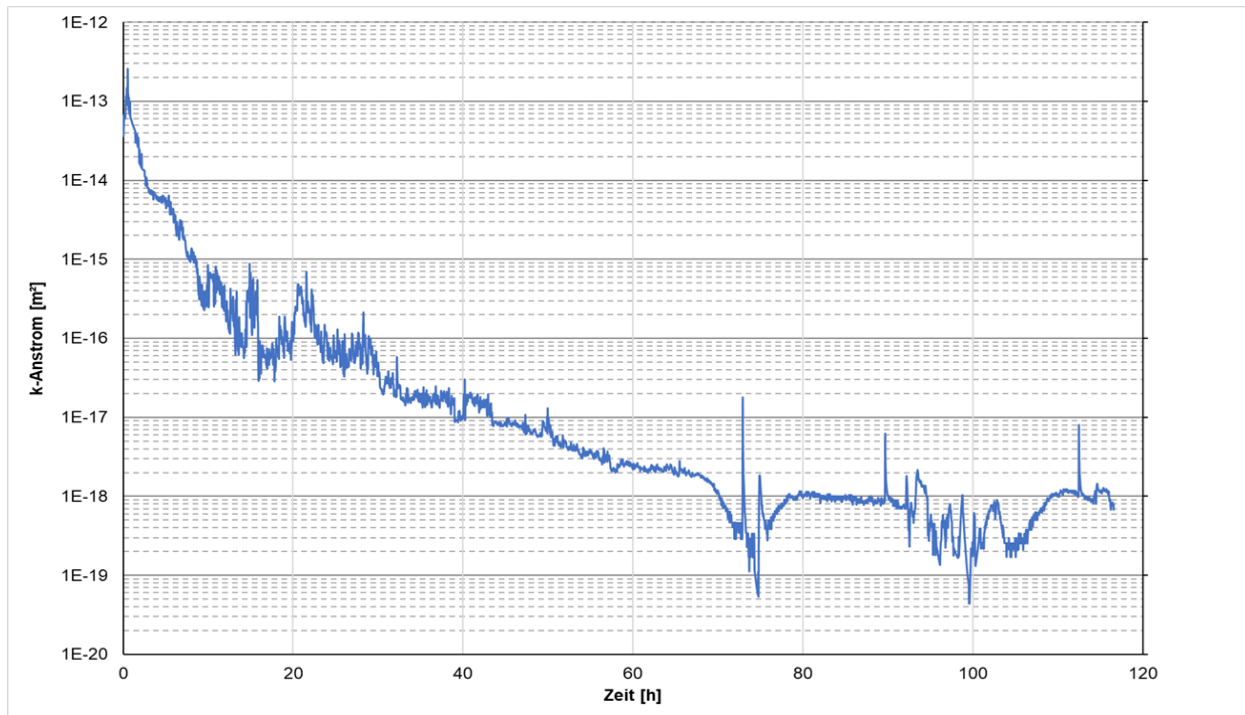


Abb. 13: Permeabilitätsentwicklung während des Versuches

In Abbildung 13 ist die Permeabilitätsentwicklung für die Versuchsdauer von ca. 120 Stunden dargestellt. Es wurde von der konservativen Annahme ausgegangen, dass die, wenn auch minimalen, gemessenen Volumenströme durch das gesamte Bentonitelement erfolgen. Die Permeabilität wurde dann mit dem zu der jeweiligen Zeit herrschenden Differenzdruck zwischen oberen und unteren Kopfstück und dem gemessenen Volumenstrom bestimmt. Man sieht, dass die so (mit konservativen Annahmen) ermittelte Permeabilität innerhalb von 70 Stunden Werte zwischen 10^{-18} m^2 ($\mu\text{-Darcy}$) und 10^{-19} m^2 erreicht.

Insgesamt wurden drei Rohrversuche durchgeführt. Nach den Versuchen wurden die Bentonitelemente aus dem Rohr herausgepresst. Für zwei Versuche konnte so die Haftscherfestigkeit bestimmt werden. Tabelle 2 zeigt ausgewählte Ergebnisse der drei Versuche. In allen drei Versuchen war das Quellen zum Versuchsende noch nicht abgeschlossen.

Die Ergebnisse der Technikumversuche wiesen die generelle Eignung des Konzeptes der Nutzung von definiert vorgefertigten Bentonitformsteinen für einen Bohrungsabschluss nach. Die in den Versuchen bestimmte Permeabilität ist klein genug, um von Dichtheit zu sprechen.

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Einbautrockendichte	1,78 g/cm ³	1,72 g/cm ³	1,72 g/cm ³
initiale Porenraumsättigung des Bentonits (40°C)	41 Vol.-%	38 Vol.-%	35 Vol.-%
Volumen Ölpülung bei Einbau	980 cm ³	800 cm ³	800 cm ³
Volumen Wasser bei Verdrängung	810 cm ³	ca. 600 cm ³	ca. 580 cm ³
axialer Quelldruck	1,8 MPa 68 Tage Versuchsdauer	2,5 MPa 38 Tage Versuchsdauer	0,8 MPa 23 Tage Versuchsdauer
Haftscherfestigkeit	≈ 0,6 N/mm ²	-	≈ 0,9 N/mm ²

Tab. 2: Ausgewählte Ergebnisse aus den Technikumversuchen

4 Demonstrationsversuch im Bohrloch

4.1 Bentoniträger zum Einbau der Bentonitformsteine

Die Bentonitformsteine mussten an einem Träger so in das Versuchsbohrloch eingebaut werden, dass die geplanten Durchströmungsteste möglich sind. Dies erforderte, dass die Druckkammer, die sich nach dem Quellen des Bentonits zwischen Bentonitelement und Bridgeplug ausbildet, über das Bohrgestänge messtechnisch zugänglich bleibt. Die hierfür entwickelte Einbaukonstruktion ist in Abbildung 14 zu sehen.

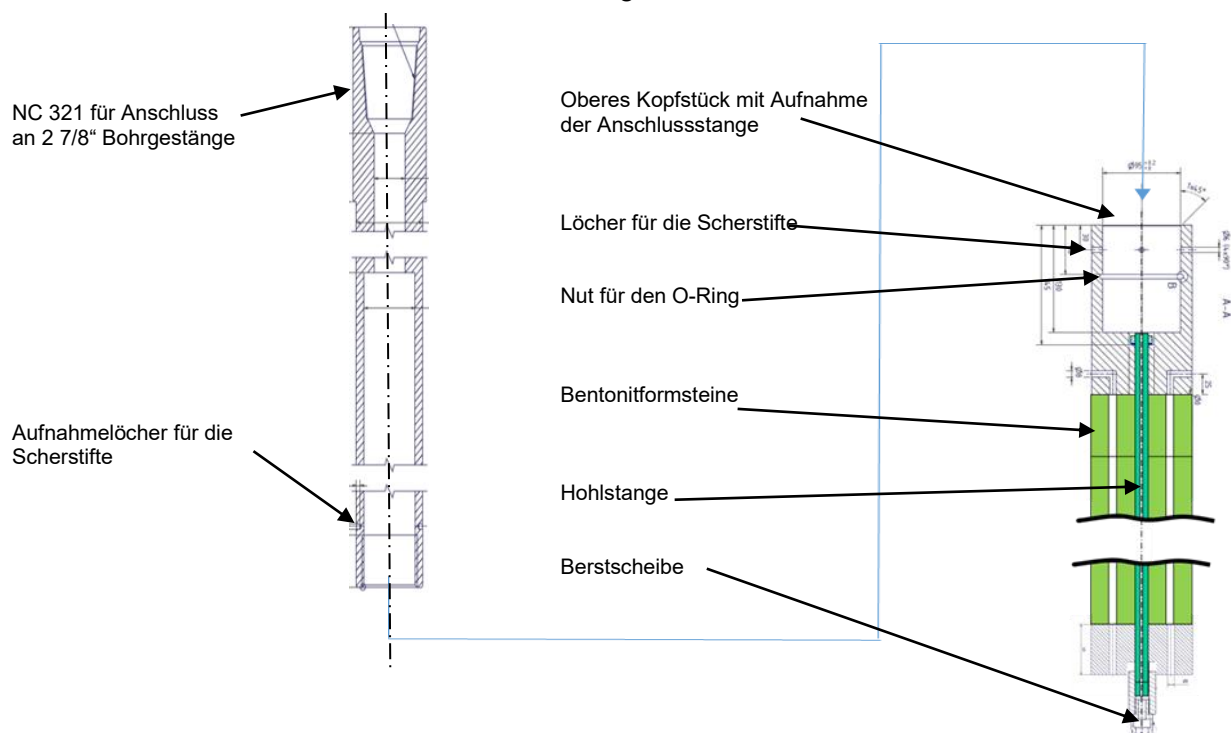


Abb. 14: Tool zum Einbau der Bentonitformsteine als ein Bentonitelement, links die Anschlussstange, rechts in Grün die Bentonitformsteine, eingespannt zwischen zwei Kopfstücken

Die Bentonitformsteine werden auf eine Hohlstange aufgefädelt und bilden ein Bentonitelement mit einer Gesamtlänge von 1,5 m. Die Hohlstange ist beidseitig mit einem Gewinde versehen, sodass die Formsteine zwischen zwei Kopfstücke axial eingespannt werden können. Am unteren Ende der Hohlstange wurde eine Berstscheibe installiert, die eine Dichtheitsprüfung des Bohrgestänges zusammen mit dem Einbautool ermöglicht. Der Test sollte bevor das Bentonitelement in den mit Wasser gefüllten Bohrlochabschnitt eingebaut wird, erfolgen.

In das obere Kopfstück wird die Anschlussstange für das Bohrgestänge, O-Ring-gedichtet, eingeschoben und mit Scherstiften gesichert (erforderliche Abscherkraft 80 kN). Die Anschlussstange hat eine NC 31 Muffe zur Verbindung mit dem 2 7/8" Bohrgestänge. In das Bentonitelement wurden zwei Sensoren eingebaut, die in axialen und in radialer Richtung den sich entwickelnden Druck erfassen. Zur Speicherung der Druckmesswerte im Memoryspeicher werden die Sensorkabel durch das obere Kopfstück geführt. Der Memoryspeicher selbst wird in der Anschlussstange fixiert. Abbildung 15 zeigt einen der eingebauten Drucksensoren. Ebenfalls zu sehen sind die Hohlstange durch die Mitte des Formsteins, die axialen Löcher zur Einstellung der Einbautrockendichte und eine Stange als Montagehilfe.

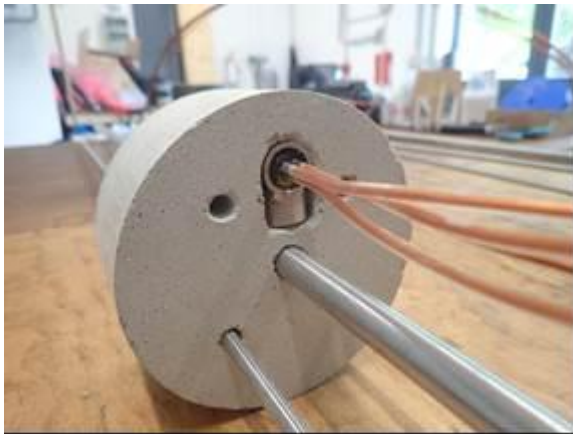


Abb. 15: In einem Bentonitformstein eingebauter Drucksensor, mit zentraler Hohlstange durch die Mitte des Formsteines, die axialen Löcher zur Einstellung der Einbautrockendichte und eine Stange als Montagehilfe

In der Abbildung 16 ist das komplette Bentonitelement aus den Bentonitformsteinen zwischen den zwei Kopfstücken zu sehen. Die Bentonitformsteine wurden zusätzlich von außen mit Epoxidharz eingestrichen und für den Transport mit einer dünnen Folie umgeben.

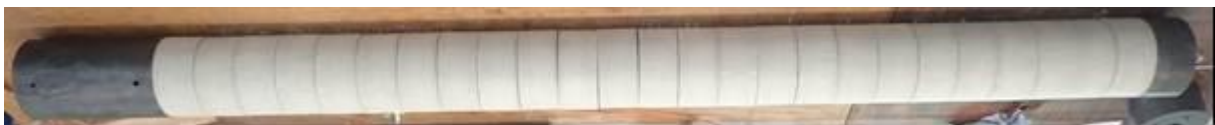


Abb. 16: Zwischen den Kopfstücken zusammengebaute Bentonitformsteine, die das Bentonitelement bilden

Abbildung 17 zeigt den Zusammenbauzustand. Die um das Bentonitelement gelegten und fixierte KG-Rohrhälften sind ein Schutz gegen Transportbeschädigungen.



Abb. 17: Bentoniträger mit Anschlussstange (innen mit Memoryspeicher) im Zusammenbauzustand, das Bentonitelement ist für den Transport durch fixierte KG-Rohrhälften geschützt.

4.2 Einbau des Bentoniträgers

Das Bohrloch hat eine 5 ½“ Verrohrung bis zu Tage, war bis 365 m zementiert und mit einem Bridgeplug in Teufe 310m nach unten abgedichtet. Der mit wassergefüllte Bohrungsabschnitt von 310m bis 276m, der als untere Druckkammer diente, war auf Dichtheit getestet. Oberhalb von 276m befand sich Ölspülung. Die Phasengrenze Ölspülung/Wasser wurde durch eine Messung nachgewiesen.

Der Bentoniträger wurde angeliefert, auf die Arbeitsbühne gehoben, von den KG-Rohrhälften sowie der Schutzfolie befreit, einem Dichtheitstest unterzogen und in das Bohrloch eingebaut. Abbildung 18 zeigt den Einbau des Bentonitelementes in die Bohrung.

Da sich das Bohrgestänge nicht selbst auffüllen konnte, wurde das Bohrgestänge nach Einbau von jeweils fünf Bohrstangen aufgefüllt. Durch die dabei auftretende Wechseldruckbelastung auf die Berstscheibe, die sich am unteren Ende der Hohlstange befand, wurde diese zerstört. Deshalb konnte der Test auf Dichtheit des Gestängestranges nicht durchgeführt werden. Eine Undichtheit des Gestängestranges wurde als äußerst unwahrscheinlich eingeschätzt und das Bentonitelement in den wassergefüllten Bohrlochabschnitt eingebaut. Das obere Ende der Bentonitformsteine befand sich in 283m Teufe. Damit befand sich das Bentonitelement vollständig im Wasser. Die Bohrung wurde geschlossen und der Bentonit konnte über einen Zeitraum von 21 Tage quellen.



Abb. 18: Einbau des Bentoniträgers in das Bohrloch

4.3 Versuchsdurchführung, Auswertung

Nach einer Quellzeit von 21 Tagen sollten die Durchströmungsversuche durchgeführt werden. Die Versuche konnten nicht durchgeführt werden, da das Montagehilfsrohr zwischen den aufgefädelten Bentonitformsteinen nicht entfernt worden war. Dadurch bestand eine direkte Verbindung (hydraulischer Kurzschluss) zwischen der Druckkammer unter dem Bentonitelement und dem Ringraum zwischen Gestängestrang und Verrohrung.

Der Ausbau des Bohrgestänges konnte erst erfolgen, nachdem die Hohlstange im Bereich des oberen Kopfstückes abgerissen wurde. Das heißt, das Bentonitelement hatte sich unter der Wirkung des Quelldruckes planmäßig in der 5 1/2" Verrohrung verspannt. Der Nachweis des Quellens des Bentonitelementes ist somit erbracht. Die Zugfestigkeit der Hohlstange bestimmte die Abreißkraft. Die Hohlstange wurde mit einer Zugkraft von 25 kN abgerissen werden. Dies entsprach der Zugfestigkeit der Hohlstange. Daraus ergibt sich eine Mindesthaftschersfestigkeit des Bentonitelementes an der Innenwand der Verrohrung von 0,05 N/mm². Abbildung 19 zeigt den Abreißpunkt der Hohlstange sowie das ausgebaute Kopfstück, das sich noch an der Anschlussstange befindet.

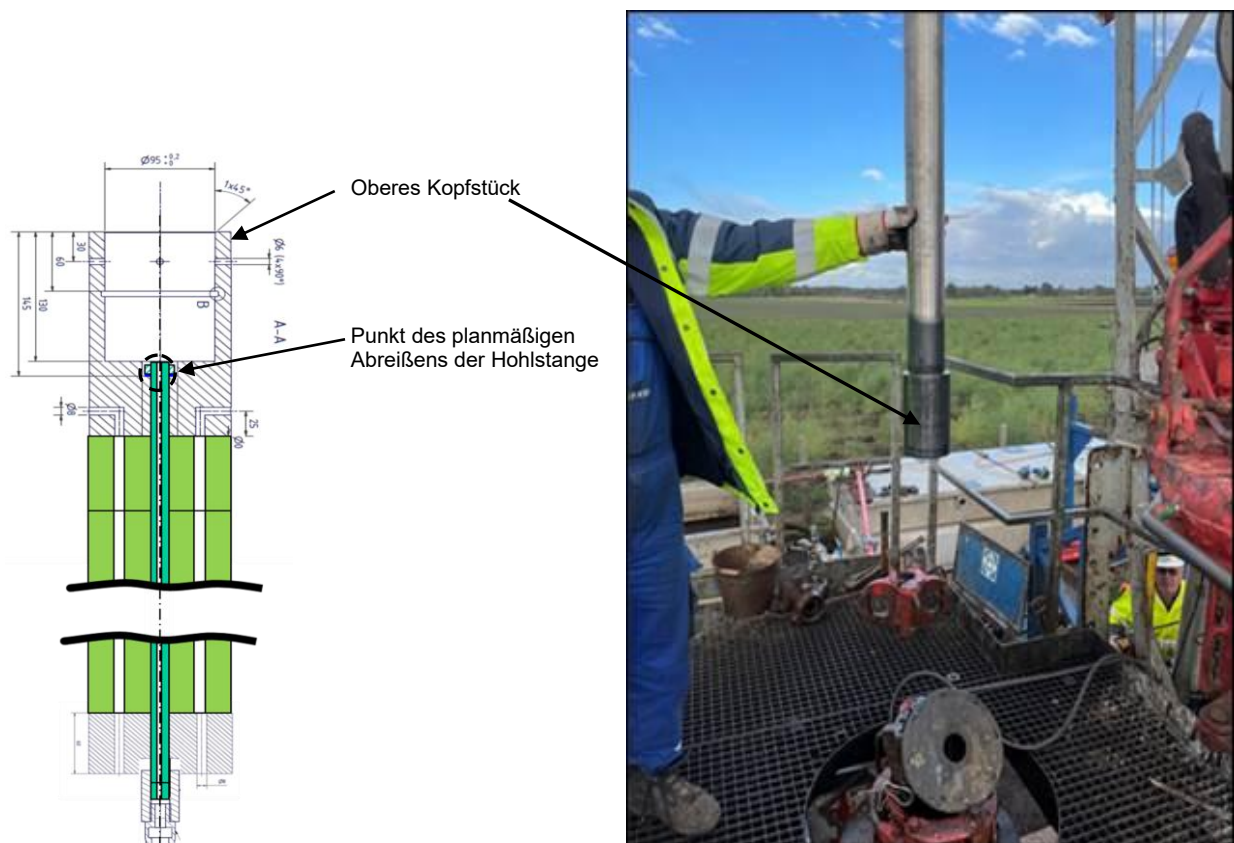


Abb. 19: Links: Punkt des planmäßigen Abreißens der Hohlstange; Rechts: ausgebautes oberes Kopfstück an der Anschlussstange für das Bohrgestänge

Die im Memoryspeicher enthaltenen Druck- und Temperaturdaten konnten gesichert und ausgewertet werden. Abbildung 20 zeigt die aufgenommenen Druckwerte der beiden radial und axial im Bentonitelement angeordneten Drucksensoren sowie die Temperatur in der Umgebung des Bentonitelementes.

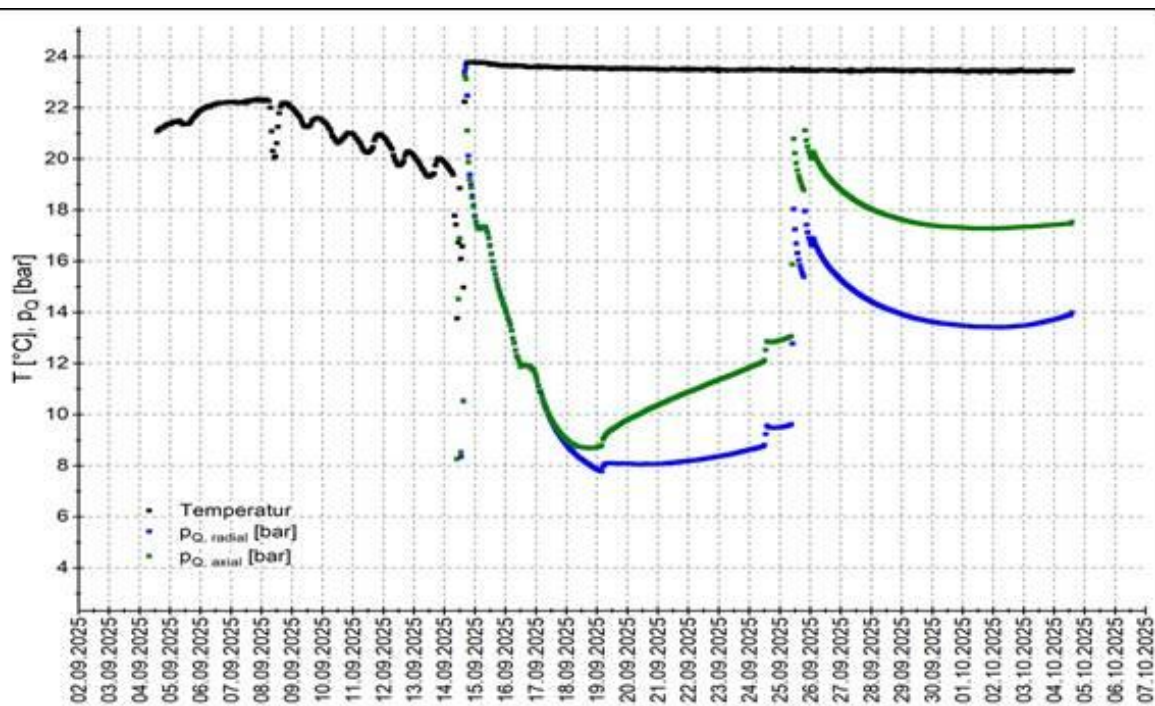


Abb. 20: Druckwerte der radial und axial im Bentonitelement angeordneten Drucksensoren

Bis zum 14.09 spiegeln die Kurven die Lagerungsbedingungen wider, dies ist am Temperaturgang erkennbar. Ab diesem Zeitpunkt erkennt man einen Anstieg in den Druckwerten beider Sensoren. Dieser Druckanstieg repräsentiert den Einbau des Bentonitelements in die Bohrung bis in eine Teufe von 283 m (Teufe der Drucksensoren). Der Druck von 23,4 bar entspricht dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule in dieser Teufe. Die Temperatur von 23,9 °C entspricht der Bohrlochtemperatur in dieser Teufe. Innerhalb der nächsten 24 Stunden sinken die gemessenen Drücke um mehr als 8 bar.

Erklärt wird dies durch den sofort einsetzenden Quellprozess und die dichtende Wirkung des Bentonites. Dadurch wird der Raum um die Drucksensoren vom Bohrloch selbst hydraulisch getrennt. Der Bentonit um die Drucksensoren nahm Wasser auf, wodurch es im Raum um die Sensoren zu einem Druckabfall kommt, der nicht über den hydrostatischen Druck des Bohrloches kompensiert werden konnte. Dieses Verhalten konnte, wie bereits beschrieben, auch aus den Messwerten der Technikumversuche erkannt werden.

Bis 80 Stunden nach Einbau zeigen der Druck des in radialer Richtung angeordneten Sensors und der Druck des in axialer Richtung angeordneten Sensor die gleichen Werte und das gleich Verhalten. Danach ist ein Druckunterschied aber ein ähnliches Druckverhalten zu erkennen. Der Druck fängt an zu steigen. In axialer Richtung wird aber ein höherer Druck aufgebaut als in radialer Richtung.

Der Drucksprung für beide Sensorwerte um 8 bar bis 9 bar am 25.09. wird mit Bewegungen innerhalb des Bentonitelementes erklärt. Danach erfolgt ein Druckabfall, der mit demselben Mechanismus, wie am Anfang des Quellvorganges erklärt wird. Ab dem 2.10. steigt der Druck wieder, was mit dem immer noch stattfindenden Quellen erklärt wird. Das heißt, auch nach 21 Tagen ist das Quellen, entsprechend der sich im Bentonitelement ergebende Permeabilitätsverteilung, nicht beendet.

Da sich das Bentonitelement in seinen mechanischen Eigenschaften vermutlich noch heterogen

und anisotrop verhält, repräsentieren die Druckmesswerte das Verhalten nur eines Punktes in einem Formstein und nicht das Verhalten des ganzen Dichtelementes. Es wird davon ausgegangen, dass die Druckverhältnisse durch die Wasseraufnahme des Bentonits an der Stelle der installierten Sensoren als auch durch lokale Verschiebungen innerhalb des Bentonitelementes bestimmt werden.

Es wird darauf geschlossen, dass von der Bentonitelementoberkante bis zur Stelle, an der sich die Sensoren befanden (Abstand ~ 18 cm) mindestens ein Differenzdruck von 15,5 bar gehalten wurde. Dies entspricht der Druckdifferenz am 19.09. zwischen hydrostatischem Druck der Flüssigkeitssäule in der Bohrung und dem axial wirkenden Druck an der Stelle der Sensoren.

Unterstellt man die vollständige hydraulische Isolierung der Stelle der Sensoren im Bentonitelement vom übrigen Bohrloch, so ergibt sich Mindestquelldruck in axialer Richtung von ca. 17 bar. Dies liegt in der Größenordnung der axialen Quelldrücke der Technikum-versuche.

Aus unserer Sicht ähnelt das Verhalten des Bentonitelementes in der Bohrung, dem des Verhaltens der Bentonitelemente in den Technikumversuchen.

5 Zusammenfassung

Eine Auswertung von internationaler Fachliteratur zur Verwendung von Bentonitpresslingen als Bohrungsabdichtmaterial zeigte, dass diese nicht kontrolliert eingebaut werden können. Damit lassen sich die für die Dichtheit maßgeblichen Parameter – insbesondere die erforderliche Einbaudichte in Kombination mit einem erforderlichen Smektitgehalt – zur Einstellung eines definierten Quelldrucks und der daraus resultierenden Zielpermeabilität nicht zuverlässig sicherstellen. Im klassischen Bergbau wird die Kontrolle dieser Parameter hingegen durch die Verwendung vorgefertigter Bentonitformsteine für den Bau von langzeitstabilen, aktiv dichtenden Schacht- und Streckenverschlüssen erreicht. Für die Verwendung von Bentonitformsteinen in Tiefbohrungen konnten bisher keine Angaben gefunden werden.

In einem in situ-Demonstrationsversuch wurde die grundsätzliche Eignung von Bentonitformsteinen für den Verschluss einer Tiefbohrung geprüft. Eine zu verfüllende Ölbohrung wurde als „Untertagelabor“ ausgewählt, um die Machbarkeit zu demonstrieren. Im Vorfeld wurden Labor- und Technikumversuche durchgeführt, die die Eignung der für den Bohrlochversuch gewählten Bentonitformsteine bezüglich der bestimmenden Kenngrößen Permeabilität, Haftscherfestigkeit und Quelldrücke bestätigten.

Die Einbauausrüstung und die Versuchsplanung wurden so konzipiert, dass strömungstechnische Tests sowohl von oben und von unten möglich waren. Darüber hinaus konnte die Entwicklung des radialen und des axialen Quelldruckes im Bentonitelement, über die Versuchsdauer aufgezeichnet werden.

Die Durchflussteste von oben bzw. von unten konnten zwar nicht durchgeführt werden, aber die während des Untertageversuches aufgenommenen Druckverläufe aus dem Inneren des Bentonitelementes und die zum Ausbau notwendige Abreißkraft belegen ein abdichtendes Quellen. Der Demonstrationsversuch bestätigte die aus den Labor- und Technikum-versuchen vorliegenden Kenntnisse, die Erfahrungen aus dem klassischen Bergbau und zeigte die Machbarkeit eines Bohrlochverschlusses mittels vorgefertigter und kontrolliert eingebrachter Bentonitformsteine zur Abdichtung von tiefen Bohrungen gegenüber der Strömung von Gasen und Flüssigkeiten.

In einem weiteren in situ-Versuch sollen Durchströmungsteste erfolgen.

Abbildungs-/Tabellenverzeichnis

Abbildungen

- Abb. 1: Bentonitpresslinge in Wasser [5]
Abb. 2: Beispiele für den Quelldruck in Abhängigkeit vom Smektitgehalt je Porenvolumen [7]
Abb. 3: Beispiel für erreichbare Quelldrücke in Abhängigkeit der Einbautrockendichte
Abb. 4: Beispiele für die Permeabilität in Abhängigkeit von dem auf das Porenraumvolumen normierten Gehalt an quellfähigen Mineralien für verschiedene Formen von Bentonit und verschiedenen Mischungen mit anderen Materialien [7]
Abb. 5: Beispiel für die erreichbare Permeabilität in Abhängigkeit von der Einbautrockendichte (Trocknungstemperatur 105°C)
Abb. 6: Beispiele für Bentonit als a) Granulat und als b) Presslinge [7]
Abb. 7: Geplanter Demonstrationsversuch in einem Bohrloch
Abb. 8: Für den Demonstrationsversuch angefertigte Bentonitformsteine
Abb. 9: Skizze des Testautoklaven zur Ermittlung der Quelldruckentwicklung mit verschiedenen Flüssigkeiten
Abb. 10: Quelldruckentwicklung mit verschiedenen Flüssigkeiten, mit und ohne vorherige Ölbenetzung, bei einer Einbautrockendichte von ca. 1,70 g/cm³
Abb. 11: a) durchbohrter Bentonitformstein, b) Formsteine zwischen den Kopfstücken, c) Anordnung zwischen den Traversen, d) Versuchsaufbau im Wärmeschrank
Abb. 12: Messwerte eines Technikumversuches, Magenta = Temperatur, Blau = Volumenstrom durch das untere Kopfstück, Hellgrün = Druck am oberen Kopfstück, Dunkelgrün = Druck am unteren Kopfstück, Rot = Axialer Quelldruck
Abb. 13: Permeabilitätsentwicklung während des Versuches
Abb. 14: Tool zum Einbau der Bentonitformsteine als ein Bentonitelement, links die Anschlussstange, rechts in Grün die Bentonitformsteine, eingespannt zwischen zwei Kopfstücken
Abb. 15: In einem Bentonitformstein eingebauter Drucksensor, mit zentraler Hohlstange durch die Mitte des Formsteines, die axialen Löcher zur Einstellung der Einbautrockendichte und eine Stange als Montagehilfe
Abb. 16: Zwischen den Kopfstücken zusammengebaute Bentonitformsteine, die das Bentonitelement bilden
Abb. 17: Bentoniträger mit Anschlussstange (innen mit Memoryspeicher) im Zusammenbauzustand, das Bentonitelement ist für den Transport durch fixierte KG-Rohrhälften geschützt.
Abb. 18: Einbau des Bentoniträgers in das Bohrloch
Abb. 19: Links: Punkt des planmäßigen Abreißens der Hohlstange; Rechts: ausgebautes oberes Kopfstück an der Anschlussstange für das Bohrgestänge
Abb. 20: Druckwerte der radial und axial im Bentonitelement angeordneten Drucksensoren

Tabellen

- Tab. 1: Beispiel für Mittelwerte ausgewählter Eigenschaften von Bentonit [7]
Tab. 2: Ausgewählte Ergebnisse aus den Technikumversuchen

Literatur, Quellen

[1]

Towler B. F., Firouzi M., Mortezaipoor A., Hywel-Evans P. D.:
Plugging CSG Wells with Bentonite: Review and Preliminary Lab Results; Society of Petroleum Engineers (SPE). SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition, November 9–11, (2015); SPE-176987-MS; <https://doi.org/10.2118/176987-MS>

[2]

Corina A. N., Wollenweber J., Fischer H., van der Valk K., Castelein K., Moghadam A., Heerens G.-J.:
Evaluation of Bentonite Application for the Abandonment of Deep Geo-energy Wells. Rock Mechanics and Rock Engineering Vol. 56 (2023), Journal-ISSN (Print): 0723-2632

[3]

Castellanos, E., Villar M.V., Romero E., Lloret, A., Gens A.:
Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite. Physics and Chemistry of the Earth Vol. 33 (2008), S. 516 – 526, Journal-ISSN (Print / ISSN-L) 1474-7065

[4]

Haluk, A.:
Geotechnical characterization and performance assessment of bentonite/sand mixtures for underground waste repository sealing. Applied Clay Science Vol. 49(4) (2010), S. 394 – 399, Journal-ISSN (Print): 0169-1317

[5]

Schmidt, M.W.
Evaluation of compressed sodium bentonite for use in plugging and abandoning oil & gas wells. Interstate Oil and Gas Compact Commission, Bentonite Plugging Subcommittee, Report to the Environmental and Safety Committee, Oklahoma City (2004)

[6]

Engelhardt, I.:
Experimental and Numerical Investigations with Respect to the Material Properties of Geotechnical Barriers. Dissertation. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen, (2004). 89 S. (Auch als Online-Ressource erschienen.)

[7]

DGMK e. V.:
Anwendung von Bentonit für die Endverwahrung von Bohrungen.
DGMK-Projekt 813, Literaturstudie (2019).
Verfügbar unter: <https://dgmk.de/projekte/anwendung-von-bentonit-fuer-die-endverwahrung-von-bohrungen/>

[8]

K+S:
Schachtverschluss Salzdetfurth.
K+S Aktiengesellschaft und Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg, BMBF gefördertes Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0516 (2002).

[9]

Wilsnack, Th., Sitz, P., Heinemann, K.-H., Rumphorst, K., Hunstock, F.:
Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. Kali und Steinsalz, 03/2008.