

# Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden

Technischer Endbericht



# Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden

Technischer  
Endbericht

## Impressum

**Medieninhaber:**  
Land Oberösterreich

**Herausgeber:**  
Amt der Oö. Landesregierung  
Grund- und Trinkwasserwirtschaft  
Projektleiter Dipl.-Ing. Johann Aschauer  
Kärntnerstraße 12, 4021 Linz  
E-Mail: w-gtw.post@ooe.gv.at

**Autoren:**  
Dipl.-Ing. Richard Niederbrucker  
Austrian Research Centers GmbH, 2444 Seibersdorf  
Dipl.-Ing. Norbert Steinbacher  
Oö. Boden- und Baustoffprüfstelle GmbH, 4060 Leonding

**Grafik, Layout (Umschlag):**  
Grund- und Trinkwasserwirtschaft  
text.bild.media GmbH, Linz (742003)  
Linda Dinhobl

**Fotos:**  
Austrian Research Centers GmbH

**Erscheinungsdatum:**  
Oktober 2007

**Copyright:**  
Grund- und Trinkwasserwirtschaft

# INHALT

<b>1</b>	<b>ALLGEMEINES .....</b>	<b>1</b>
1.1	ALLGEMEINES.....	1
1.2	BEAUFTRAGUNG.....	1
1.3	UNTERSUCHUNGSUMFANG .....	1
1.4	UMFANG DER UNTERSUCHTEN MATERIALIEN.....	3
<b>2</b>	<b>LABORUNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>4</b>
2.1	BESTIMMUNG DER SUSPENSIONSSPEZIFISCHEN KENNWERTE.....	4
2.1.1	<i>Allgemeine Beschreibung der maßgebenden Suspensionskennwerte</i> .....	4
2.1.2	<i>Anmischen der Suspensionen</i> .....	6
2.1.3	<i>Ermittelte Suspensionskennwerte</i> .....	7
2.2	BESTIMMUNG DER EIGENSCHAFTEN DER ABGEBUNDENEN SUSPENSIONEN .....	8
2.2.1	<i>Allgemeine Beschreibung der durchgeführten Versuche an Probekörpern der abgebundenen Verpressmaterialien</i> .....	8
2.2.2	<i>Volumenbeständigkeit</i> .....	12
2.2.3	<i>Druckfestigkeit</i> .....	12
2.2.4	<i>Wasserdurchlässigkeit</i> .....	13
2.2.5	<i>Erosionsbeständigkeit</i> .....	13
2.2.6	<i>Beständigkeit der Proben gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung</i> .....	14
2.2.7	<i>Wärmeleitfähigkeit</i> .....	16
2.3	BESTIMMUNG DER SUSPENSIONSEIGENSCHAFTEN AN DER BAUSTELLE .....	18
<b>3</b>	<b>MODELLVERSUCHE .....</b>	<b>21</b>
3.1	ALLGEMEINES/ZIELSETZUNG.....	21
3.2	VERSUCHSAUFBAU UND RANDBEDINGUNGEN .....	21
3.3	ERGEBNISSE DER MODELLVERSUCHE .....	25
3.3.1	<i>Probeverpressung 1</i> .....	25
3.3.2	<i>Probeverpressung 2</i> .....	26
3.3.3	<i>Probeverpressung 3</i> .....	27
3.3.4	<i>Probeverpressung 4</i> .....	29
3.3.5	<i>Probeverpressung 5</i> .....	31
<b>4</b>	<b>AUSWERTUNG UND INTERPRETATION DER UNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>34</b>
4.1	EIGENSCHAFTEN DER FRISCHEN SUSPENSIONEN .....	34
4.1.1	<i>Allgemeines, Bedeutung der Suspensionskennwerte</i> .....	34
4.1.2	<i>Zusammenfassung und Interpretation der gemessenen Suspensionskennwerte</i> .....	35
4.2	EIGENSCHAFTEN DER ABGEBUNDENEN SUSPENSION .....	41
4.2.1	<i>Volumenbeständigkeit</i> .....	41
4.2.2	<i>Einaxiale Druckfestigkeit</i> .....	41
4.2.3	<i>Wasserdurchlässigkeit der ausgehärteten Suspension</i> .....	43
4.2.4	<i>Erosionsbeständigkeit der abgebundenen Suspensionen</i> .....	44
4.2.5	<i>Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechseleinwirkung</i> .....	44
4.2.6	<i>Wärmeleitfähigkeit der befristeten und unbefrosteten Suspensionen</i> .....	47
4.3	ZUSAMMENFASSUNG DER BAUSTELLENMESSUNGEN .....	49

4.4	ZUSAMMENFASSUNG UND INTERPRETATION DER MODELLVERSUCHE .....	49
4.4.1	<i>Allgemeines</i> .....	49
4.4.2	<i>Zusammenfassung und Auswertung der Modellversuche</i> .....	50
4.5	BEURTEILUNG DER UNTERSUCHTEN VERPRESSMATERIALIEN.....	56
<b>5</b>	<b>EMPFEHLUNGEN FÜR DIE ÜBERARBEITUNG DES ÖWAV- REGELBLATTES 207 .....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>VERWENDETE LITERATUR.....</b>	<b>61</b>
<b>ANHANG A: FOTODOKUMENTATION LABORVERSUCHE</b>		
<b>ANHANG B: FOTODOKUMENTATION MODELLVERSUCHE</b>		
<b>ANHANG C: DATENBLÄTTER DER FERTIGPRODUKTE</b>		

# 1 Allgemeines

## 1.1 Allgemeines

Im Zuge der Überarbeitung des ÖWAV-Regelblattes 207, Anlage zur Gewinnung von Erdwärme, werden auch die Anforderungen an das Gesamtsystem Erdwärmesonde neu definiert. Ein wichtiger Bestandteil ist dabei die Verpresssuspension, welche als Verbindung zwischen Sondenrohr und umgebenden Boden fungiert. Die Anforderungen an diese Suspensionen sind dabei sehr vielfältig. Gerade bei Erdwärmesonden müssen die eingesetzten Materialien eine lange Lebensdauer aufweisen damit die Funktionsdauer der gesamten Sonde weit über der langen Amortisationsdauer liegt. In der Praxis werden oft Abdichtungen eingebracht, welche an der Baustelle aus mehreren Komponenten angemischt werden (in Folge als Baustellenmischungen bezeichnet). Diese basieren meist auf Erfahrungswerten der Brunnenbauer und werden unter sehr verschiedenen Randbedingungen hergestellt und in das Bohrloch eingebracht. Überprüfbare Qualitätskriterien und einheitliche Bewertungsmöglichkeiten der auf der Baustelle verwendeten Materialien liegen daher meist nicht vor.

Des Weiteren sind das fachgerechte Einbringen der Sondenrohre in das Bohrloch und der abschließende Verpressvorgang Arbeitsschritte, welche die Qualität der Erdwärmesonde und die Abdichtung der durchörterten Grundwasserhorizonte entscheidend beeinflussen. Besonders die Gewährleistung einer dauerhaften Abdichtung einzelner Grundwasserleiter durch die Verpresssuspension ist für die zuständigen Behörden ein wichtiges Kriterium für die Genehmigung solcher Anlagen.

Daher ist es notwendig bei der Herstellung und den dabei verwendeten Materialien hohe Qualitätsstandards anzuwenden. Eine Festlegung von nachvollziehbaren und auf der Baustelle überprüfbaren Qualitätskriterien und Anforderungen auch für die verwendeten Verpressmaterialien ist daher unumgänglich. Diese sollen aus dem Vergleich von bereits am Markt eingeführten Fertigprodukten sowie von derzeit verwendeten Baustellenmischungen definiert werden. Dazu sollen Laborversuche an frischen als auch an abgebundenen Abdichtungssuspensionen sowie Modellversuche und vor Ort Untersuchungen durchgeführt werden.

## 1.2 Beauftragung

Die Austrian Research Centers GmbH - ARC wurde von der Abteilung Wasserwirtschaft, Grund und Trinkwasserwirtschaft des Landes Oberösterreich mit der Durchführung der Studie „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden“, Aktenzeichen W-GTW-930230/1-2006-Aj/Ms, beauftragt. Die Durchführung der Prüfungen an den frischen Suspensionen sowie an Probekörpern der abgebundenen Suspension erfolgte durch die Oberösterreichische Boden- und Baustoffprüfstelle GmbH.

## 1.3 Untersuchungsumfang

Der Untersuchungsumfang der Studie umfasst Laboruntersuchungen als auch Modellversuche. In den Laboruntersuchungen wurden die Eigenschaften der frischen als auch der abgebundenen Verpressmaterialien ermittelt. Die Laboruntersuchungen wurden in zwei Versuchsserien durchgeführt. Die erste Versuchsserie umfasste dabei fünf verschiedene Materialien, in der zweiten Serie wurden sieben Materialien untersucht.

In den Modellversuchen erfolgte eine möglichst realitätsnahe Nachbildung von Verpresskörpern inklusive der Sondenverrohrung. Bei unterschiedlichen Randbedingungen wurde dabei das hydraulische Verhalten untersucht.

Untersuchungsprogramm im Detail:

#### 1. Laboruntersuchungen:

- Ermittlung der Eigenschaften der frischen Suspension:
  - Trichterauslaufzeit (TAZ)
  - Suspensionsdichte
  - Filtratwasserabgabe
  - Fließgrenze
  - Absetzmaß
- Ermittlung der Eigenschaften der abgebundenen Suspension:
  - Einaxiale Druckfestigkeit zu verschiedenen Abbindezeitpunkten (7, 14, 28 und teilweise 56 Tagen)
  - Wasserdurchlässigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit
  - Erosionsstabilität nach 28 Tagen Abbindezeit
  - Frostbeständigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit
  - Wärmeleitfähigkeit nach 56 Tagen Abbindezeit, sowie nach 28 bzw. 10 Frost-Tauwechsel
- Ermittlung der Suspensionseigenschaften vor Ort
  - Bestimmung der Suspensionskennwerte auf der Baustelle

#### 2. Modellversuche:

- Ermittlung der Systemdurchlässigkeit von Modellverpresskörpern unter verschiedenen Randbedingungen.
- Visualisierung von Wasserwegigkeiten in den Modellverpresskörpern durch Farbtracer
- Beurteilung der Verpresskörper hinsichtlich Homogenität und Vollständigkeit (Hohlraumfreiheit).

## 1.4 Umfang der untersuchten Materialien

Die Studie umfasst handelsübliche Produkte als auch bewährte Rezepturen, welche direkt auf der Baustelle hergestellt werden. In Summe wurden 7 Fertigprodukte und 3 Baustellenmischungen untersucht.

Im Detail waren dies:

- Fertigprodukte:
  - Calidutherm, dornburger zement GmbH & Co.KG
  - ThermoCem, HeidelbergCement
  - Stüwa Press F-10, STÜWA
  - Stüwatherm, STÜWA
  - K-Injekt therm, Küchler Ankertechnik
  - Dämmer Light, BTD- Bohrtechnik AG
  - Duritherm, Fa. Betontechnik GmbH
  - ThermoCem, HeidelbergZement
- Baustellenmischungen:
  - Handmischung der Fa. Forster Brunnenbau
  - Baustellenmischung gem. VDI- Richtlinie
  - Baustellenmischung gem. Schweizer Richtlinie

Die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse werden ohne Zuordnung zur Produktbezeichnung in anonymer Form dargestellt. Die Unterscheidung der Materialien erfolgt aufgrund einer zugeordneten Nummer.

Als Ausgangsmaterial der Baustellenmischungen wurde ein Portlandhüttenzement mit der Bezeichnung CEM II/B-S sowie ein Natriumbentonit mit der Handelsbezeichnung Aktiv- Bentonit B1 verwendet. In Tabelle 1 sind die laut Rezeptur vorgegebenen Zusammensetzungen der Baustellenmischungen zusammengestellt.

Tabelle 1, Zusammensetzung der Baustellenmischungen laut Vorgabe:

Zusammensetzung in kg	Rezeptur		
	Material 3 u. 10	Material 9	Material 8
Wasser	895 kg	50 %	895 kg
Zement	479 kg	10 %	200 kg
Bentonit	63 kg	10 %	100 kg
Quarzmehl 0,063	--	30%	--

Die Mengenangaben in Tabelle 1 ergeben ca. einen Kubikmeter Suspension, für die Laborversuche wurden entsprechend den angegebenen Mengenverhältnissen kleinere Volumen angemischt. Zum Erreichen einer Trichterauslaufzeit von 40-50 Sekunden wurde bei allen drei Rezepturen der angegebene Wassergehalt erhöht.

## 2 Laboruntersuchungen

### 2.1 Bestimmung der suspensionsspezifischen Kennwerte

#### 2.1.1 Allgemeine Beschreibung der maßgebenden Suspensionskennwerte

- Suspensionsdichte

Die Ermittlung der Suspensionsdichte erfolgt im Standzylinder. Dabei wird ein Liter Suspension in den Standzylinder eingefüllt und das Gewicht ermittelt. Aus dem gegebenen Volumen des Standzylinders und der ermittelten Masse kann die Suspensionsdichte errechnet werden.

- Fließgrenze der Suspension

Zu den wesentlichen Fließparametern einer Suspension gehören die Viskosität  $\varepsilon$  und die Fließgrenze  $\tau_f$ . Die Fließgrenze ist als die Scherspannung definiert ab der in einer Suspension Fließen eintritt.

Die Fließgrenze wird standardmäßig mit Hilfe der Kugelharfe von SOOS festgestellt. Diese besteht aus 10 Stahlkugeln mit unterschiedlichem Durchmesser, die an einer Platte mit dünnen Fäden befestigt sind. Bei der Messung wird die Platte abgesenkt, sodass die Kugeln in die Suspension eintauchen, siehe Abb.1. Jeder der 10 Kugeln ist bei gegebener Suspensionsdichte eine andere spezifische Fließgrenze zugeordnet, bei der sie in der Suspension noch in Schwebelage bleiben. Kugeln, deren spezifische Fließgrenze kleiner ist als die der Suspension schwimmen auf der Oberfläche, während Kugeln mit größerer Fließgrenze eintauchen bis sie am gespannten Faden hängen. Als Messergebnis wird die spezifische Fließgrenze der größten Kugel mit gespanntem Faden ermittelt.

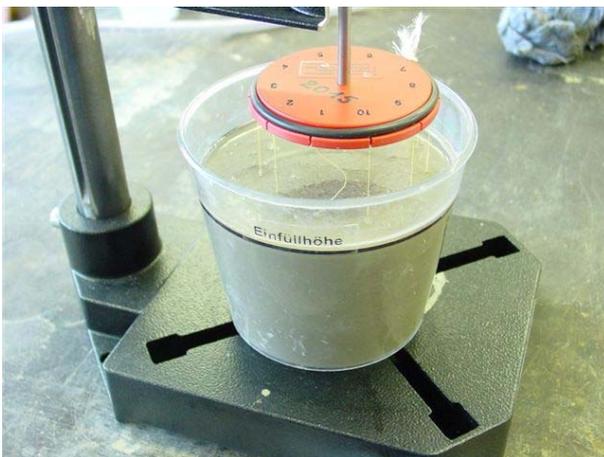


Abbildung 1: Bestimmung der Fließgrenze mittels Kugelharfe

- Bestimmung des Fließverhaltens mit dem MARSH – Trichter

Der MARSH – Trichter besteht aus einem 1,5 l fassenden Trichter, dessen Konusspitze ohne Einschnürung in ein Auslaufröhrchen,  $\varnothing$  5 mm, übergeht. Es werden die Zeiten gemessen, in denen 1,0 l der eingefüllten Suspension

durch das Auslaufröhrchen abfließen. Die gemessenen Auslaufzeiten sind von der Wichte, der Fließgrenze und der Viskosität der Suspension abhängig und im allgemeinen nur als relative Vergleichswerte für die Fließeigenschaften verschiedener Mischungen anzusehen. Ein Liter Wasser fließt in ca. 10 Sekunden aus dem MARSH Trichter mit Auslaufdurchmesser 5 mm ab. Absolutwerte für die Fließgrenze, sowie sonstige Parameter lassen sich nicht unmittelbar bestimmen. Abb.2 zeigt die Versuchsdurchführung.



Abbildung 2: Bestimmung der TAZ mittels Marshtrichter

- Bestimmung der Filtratwasserabgabe mit der Filterpresse

Mit dem Filterabpressversuch wird die Filtration an einer porösen Grenzschicht simuliert, deren Poren kleiner als die Partikelgröße der Suspension sind. Zur Durchführung des Versuches wird die zu prüfende Suspension in den zylindrischen Filterpressentopf gefüllt, dieser besitzt auf der Unterseite ein Sieb welches mit Filterpapier abgedeckt ist. Der Filtertopf wird verschlossen und mit 7 bar Druckluft von Oben beaufschlagt. Das in 7,5 Minuten durch das Sieb ausgepresste Wasser wird aufgefangen und als Filtratwasserabgabe bezeichnet.



Abbildung 3: Filterpresse zur Bestimmung der Filtratwasserabgabe

- Bestimmung des Absetzmaßes

Bei frischen Dichtsusensionen können Sedimentationseffekte auftreten, dabei handelt es sich um vertikale Feststoffverlagerungen, die in der Regel mit einem Absondern von Wasser an der Oberfläche der Dichtmasse verbunden sind. Die Menge dieser Absonderung von klarem Wasser an der Oberfläche der Suspension wird bestimmt und in Relation zur Gesamtmenge der Suspension gesetzt. Die Messung erfolgt in dem ein Standzylinder mit einem Liter frischer Suspension befüllt wird. Nach drei Stunden wird der Anteil an abgesetztem Wasser bestimmt.

### 2.1.2 Anmischen der Suspensionen

Das Anmischen der Suspensionen erfolgte auf Basis einer vorgegebenen Trichterauslaufzeit zwischen 40 und 50 Sekunden. Durch diese Vorgabe soll die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien sowie die grundsätzliche Durchführbarkeit der weiteren Suspensionsversuche gewährleistet werden. Zu diesem Zweck wurde beim Anmischen einiger Fertigprodukte als auch bei den Baustellenmischungen ein größerer Anteil an Wasser verwendet als die Herstellerangaben, bzw. die Rezeptur vorschreiben.

- Anmischvorgang der Fertigprodukte

Das Anmischen der Fertigprodukte erfolgte generell nach Angaben des jeweiligen Herstellers. Die laut Herstellerangaben vorgeschlagene Wassermenge wird vorab in das Rührgefäß eingewogen. Nach Start des Rührers erfolgt die Zugabe der abgewogenen Menge an Feststoff bei einer Umdrehungszahl von 1000 U/min in das Rührgefäß. Die Mischdauer beträgt 2 Minuten, im Anschluss daran erfolgt zügig die Bestimmung der Trichterauslaufzeit. Ist diese zu lang, wird unter weiterem Rühren sukzessive Wasser in die Suspension zugesetzt bis eine entsprechende TAZ (40 bis 50 Sekunden) erreicht ist. Der sich daraus errechnete W/F- Wert wird dokumentiert. Danach erfolgt zügig die Ermittlung der weiteren Suspensionskennwerte.

- Anmischvorgang der Baustellenmischungen

Beim Anmischen der Baustellenmischungen wurde generell versucht die in den einzelnen Rezepturen angegebenen Mengenangaben einzuhalten. Aufgrund der fehlenden Spezifikation der zu verwendeten Ausgangsstoffe erfolgte die Festlegung folgender Materialien für alle Baustellenmischungen:

- Zementsorte: CEM II/B-S 32,5 R
- Bentonitsorte: Natriumbentonit mit der Handelsbezeichnung Aktiv Bentonit IBECO CT
- Bei einer Rezeptur zusätzlich Quarzmehl 0,063 mm

Das Anmischen der Baustellenmischungen erfolgte generell nach folgender Prozedur:

- Einrühren der entsprechenden Menge Bentonit in die vorgegebene Menge Wasser
- Anquellen des Bentonits im Wasser unter ständigem Rühren für ca. 10 Minuten.
- Erst danach Zugabe der entsprechenden Zementmenge
- Ermittlung der TAZ, falls zu hoch erfolgte die Zugabe von Wasser

Dieser Anmischvorgang mit Anquellen des Bentonits wird vom Hersteller empfohlen.

Bei folgenden Rezepturen musste zum Erreichen der vorgegebenen Trichterauslaufzeiten zwischen 40-50 Sekunden der Wasseranteil erhöht werden (Werte auf 1m<sup>3</sup> Suspension hochgerechnet):

Tabelle 2, Zusammenstellung der abgeänderten Rezepturen der Baustellenmischungen, Werte gerundet

Zusammensetzung	Material 3	Material 10	Material 9	Material 8
Wasser	860kg	820 kg	920 kg	890 kg
Zement	360kg	460 kg	70 kg	180 kg
Bentonit	50kg	60 kg	70 kg	90 kg
Quarzmehl 0,063	-	-	140 kg	-

### 2.1.3 Ermittelte Suspensionskennwerte

In Tabelle 3 sind die Suspensionskennwerte der ersten Versuchsserie, in Tabelle 4 die der zweiten Serie zusammengestellt. Die Bezeichnung der Materialien erfolgt durch eine dem jeweiligen Produkt zugeordnete Nummer.

Tabelle 3, Zusammenstellung der Suspensionskennwerte, Serie 1

Suspensionskennwerte	Verpressmaterial				
	1	2	3	4	5
Wasser/Feststoffwert W/F- Wert	0,64	0,90	2,11	0,64	0,51
Suspensionsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,59	1,38	1,27	1,63	1,72
Trichterauslaufzeit (TAZ) (sek.)	45	54	45	43	50
Fließgrenze (N/m <sup>2</sup> )	53	16	47	34	44
Filtratwasserabgabe (ml)	117	123	91	120	75
Absetzmaß nach 3 Std. (ml)	4,2	7,7	15,4	33,1	13,0

Tabelle 4, Zusammenstellung der Suspensionskennwerte, Serie 2

Suspensionskennwerte	Verpressmaterial						
	6	7	8	9	10	11	12
Wasser/Feststoffwert W/F- Wert	0,65	1,87	3,33	3,26	1,65	0,66	0,46
Suspensionsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,57	1,29	1,15	1,18	1,31	1,50	1,77
Trichterauslaufzeit (TAZ) (sek.)	47	47	46	46	44	47	50
Fließgrenze (N/m <sup>2</sup> )	54	66	68	67	66	54	52
Filtratwasserabgabe (ml)	107	31	47	50	92	82	113*
Absetzmaß nach 3 Std. (ml)	5,3	0,9	0,3	0,6	5,3	0,6	15,7

\*Bereits nach 90 sek. erreicht

## 2.2 Bestimmung der Eigenschaften der abgebundenen Suspensionen

### 2.2.1 Allgemeine Beschreibung der durchgeführten Versuche an Probekörpern der abgebundenen Verpressmaterialien

- Probenvorbereitung

Zur Ermittlung der Eigenschaften der abgebundenen Verpressmaterialien wurde die frische Suspension in zylindrische Formen mit den Abmessungen D= 80 mm, H= 160 mm abgefüllt. Um ein Austrocknen der Probekörper während der Abbindezeit zu verhindern wurden diese mit PE Folie abgedeckt und im Klimaraum bei 20°C und 90 % Luftfeuchtigkeit gelagert. An den so hergestellten Probekörpern erfolgte die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit, der Wasserdurchlässigkeit, der Erosionsbeständigkeit, der Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechseln und der Wärmeleitfähigkeit.

- Volumenbeständigkeit des Materials

Die Volumenbeständigkeit beschreibt die Volumenveränderung der Suspension im Zuge des Abbinde- und Aushärtevorganges. Bestimmt wird dabei die Probenhöhe von ausgehärteten Probekörpern, diese wird in Relation zur Ausgangsprobenhöhe gesetzt. Die Ermittlung der Volumenbeständigkeit erfolgte nur an Probekörper der Versuchsserie 1.

- Bestimmung der einaxiale Druckfestigkeit gem. ÖNORM B 4415

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgt gem. ÖNORM B 4415 in einer Prüfpresse. Dabei wird ein Probekörper mittels Hydraulikstempel mit gleich bleibendem Vorschub axial belastet und die maximale Prüflast aufgezeichnet. Die auf den Querschnitt umgelegte Spannung wird als einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  bezeichnet. Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgte an 7, 14, 28 und 56 Tage alten Prüfkörpern.

- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit gem. ÖNORM B 4422-1

Die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten  $k_f$  erfolgt gem. ÖNORM B 4422-1 bei fallender Druckhöhe. Der hydraulische Gradient beträgt dabei im Mittel  $i = 30$ . Der Probekörper wird dabei von unten nach oben durchströmt wobei die Wassermenge je Zeiteinheit registriert wird.

- Bestimmung der Erosionsbeständigkeit

Unter Erosionsstabilität versteht man die Stabilität eines Materials gegen Erosion aufgrund von strömendem Wasser. Die Bestimmung der Erosionsstabilität erfolgt mit Hilfe des Pinhole- Tests. Dabei wird der Prüfkörper mit einer durchgehenden Bohrung von 1 mm Durchmesser versehen und in die Prüfapparatur eingebaut. Im Versuch erfolgt die Durchströmung diese Bohrung mit Wasser. Durch Vergleich der gemessenen Wassermengen in der Zeiteinheit kann die Vergrößerung des Strömungskanals durch das strömende Wasser dargestellt werden. Am Ende des Versuches wird der Probekörper ausgebaut und beurteilt. Bei nicht erosionsstabilen Materialien erhöht sich im Zuge des Versuches die durchströmende Wassermenge und es bildet sich ein Erosionstrichter an der Bohrung. Abbildung 4 zeigt schematisch den Versuchsaufbau, in Abbildung 5 ist die Auswertung dargestellt.

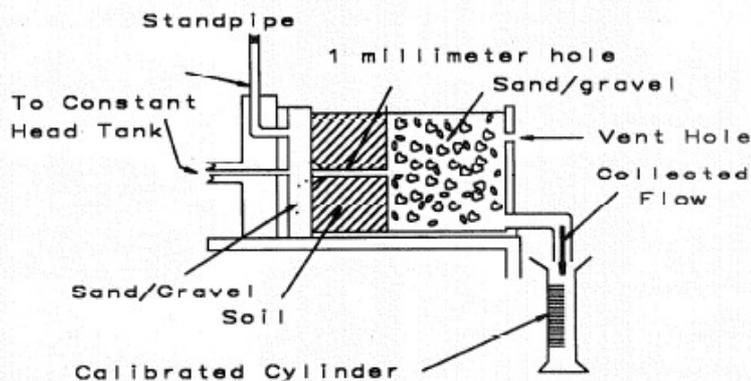


Abbildung 4, Schematische Darstellung Pinhole Test

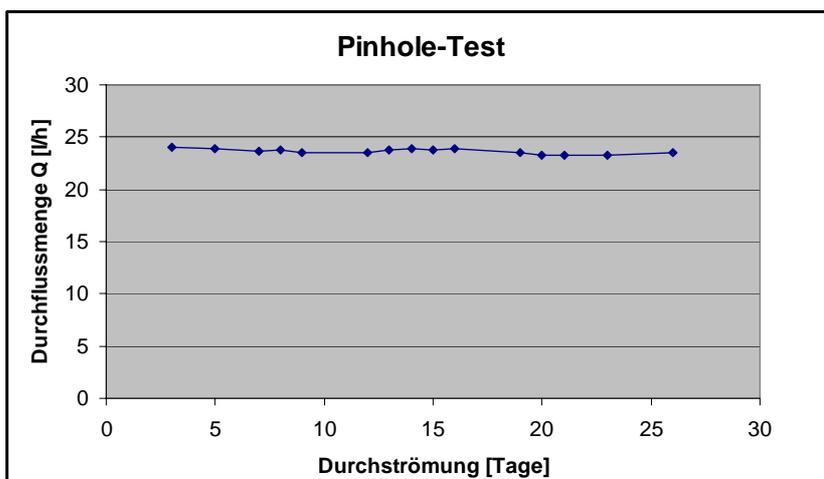


Abbildung 5, Auswertung Pinhole-Test

- Bestimmung der Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung

Die Prüfung der Frostbeständigkeit erfolgt für Betone gemäß ÖNORM B 3303. Dabei werden Probekörper mit einem Alter von mindestens 28 Tagen 56 Frost- Tauwechseln bei  $-15^{\circ}$  (XF1) bzw.  $-20^{\circ}$  (XF3) unterzogen. Die Abwitterung (Gewichtsverlust) der so geprüften Probekörper bzw. die Änderung der Schalllaufzeit darf einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreiten. Dieses Kriterium erscheint für Verpressmaterialien von Erdwärmesonden als nicht geeignet. Die laut Norm vorgegebenen Befrostungstemperaturen von  $-15$  bzw.  $-20^{\circ}\text{C}$  werden auch bei übermäßigem Wärmeentzug in der Tiefsonde nicht erreicht. Es erfolgte daher in Absprache mit dem Auftraggeber die Festlegung von folgendem abgeänderten Temperaturprofil für die Frost-Tauwechselbeanspruchung:

- 8 Stunden Abkühlen von  $+10^{\circ}\text{C}$  auf  $-10^{\circ}\text{C}$
- 4 Stunden konstante Temperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$
- 8 Stunden auftauen auf  $+10^{\circ}\text{C}$
- 4 Stunden konstante Temperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$

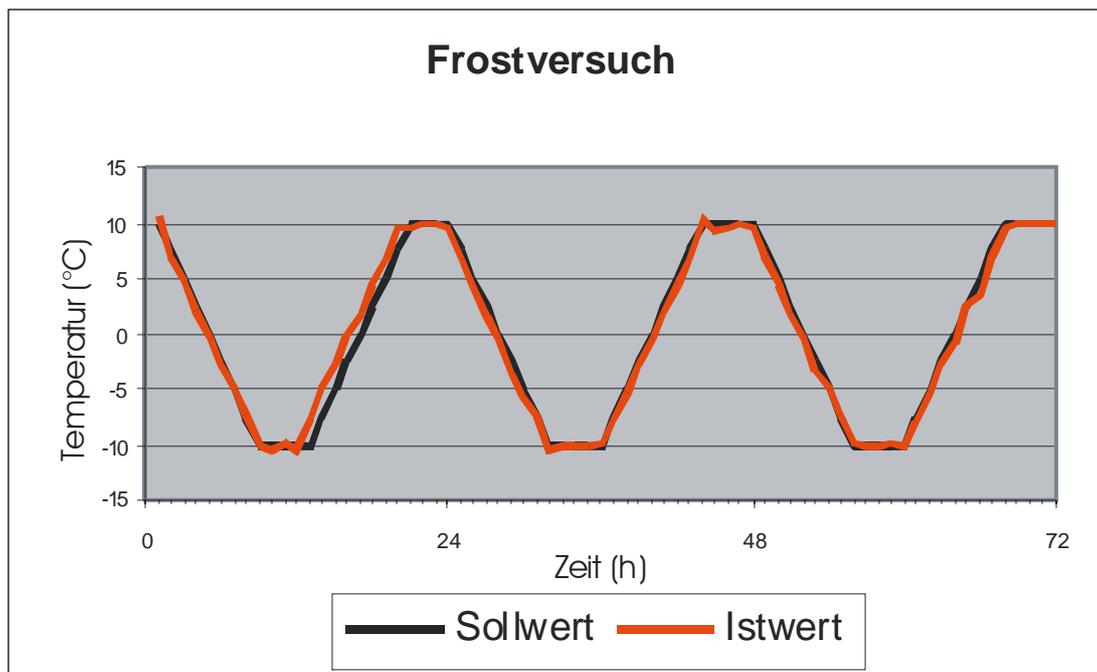


Abbildung 6, grafische Darstellung des Temperaturprofils

Als weitere Abweichung zu den Normversuchen erfolgte die Lagerung während des Versuches nicht in Wasser, da dies teilweise zu einer vollständigen Zerstörung der Probekörper führen würde. Die in den verschiedenen Rezepturen verwendeten Quellphasen (Tonminerale) würden beim Einfrieren Wasser abgeben und beim Auftauen dieses wieder aufnehmen. Dadurch entsteht ein Schrumpf- und Quellprozess, welcher den Probekörper zerstört. Die Abmessungen der Prüfkörper betrug  $D=80\text{ mm}$ ,  $H=80\text{ mm}$ , von jedem Material wurden 2 Prüfkörper beaufrostet. Nach 28 Frost-Tauzyklen erfolgte eine visuelle Beurteilung der Probekörper sowie die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit als objektiver Parameter. Aus dem Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit mit einer gleichaltrigen, jedoch nicht gefrostenen Probe, können eventuelle strukturelle Schwächungen infolge der Frosteinwirkung

aufgezeigt werden. Bei Versuchsserie 2 wurde zusätzlich eine visuelle Beurteilung als auch eine Bestimmung der Druckfestigkeit an Probekörpern, welche 10 Frost –Taufzyklen ausgesetzt waren, durchgeführt.

Um den Prozess der Frosteinwirkung in der verpressten Sonde realitätsnahe zu simulieren erfolgte in der ersten Untersuchungsserie ein zweiter Frost-Tauwechselfersuch. Dabei wurde ein quaderförmiger Probekörper mit den Abmessungen 15x15x5 cm hergestellt. Der Probekörper wurde dabei an der Unterseite und an den Seitenflächen mit wärmedämmendem Material umgeben, sodass nur die mit PE- Folie abgedeckte Oberseite direkt dem Frost ausgesetzt ist. Dies entspricht in etwa den Verhältnissen in der verpressten Sonde, da hier eine mögliche Befrostung nicht allseitig auf die Verpressung einwirkt, sondern diese nur von den Sondenrohren ausgeht. In Tabelle 5 sind die Randbedingungen beider Frost-Tauwechselfersuche zusammengestellt.

Tabelle 5, Randbedingungen der Frost-Tauwechselfersuche:

Randbedingungen:	Frost-Tauwechselfersuch	
	Versuch 1	Versuch 2
Form/Abmessung Probekörper	Zylinder, D=80mm, H=80mm	Quader, 150x150x50 mm
Temperaturprofil	+10°C bis -10°C	+10°C bis -10°C
Anzahl der F-T-Wechsel	10/28 Serie 1 und 2	28 nur Serie 1
Befrostung	allseitig	Bevorzugt an der Oberseite
Beurteilung	Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit sowie der Wärmeleitfähigkeit vor und nach Befrostung	Visuelle Beurteilung des Probekörpers nach Befrostung

Der Frost- Tauwechselfersuch 2 wurde nur an Versuchsserie 1 ausgeführt.

- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an den im Frost-Tauwechselfersuch befestigten Probekörpern als auch an gleichaltrigen unbefrostenen Proben. Aus dem Vergleich beider Messwerte kann auf eventuelle Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit infolge der Frosteinwirkung geschlossen werden. Die Messungen wurden von der Fa. Heidelberger Cement mit dem Handmessgerät Isomet 2104 der Fa. Applied Precision Ltd ausgeführt. Bei der Probenserie 1 wurden dabei die Proben für beide Befrostungsversuche gemessen.

### 2.2.2 Volumenbeständigkeit

Die Volumenbeständigkeit der untersuchten Suspensionen wurde durch das Vermessen der Höhe des abgebundenen Probekörpers ermittelt. Die Abmessung der frischen Proben betragen  $D=80$  mm,  $H=160$  mm. Durch Sedimentationsvorgänge während des Abbindens kam es zum Absetzen von klarem Wasser, was die Höhe des abgebundenen Probekörpers verringerte. In Tabelle 6 sind die Abmessungen der abgebundenen Probekörper für Versuchsserie 1 dargestellt.

Tabelle 6, Zusammenstellung der vermessenen Probekörper, Serie 1

Abmessungen Probekörper	Verpressmaterial				
	1	2	3	4	5
Probekörperhöhe nach Aushärtung (mm)	156,32	156,80	153,12	155,52	156,80
Prozent von Ausgangshöhe (160 mm) (%)	2,3	2,0	4,3	2,8	2,0

### 2.2.3 Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit der abgebundenen Probekörper wurde mittels einaxialen Druckversuchen gem. ÖNORM B 4415 ermittelt. Die Versuche wurden nach 7, 14, 28 und bei Versuchsserie 1 auch nach 56 Tagen Aushärtezeit durchgeführt. In Tabelle 7 und 8 sind die Ergebnisse für beide Versuchsserien zusammengestellt.

Tabelle 7, Zusammenstellung der ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten, Serie 1

Einaxiale Druckfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	Verpressmaterial				
	1	2	3	4	5
7 Tage	2,1	0,5	0,3	1,6	0,4
14 Tage	2,3	1,1	0,5	2,2	0,6
28 Tage	2,4	1,5	0,9	2,9	0,7
56 Tage	2,8	1,6	1,3	3,2	0,9

Tabelle 8, Zusammenstellung der ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten, Serie 2

Einaxiale Druckfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	Verpressmaterial						
	6	7	8	9	10	11	12
7 Tage	0,13	0,56	-	-	0,35	1,36	1,13
14 Tage	0,41	1,19	0,06	0,015	0,72	1,90	1,73
28 Tage	1,30	1,74	0,09	0,025	1,41	3,70	2,16

### 2.2.4 Wasserdurchlässigkeit

Zum Nachweis der Wirksamkeit als hydraulische Barriere wurde der Wasserdurchlässigkeitskoeffizient  $k_f$  gem. ÖNORM B 4422-1 ermittelt. Der Versuch erfolgte nach 28 Tagen Aushärtezeit. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 und 10 zusammengestellt.

Tabelle 9, Zusammenstellung der ermittelten Wasserdurchlässigkeiten, Serie 1

Wasserdurchlässigkeit	Verpressmaterial				
	1	2	3	4	5
$K_f$ (m/s)	6E-9	1E-9	1E-8	1E-9	2E-9

Tabelle 10, Zusammenstellung der ermittelten Wasserdurchlässigkeiten, Serie 2

Wasserdurchlässigkeit	Verpressmaterial						
	6	7	8	9	10	11	12
$K_f$ (m/s)	3E-9	6E-9	2E-8	4E-8	5E-9	3E-9	2E-9

### 2.2.5 Erosionsbeständigkeit

Für jedes untersuchte Verpressmaterial wurde ein spezieller Probekörper hergestellt und dieser nach 28 Tagen Abbindezeit in die Versuchsapparatur eingebaut. Die Bohrung im Versuchskörper wird dabei 28 Tage lang bei einem hydraulischen Gradienten von  $i=50$  mit Wasser durchströmt und die durchtretende Wassermenge je Zeiteinheit gemessen. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an ÖN B 4452. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 11 und 12 zusammengestellt

Tabelle 11, Zusammenstellung der Ergebnisse Pinhole-Test, Serie 1, 28 Tage Durchflusszeit

Erosionsbeständigkeit	Verpressmaterial				
	1	2	3	4	5
Beurteilung	erosionsbeständig konstante Durchflussrate je nach Probe zwischen 20 und l/h				

Tabelle 12, Zusammenstellung der Ergebnisse Pinhole-Test, Serie 2, 10 Tage Durchflusszeit

Erosionsbeständigkeit	Verpressmaterial						
	6	7	8	9	10	11	12
Beurteilung	erosionsbeständig, konstante Durchflussrate $q = 25 \text{ l/h}$		Durchflussrate $q > 50 \text{ l/h}$ Hinweis auf Erosionsinstabilität	nicht erosionsbeständig $q > 200 \text{ l/h}$	erosionsbeständig Konstante des Wasserdurchlaufes $q = 25\text{-}35 \text{ l/h}$		

## 2.2.6 Beständigkeit der Proben gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung

Die Ergebnisse der Frost-Tauwechselversuche sind in Tabelle 13 und 14 für Serie 1, Versuch 1 und 2 zusammengestellt. Bei Versuch 2 erfolgte die Befrostung von 2 Probekörpern, in Tabelle 14 mit A und B bezeichnet. Tabelle 15, 16 und 17 zeigen die Ergebnisse für Serie 2, Versuche 1 nach 10 bzw. 28 Frost-Tauwechseln.

Tabelle 13, Zusammenstellung der Frost-Tauwechselbeanspruchung, Versuch 1, Serie 1, 28 Frost-Tauwechsel

Beurteilungskriterium	Verpressmaterial				
	1	2	3	4	5
Visuelle Beurteilung nach Befrostung	Kein Riss	Kein Riss	Starke Risse, partielle Zerstörung	Risse 0,1 bis 0,2 mm	Kein Riss
Einaxiale Druckfestigkeit gleichaltrige Vergleichsprobe ( $\text{N/mm}^2$ ) nach 56 Tagen	2,61	1,90	1,29	3,57	1,20
Einaxiale Druckfestigkeit befestete Probe ( $\text{N/mm}^2$ )	1,64	1,83	-	2,73	0,90
Abfall der Druckfestigkeit (%)	37	4	100	24	27

Tabelle 14, Zusammenstellung der Frost-Tauwechselbeanspruchung, Versuch 2, Serie 1, 28 Frost-Tauwechsel

Verpressmaterial	Beurteilungskriterium		
	Risstiefe (mm)	Rissstärke (mm)	Rissverlauf
1/A	27	0,1	Horizontalriss, durchgehende
1/B	25	< 0,1	Horizontalriss, durchgehende
2/A	Keine Risse sichtbar		
2/B			
3/A	20	< 0,1	Horizontalriss, durchgehend
3/B	15 - 25	< 0,1	Horizontalriss, durchgehend
4/A	10 – 45	0,1	Horizontalriss, durchgehend
4/B	10 – 50	0,2	Horizontal- und Vertikalriss durchgehend
5/A	15 - 20	0,1	Horizontalriss, durchgehend Kante abgebrochen
5/B	0 - 15	0,2	Horizontalriss, durchgehend

Tabelle 15, Zusammenstellung der Frost-Tauwechselbeanspruchung, Versuch 1, Serie 2, nach 10 Frost- Tauwechsel

Beurteilungskriterium	Verpressmaterial						
	6	7	8	9	10	11	12
Einaxiale Druckfestigkeit gleichaltrige Vergleichsprobe (N/mm <sup>2</sup> ) nach 38 Tagen	2,0	2,6	-	-	1,8	4,3	2,7
Einaxiale Druckfestigkeit befestete Probe (N/mm <sup>2</sup> )	1,4	2,0	Probe zu weich	Probe zu weich	1,4	3,1	1,2
Abfall der Druckfestigkeit (%)	30	23	-	-	22	28	56

Tabelle 16, Zusammenstellung der Frost-Tauwechselbeanspruchung, Versuch 1, Serie 2, nach 28 Frost- Tauwechsel

Beurteilungskriterium	Verpressmaterial						
	6	7	8	9	10	11	12
Einaxiale Druckfestigkeit gleichaltrige Vergleichsprobe (N/mm <sup>2</sup> ) nach 56 Tagen	2,6	3,3	-	-	2,0	4,5	2,7
Einaxiale Druckfestigkeit befestete Probe (N/mm <sup>2</sup> )	1,3	2,1	Probe zu weich	Probe zu weich	1,1	3,7	1,8
Abfall der Druckfestigkeit (%)	49	36	-	-	42	18	33

Tabelle 17, Visuelle Beurteilung der befestigten Probekörper, Versuch 1, Serie 2, nach 10 und 28 Frost- Tauwechsel

Verpressmaterial	Beurteilung nach 10 F/T-Wechsel	Beurteilung nach 28 F/T-Wechsel
6	Seitliche Risse ca. 0,2 mm	Horizontale Risse ca. 0,2 mm
7	Sichtbare Frostschäden an Stirnflächen	Sichtbare Frostschäden an Stirnflächen
8	Probekörper teilweise gebrochen, horizontale Risse	
9	Probekörper nicht prüfbar	
10	Seitliche Risse ca. 0,2 mm	Sichtbare Frostschäden an Stirnflächen
11	Keine sichtbaren Schäden	Keine sichtbaren Schäden
12	Vertikalriss an Stirnseite ca. 1 mm	Starke Risse

### 2.2.7 Wärmeleitfähigkeit

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte durch die Fa. HeidelbergCement. Die Messungen wurden dabei an Probekörpern nach Befrostung als auch an gleichaltrigen Parallelproben durchgeführt um Veränderungen durch die Frost-Tauwechselbeanspruchung zu registrieren. Verwendet wurde dabei das Handmessgerät „Isomet 2104“ der Fa. Applied Precision Ltd.

Bei der ersten Versuchsserie wurden dabei die Probekörper beider Befrostungsversuche gemessen, bei der zweiten Serie erfolgte die Messung der zylindrischen Probekörper (Frostversuch 1). In Tabelle 18 und 19 sind die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Serie 1, in Tabelle 20 für Serie 2 dargestellt.

Tabelle 18, Zusammenstellung der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten, Serie 1, Befrostungsversuch 1 nach 28 FTW

Verpressmaterial	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)		Beurteilung
	Vor Befrostung	Nach Befrostung	
1/1	1,23	0,85	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
1/2	1,30	Keine Messung	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
2/1	1,87	1,82	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
2/2	1,88	Keine Messung	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
3/1	0,84	0,82	Leichte Risse an der Oberfläche erkennbar
3/2	0,87	Keine Messung	Risse und Abplatzungen an der Oberfläche
4/1	1,36	1,15	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
4/2	1,27	Keine Messung	Starke Längsrisse
5/1	1,57	1,31	Oberfläche durchgerissen
5/2	1,45	Keine Messung	Leichte Abplatzungen an der Oberfläche, kleiner Riss erkennbar

Tabelle 19, Zusammenstellung der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten, Serie 1, Befrostungsversuch 2 nach 28 FTW

Verpressmaterial	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)		Beurteilung
	Vor Befrostung	Nach Befrostung	
1/A	1,44	1,42	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
1/B	1,4	1,37	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
2/A	1,95	1,89	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
2/B	1,92	1,94	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
3/A	0,85	0,82	Leichte Risse an der Oberfläche erkennbar
3/B	0,86	0,82	Risse und Abplatzungen an der Oberfläche
4/A	1,40	1,34	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
4/B	1,37	1,31	Starke Längsrisse
5/A	1,66	1,42	Oberfläche durchgerissen
5/B	1,66	1,58	Leichte Abplatzungen an der Oberfläche, kleiner Riss erkennbar

Tabelle 20, Zusammenstellung der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten, Serie 2, Befrostungsversuch 1 nach 10 FTW

Verpressmaterial	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)		Beurteilung
	Vor Befrostung	Nach Befrostung	
6/1	0,90	0,89	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
7/1	0,77	0,71	Probe intakt, kleinflächige Verfärbungen
8/1	-	-	Probe nicht messbar
9/2	-	-	Probe nicht messbar
10/1	0,72	0,70	Probe intakt, kleinflächige Verfärbungen
11/1	2,39	2,13	An der Oberfläche keine Risse erkennbar
12/1	1,12	0,73	Zentraler Riss durch Stirnfläche

## 2.3 Bestimmung der Suspensionseigenschaften an der Baustelle

Im Zuge des Verpressvorganges von Erdwärmesonden wurden die Suspensionskennwerte vor Ort auf zwei Baustellen ermittelt. Dadurch sollten einerseits die im Labor ermittelten Kennwerte verifiziert und andererseits die Messungen selbst hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit auf der Baustelle untersucht werden.

Die Entnahme der frischen Suspension erfolgte dabei direkt aus dem Mischer bzw. am Bohrlochmund.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Randbedingungen der Messungen sowie die Ergebnisse dargestellt.

Die Abbildungen zeigen das Anmischen der Suspensionen, sowie den Verpressvorgang.

- Baustelle 1

Tabelle 21, Zusammenstellung der Randbedingungen Baustellenmessung 1

Randbedingung	Beschreibung
Geologie	Kristallin der Böhmisches Masse
Hydrogeologie	Porengrundwasserleiter
Bohrspülung	keine
Verpressmaterial	Material 12
Anmischvorgang	Anmischen in der Schneckenpumpe, direkte Zugabe Wasser
Verpressvorgang	Verpressung über fixen Verpressschlauch, welcher in der Bohrung verbleibt

Tabelle 22, Zusammenstellung der Ergebnisse Baustellenmessung 1

Suspensionskennwerte	Verpressmaterial	
	12	
Frische Suspensionsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,80	
Suspensionsdichte am Bohrlochmund (g/cm <sup>3</sup> )	1,68	
Trichterauslaufzeit (TAZ) (sek.)	Nicht messbar	
Fließgrenze (N/m <sup>2</sup> )	Nicht messbar	



Abbildung 7, Schneckenpumpe zum Anmischen



Abbildung 8, Austreten der Suspension am Bohrlochmund

- Baustelle 2

Tabelle 23, Zusammenstellung Randbedingungen für Baustellenmessung 2

Randbedingung	Beschreibung
Geologie	Kristallin der Böhmisches Masse
Hydrogeologie	Kluftgrundwasserleiter, stark gespannt
Bohrspülung	keine
Verpressmaterial	Material 10
Anmischvorgang	Anmischen der Suspension mittels Rührwerk
Verpressvorgang	Verpressung über Verpressgestänge

Tabelle 24, Zusammenstellung Messwerte Baustellenmessung 2

Suspensionskennwerte	Verpressmaterial	
	10	
Frische Suspensionsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,34	
Suspensionsdichte Bohrlochmund (g/cm <sup>3</sup> )	am	1,28
Trichterauslaufzeit (TAZ) (sek.)	Nicht messbar	
Fließgrenze (N/m <sup>2</sup> )	47	



Abbildung 9, Anmischen der Suspension mit Rührwerk



Abbildung 10, Verpressung mittels Verpressgestänge

## 3 Modellversuche

### 3.1 Allgemeines/Zielsetzung

Im Gegensatz zu den Laborversuchen an frischen und abgebundenen Verpresssuspensionen wird in den Modellversuchen das Systemverhalten der gesamten Erdwärmesonde (Sondenverrohrung und Verpressmaterial) untersucht. Dabei sollen folgende in der Praxis auftretende Fragestellungen abgehandelt werden:

- Einfluss von Zentrierhilfen auf den Verpressvorgang, bzw. auf die Homogenität des Verpresskörpers.
- Anliegen der Sondenrohre an der Bohrlochwand und damit nicht vollständige Umhüllung mit Suspension.
- Mögliche Fehlstellen im Verpresskörper in schwer zugänglichen Zwischenräumen der Sondenrohre.
- Generelle Systemdurchlässigkeit der Erdwärmesonde

Zu diesem Zweck erfolgte die Herstellung von fünf Verpresskörpern mit eingebauter Doppel U Sondenverrohrung unter verschiedenen Randbedingungen. Jeder Verpresskörper wurde dabei mit unterschiedlichen Randbedingungen hergestellt, bzw. untersucht. Die Untersuchung jedes einzelnen Probekörpers erfolgte nach einer 24-stündigen Abbindephase. Zur Ermittlung der Systemdurchlässigkeit wird der Verpresskörper mit unterschiedlichen Wasserdrücken beaufschlagt. Zur Sichtbarmachung von Strömungswegen wurde das perkolierende Wasser mit einem Farbtracer eingefärbt.

Nach Versuchsende kann das Eindringen des Farbtracers sowie die Homogenität der Verpressung aufgenommen und ausgewertet werden. Als weitere Randbedingung erfolgte die zyklische Beaufschlagung der Sondenrohre mit Wasser um die Ausdehnung und das Zusammenziehen der Sonden im Betrieb zu simulieren

### 3.2 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Der generelle Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt. Bei der Herstellung des Verpresskörpers wird zuerst die Sondenverrohrung in das Außenrohr eingebracht und der Bereich der Sondenumlenkung mit Sand der Körnung 07/1,1 mm auf eine Höhe von 40 cm verfüllt. Danach erfolgt eine Auftriebssicherung der Verrohrung. Die Herstellung der Verpresssuspension erfolgt analog wie unter Pkt.2.2. Aus einer entnommenen Suspensionsprobe wurde ein Probekörper hergestellt. An diesem wurde parallel zu den Modellversuch die Wasserdurchlässigkeit ermittelt. Das Einfüllen der Suspension in das vorbereitete Außenrohr samt eingebauter Sondenverrohrung erfolgte über einen Schlauch, welcher zu Beginn bis zur Oberkante des Sandes reichte und im Zuge des Verfüllens hochgezogen und nach Erreichen der Füllhöhe entfernt wurde. Bei Verpresskörper 4 und 5 erfolgte die Verfüllung mittels eines Verpressrohres aus PE, welches nach dem Verfüllen im Verpresskörper belassen wurde. Nach einer Abbindezeit von 24 Stunden erfolgte die Druckbeaufschlagung über den Wasserzulauf am unteren Ende des Außenrohres. Der gesamte Verpresskörper wird dadurch von unten nach oben durchströmt, über die am Überlauf austretende Wassermenge konnte die Systemdurchlässigkeit errechnet werden.

Folgende Parameter wurden für die insgesamt fünf Probeverpressungen als Randbedingungen variiert:

- Verwendung einer Doppel U Sondenverrohrung. Bei allen Probeverpressungen wurde eine Doppel U Sondenverrohrung mit 32 mm Rohrdurchmesser und entsprechenden Abstandhaltern verwendet.
- Zur Simulation des Anliegens der Sondenverrohrung an der Bohrlochwand wurde in die Sondenrohre ein Knick eingearbeitet, Abbildung 6 zeigt die so vorbereitete Sondenverrohrung. Im Bereich dieses Knickes liegen die Sondenrohre an dem Außenrohr an.
- Die Verwendung von Bohrspülung zur Stabilisierung der Bohrung wurde durch das Einbringen einer Bentonitsuspension in das Außenrohr vor dem Verfüllen mit Verpresssuspension simuliert.
- Eine Beaufschlagung der Rohre bis zu einem Druck von maximal 5 bar soll eine Ausdehnung der Sondenrohre induzieren, welche durch die thermische Beaufschlagung im Betrieb der Erdwärmesonden auftritt. Dazu wurden die Sondenrohre mit Wasser gefüllt und über entsprechende Schlauchverbindungen ein variabler Wasserdruck aufgebracht.
- Die Beaufschlagung des gesamten Verpresskörpers mit Wasser erfolgte in definierten Zeitabschnitten mit unterschiedlichen Druckstufen. Abbildung 7 zeigt exemplarisch den zeitlichen Ablauf.

In Tabelle 26 sind die Randbedingungen für die einzelnen Verpresskörper zusammengestellt.

Das zur Durchströmung des Verpresskörpers verwendete Wasser wurde mit einem Fartracer versetzt um Wasserwegigkeiten sichtbar machen zu können. Nach Versuchsende wurde der Verpresskörper aufgeschnitten und visuell beurteilt.



Abbildung 11, Knick in Sondenverrohrung

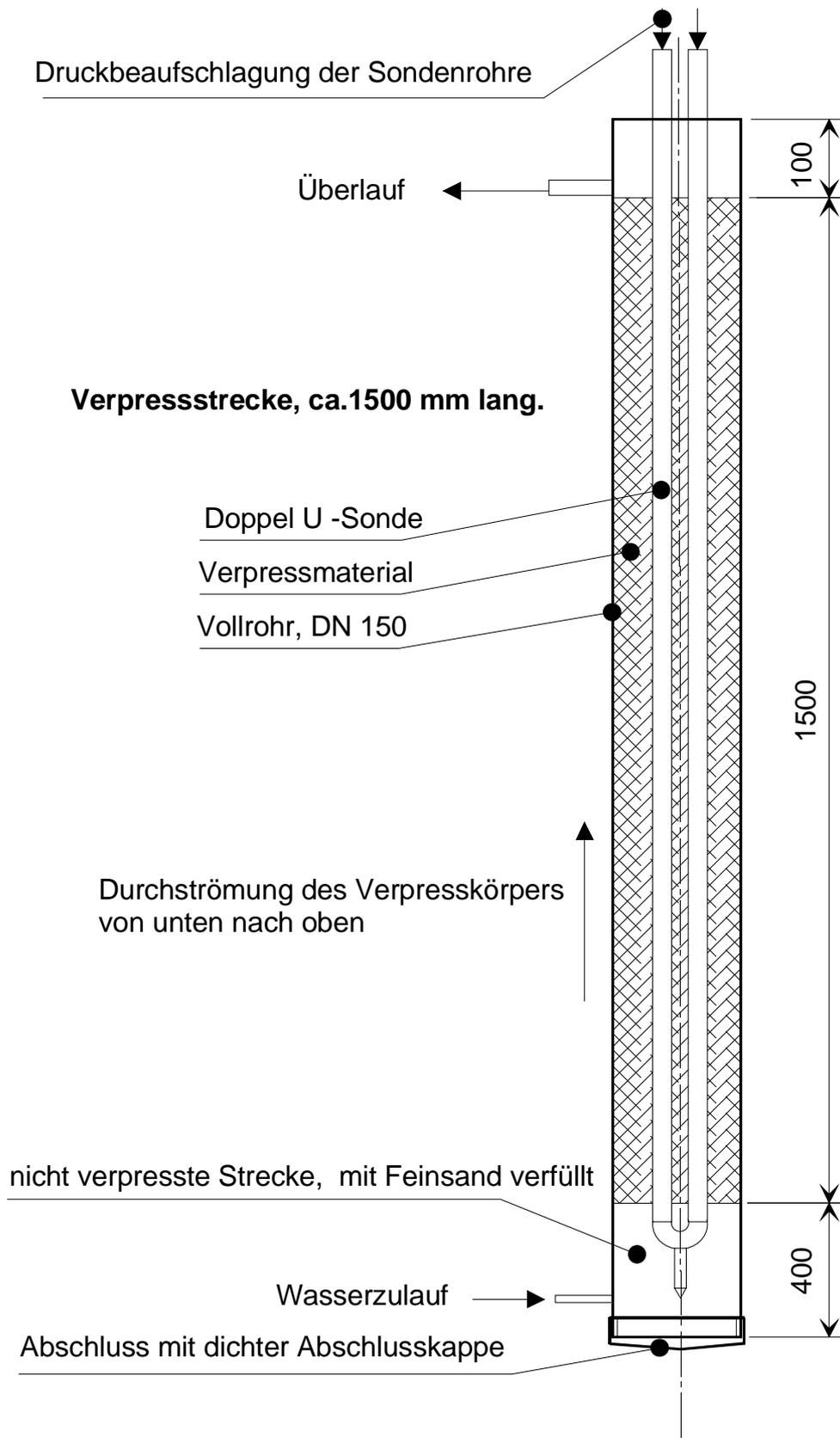


Abbildung 12, genereller Versuchsaufbau der Modellversuche

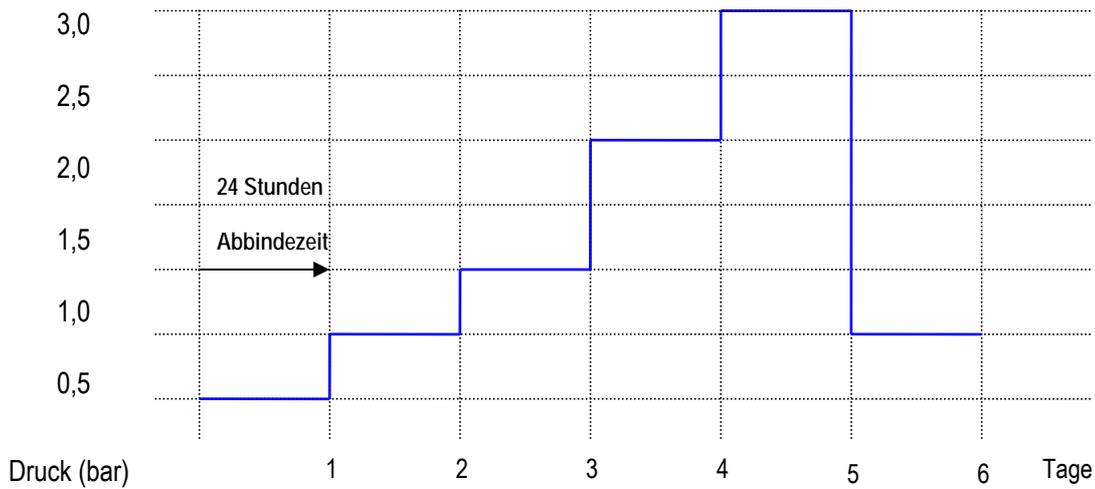


Abbildung 13, exemplarische Darstellung der Druckbeaufschlagung des Verpresskörpers

Tabelle 25, Randbedingungen der Modellversuche

Verpresskörper Nr.	1	2	3	4	5
Randbedingung:					
Doppel U-Sonde	x	x	x	x	x
Fehlstelle an Wandung	x	x	x	x	x
Druckbeaufschlagung der Sondenrohre	keine	statisch	statisch	variabel	variabel
Simulation Bohrspülung			x	x	
fixes Verpressrohr				x	x
unterschiedliche Druckbeanspruchung der Verpressung	1-2-3 bar	0,5-1-2-3-0,5 bar	0,5-1-2-3-0,5 bar	0,5-1-0,5 bar	0,5-1-0,5 bar

### 3.3 Ergebnisse der Modellversuche

Infolge sind für jede Probeverpressung folgende Daten zusammengestellt:

- Randbedingungen
- zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung
- Tabelle der gemessenen Systemdurchlässigkeiten
- Diagramm der gemessenen Systemdurchlässigkeiten

In Anhang B ist für jeden Verpresskörper eine Fotodokumentation des geöffneten Verpresskörpers dargestellt.

#### 3.3.1 Probeverpressung 1

##### Randbedingungen des Modellversuchs:

- Doppel U- Sondenverrohrung mit Abstandhaltern
- Anliegen der Sondenverrohrung an dem Außenrohr an einer Stelle
- Verpressmaterial = Material 5

##### Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung mit Wasser (Strömungsdruck):

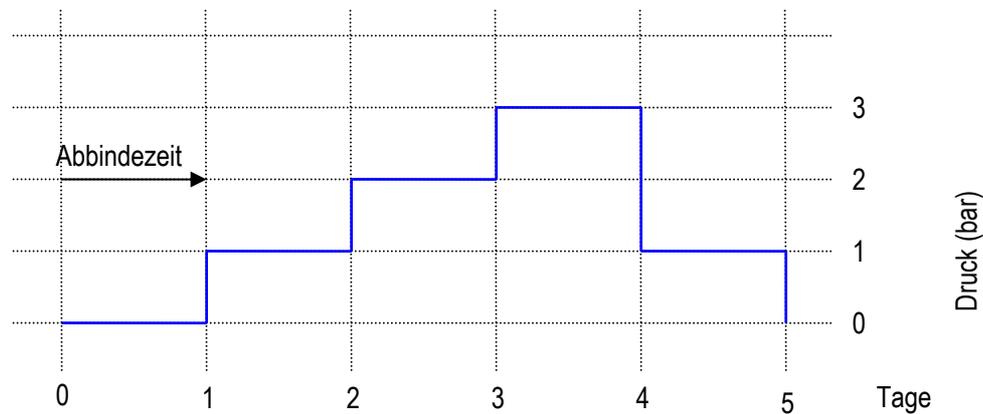


Abbildung 14, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung, Verpresskörper 1

##### Ergebnisse der Durchströmungsversuche:

Tabelle 26, Zusammenstellung Ergebnisse Verpresskörper 1

Versuchsphase:	Vergleichsprobe Labor	1	2	3	4
Strömungsdruck: (bar)	0,19	1	2	3	1
Hydraulisches Gefälle: (m)	30	6,28	12,55	18,83	6,28
Systemdurchlässigkeit kf: (m/s)	5,50E-08	3,30E-07	8,90E-06	1,30E-05	6,60E-07

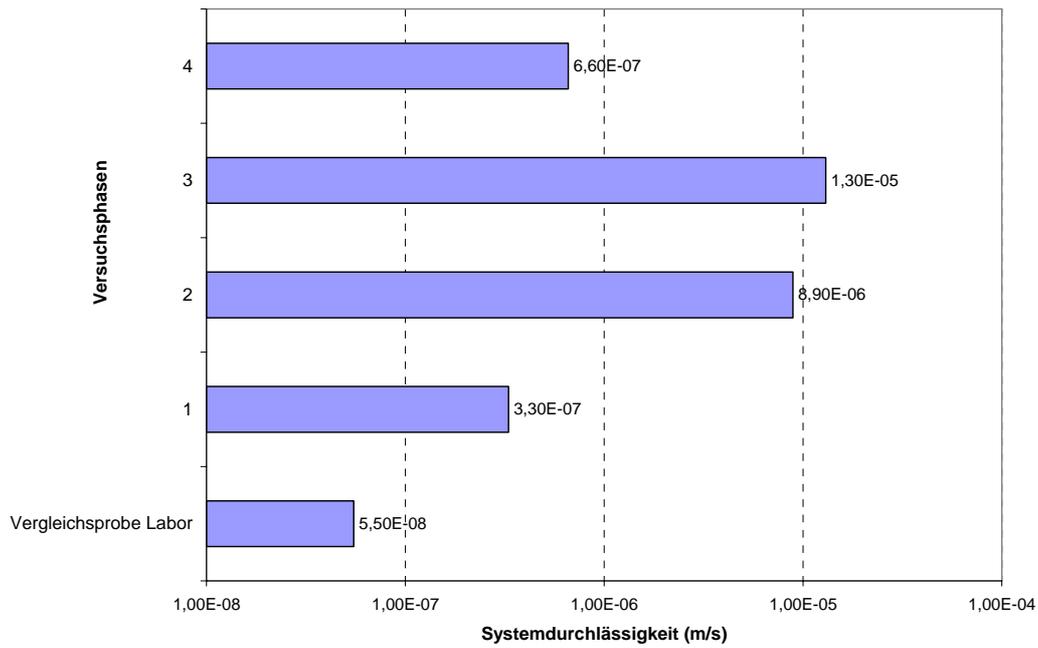


Abbildung 15, Darstellung der gemessenen Systemdurchlässigkeiten an Verpresskörper 1

### 3.3.2 Probeverpressung 2

Randbedingungen des Modellversuchs:

- Doppel U- Sondenverrohrung mit Abstandhaltern
- Anliegen der Sondenverrohrung an dem Außenrohr an einer Stelle
- Verpressmaterial = Material 2
- Beaufschlagung der Sondenverrohrung mit ca. 2 bar Wasserdruck

Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung mit Wasser (Strömungsdruck):

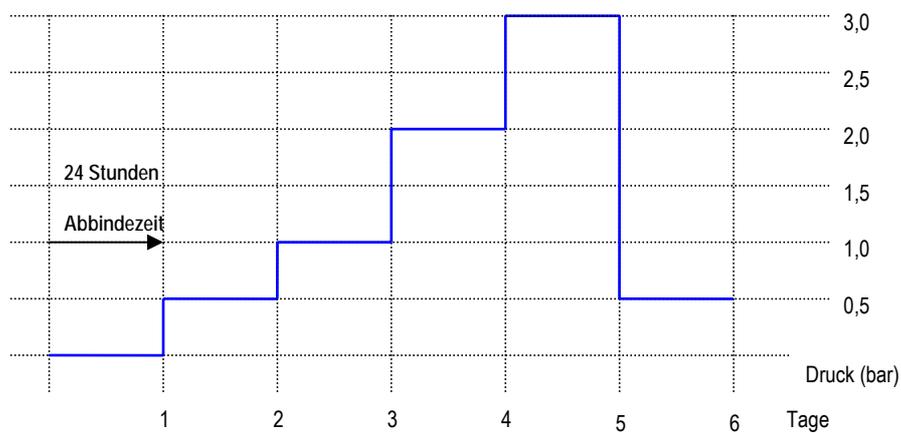


Abbildung 16, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung, Verpresskörper 2

Ergebnisse der Durchströmungsversuche:

Tabelle 27, Zusammenstellung Ergebnisse Verpresskörper 2

Versuchsphase:	Vergleichsprobe Labor	1	2	3	4	5
Strömungsdruck: (bar)	0,18	0,5	1	2	3	0,5
Hydraulisches Gefälle: (m)	30	3,57	7,14	14,29	21,43	3,57
Systemdurchlässigkeit kf: (m/s)	2,50E-08	1,40E-06	2,40E-06	6,40E-06	8,80E-06	9,70E-07

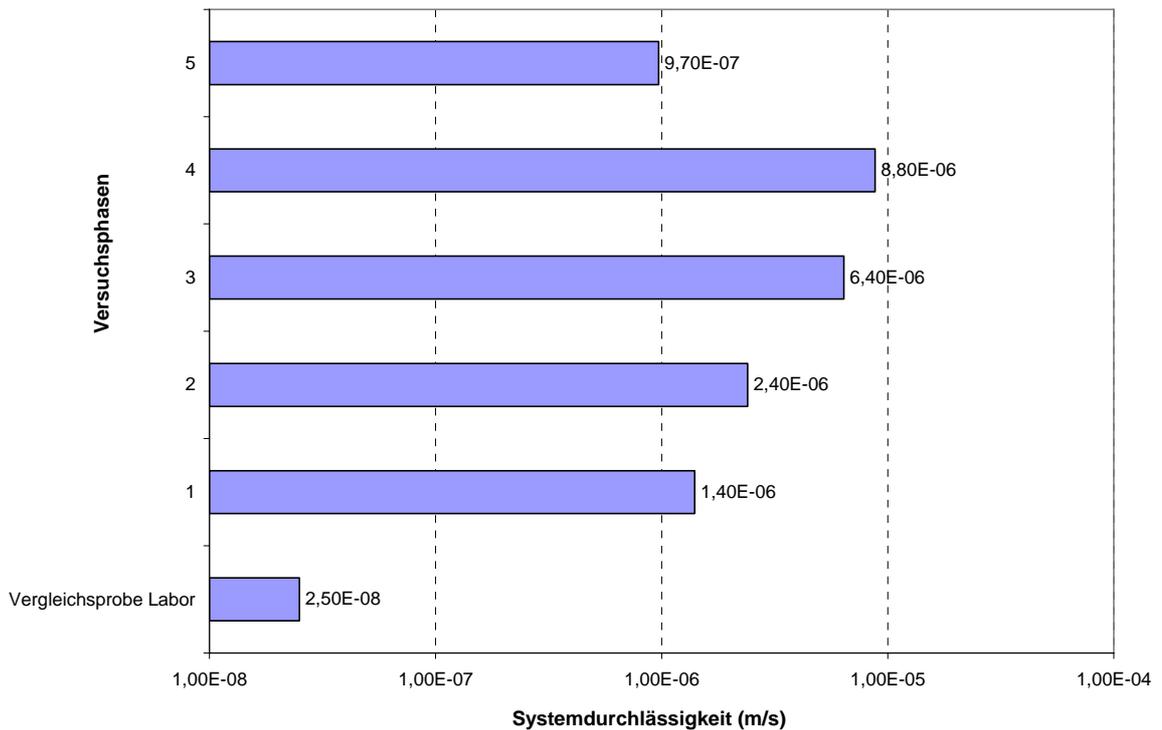


Abbildung 17, Darstellung der gemessenen Systemdurchlässigkeiten an Verpresskörper 2

## 3.3.3 Probeverpressung 3

Randbedingungen des Modellversuchs:

- Doppel U- Sondenverrohrung mit Abstandhaltern
- Anliegen der Sondenverrohrung an dem Außenrohr an einer Stelle
- Verpressmaterial = Material 2
- Beaufschlagung der Sondenverrohrung mit ca. 2 bar Wasserdruck
- Verwendung von Bentonitsuspension zur Simulation der Bohrspülung

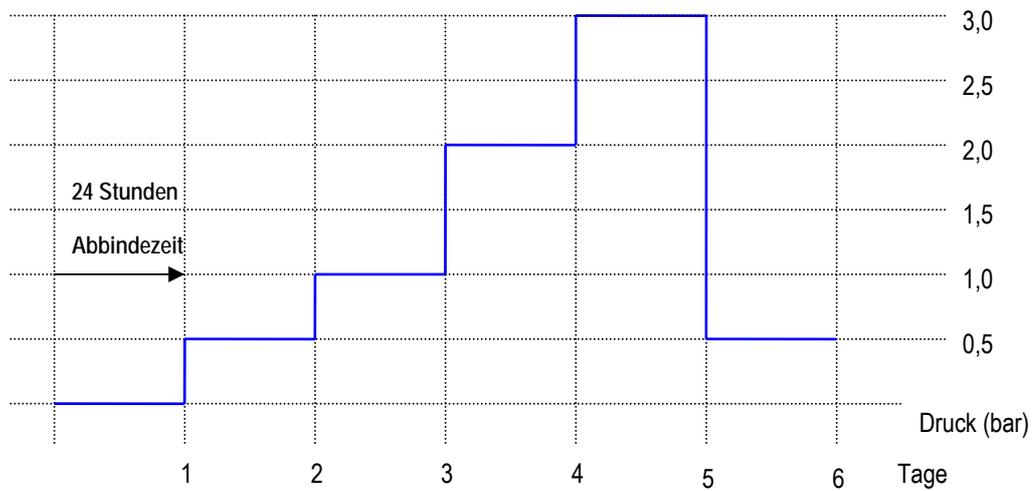
Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung mit Wasser (Strömungsdruck):

Abbildung 18, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung, Verpresskörper 3

Ergebnisse der Durchströmungsversuche:

Tabelle 28, Zusammenstellung Ergebnisse Verpresskörper 3

Versuchsphase:	Vergleichsprobe Labor	1	2	3	4	5
Strömungsdruck: (bar)	0,18	0,5	1	2	3	0,5
Hydraulisches Gefälle: (m)	30	3,18	6,37	12,74	19,11	3,18
Systemdurchlässigkeit kf: (m/s)	2,30E-08	5,70E-07	4,70E-06	1,00E-05	7,90E-06	3,70E-07

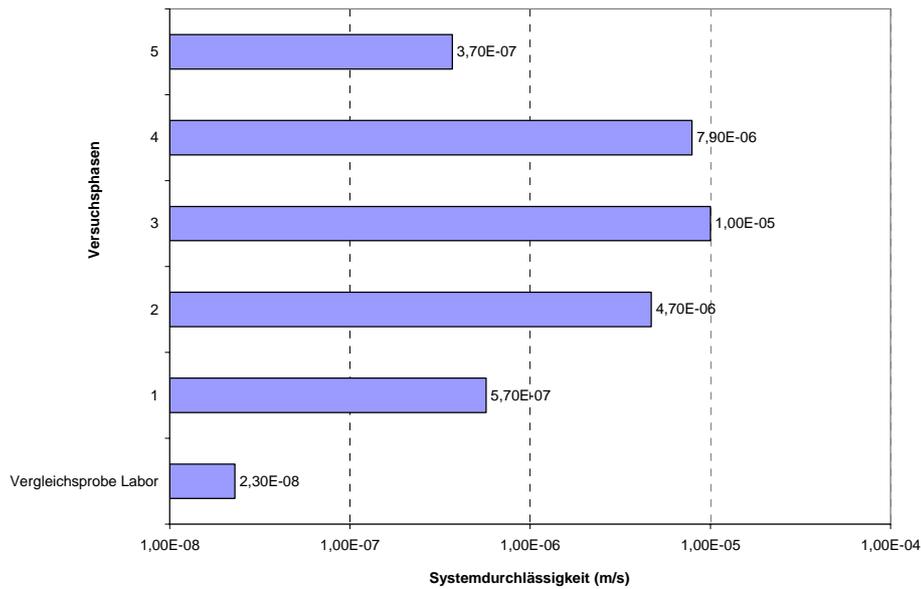


Abbildung 19, Darstellung der gemessenen Systemdurchlässigkeiten an Verpresskörper 3

### 3.3.4 Probeverpressung 4

#### Randbedingungen des Modellversuchs:

- Doppel U- Sondenverrohrung mit Abstandhaltern
- Anliegen der Sondenverrohrung an dem Außenrohr an einer Stelle
- Beaufschlagung der Sondenverrohrung variabel von. 2 bis 5 bar Wasserdruck
- Verpressmaterial = Material 5

#### Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung mit Wasser (Strömungsdruck):

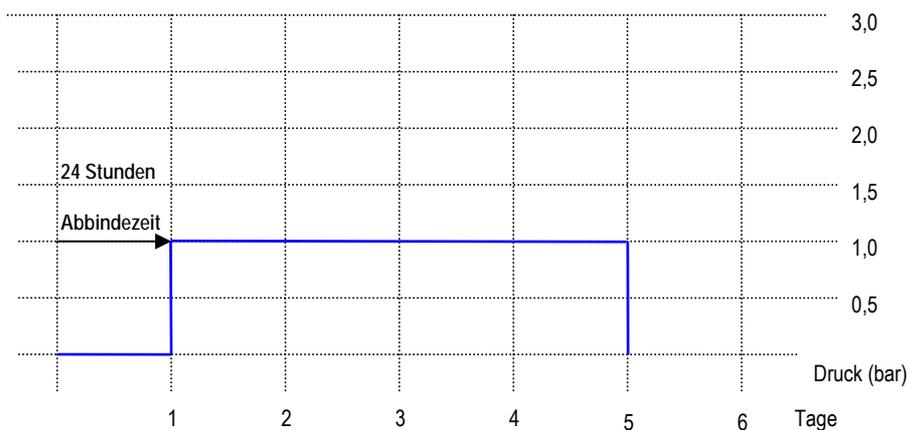


Abbildung 20, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung, Verpresskörper 4

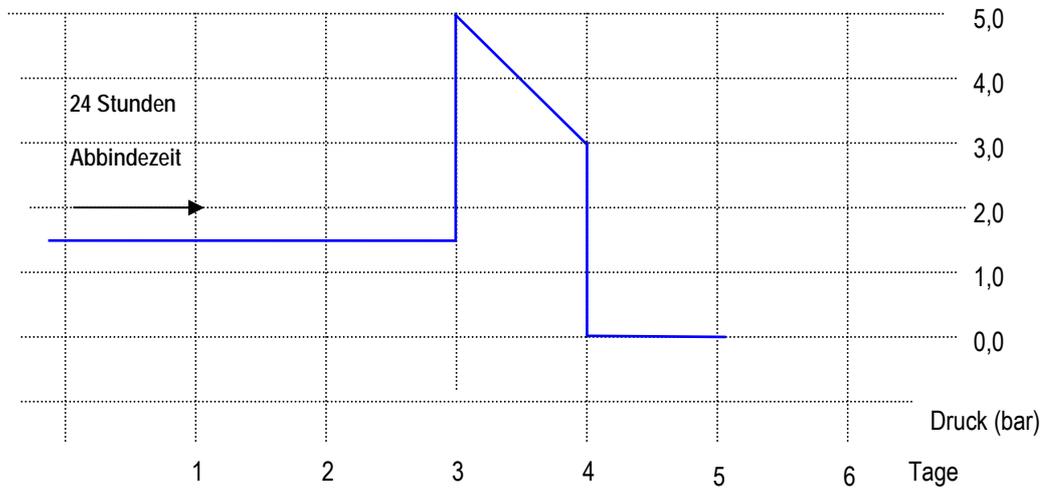
Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung der Sondenverrohrung:

Abbildung 21, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung der Sondenverrohrung, Verpresskörper 4

Ergebnisse der Durchströmungsversuche:

Tabelle 29, Zusammenstellung Ergebnisse Verpresskörper 4

Versuchsphase:	Vergleichsprobe Labor	1	2	3	4	5
Druck Sondenverrohrung: (bar)		1,5	1,5	3	0	3
Strömungsdruck: (bar)	0,15	0,5	1	1	3	0,5
Hydraulisches Gefälle: (m)	30	3,13	6,25	6,25	18,75	3,13
Systemdurchlässigkeit kf: (m/s)	1,10E-08	9,30E-07	1,10E-06	2,60E-07	1,30E-07	1,50E-06

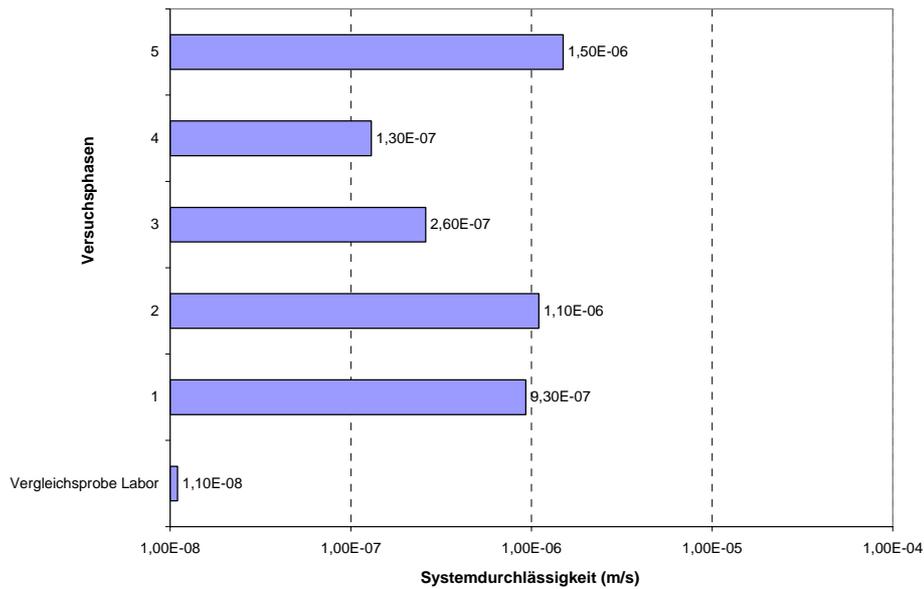


Abbildung 22, Darstellung der gemessenen Systemdurchlässigkeiten an Verpresskörper 4

### 3.3.5 Probeverpressung 5

#### Randbedingungen des Modellversuchs:

- Doppel U- Sondenverrohrung mit Abstandhaltern
- Anliegen der Sondenverrohrung an dem Außenrohr an einer Stelle
- Beaufschlagung der Sondenverrohrung variabel von 2 bis 5 bar Wasserdruck
- Verwendung von Bentonitsuspension zur Simulation der Bohrspülung
- Verpressmaterial = Material 5

#### Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung mit Wasser (Strömungsdruck):

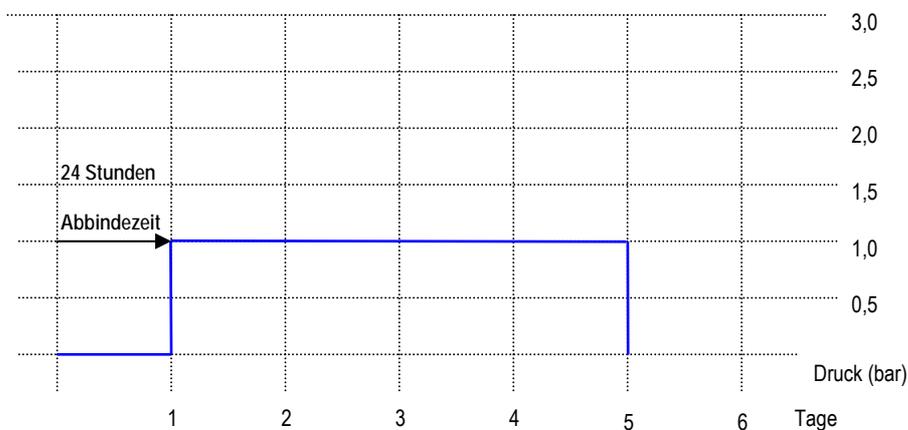


Abbildung 23, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung, Verpresskörper 5

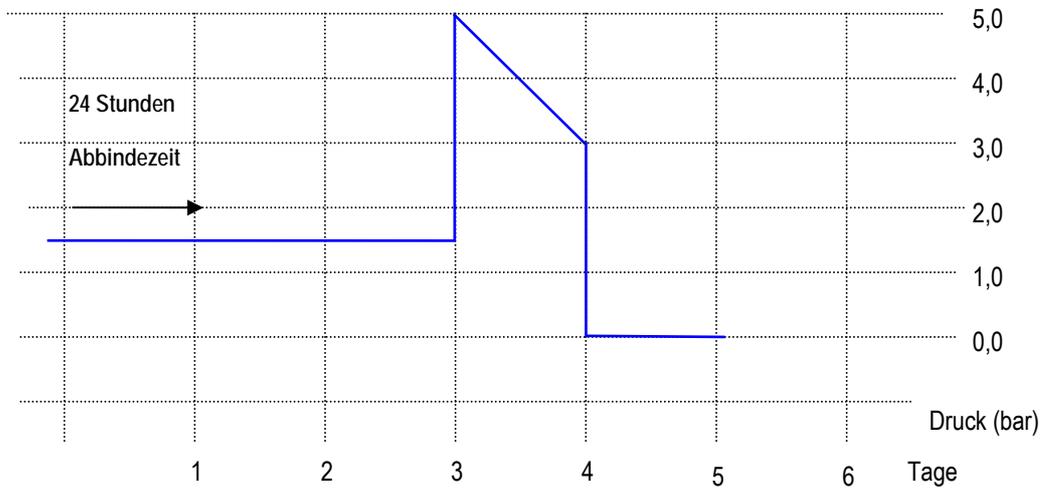
Zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung der Sondenverrohrung:

Abbildung 24, zeitlicher Verlauf der Druckbeaufschlagung der Sondenverrohrung, Verpresskörper 5

Ergebnisse der Durchströmungsversuche:

Tabelle 30, Zusammenstellung Ergebnisse Verpresskörper 5

Versuchsphase:	Vergleichsprobe Labor	1	2	3
Druck Sondenverrohrung: (bar)	-	1,5	5/3	0
Strömungsdruck: (bar)	0,15	1	1	1
Hydraulisches Gefälle: (m)	30	6,54	6,54	6,54
Systemdurchlässigkeit kf: (m/s)	1,10E-08	5,70E-07	2,50E-07	3,60E-07

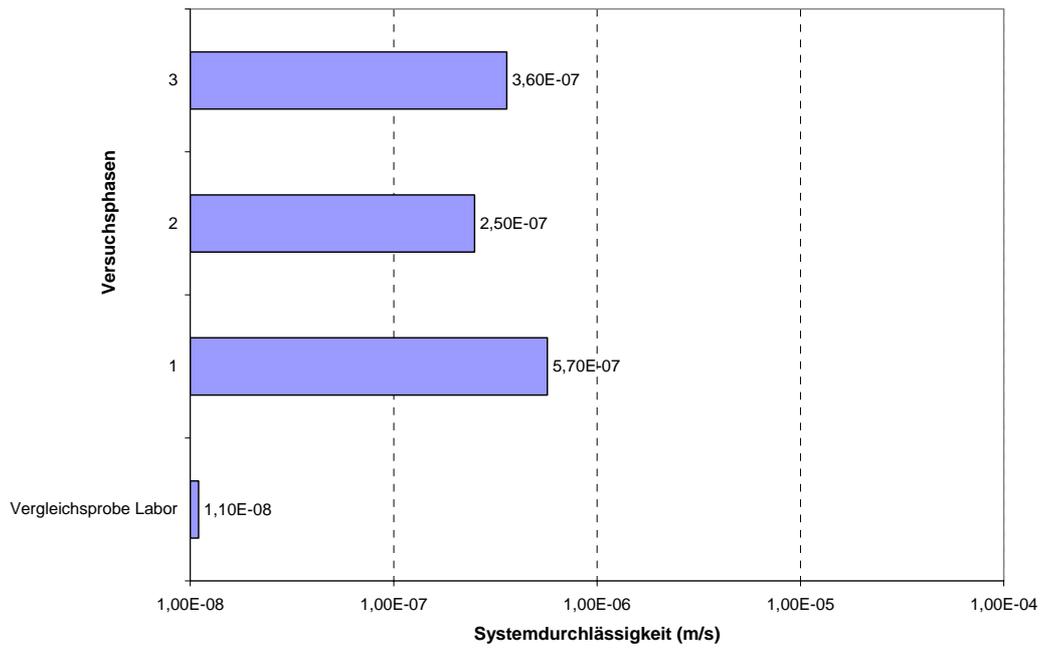


Abbildung 25, Darstellung der gemessenen Systemdurchlässigkeiten an Verpresskörper 5

## 4 Auswertung und Interpretation der Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen umfassten sieben handelsübliche Fertigprodukte und drei Baustellenmischungen von Verpresssuspensionen zur Verpressung von Erdwärmesonden. Von einem Hersteller wurde das im Handel erhältliche Produkt (Material 2) sowie eine optimierte Variante (Material 11) untersucht. Bei Material 3 und Material 10 handelt es sich um Baustellenmischungen gleicher Rezeptur hinsichtlich der Feststoffe, lediglich der Wasseranteil variiert. Von allen Produkten und Rezepturen erfolgte die Herstellung einer frischen Suspension sowie Probekörper aus abgebundener Suspension.

Weiters sei darauf hingewiesen, dass sich alle Resultate auf die so hergestellten frischen, bzw. abgebundenen Suspensionen beziehen.

### 4.1 Eigenschaften der frischen Suspensionen

#### 4.1.1 Allgemeines, Bedeutung der Suspensionskennwerte

Im Gegensatz zu einer NEWTONschen Flüssigkeit, wie Wasser, entspricht das rheologische Verhalten der untersuchten Suspensionen annähernd dem BINGHAM-Modell für welche das BINGHAMsche Fließgesetz

$$\tau = \tau_f + \eta \times D$$

gilt, wobei  $\eta$  die Viskosität und  $D$  das Schergefälle darstellt. Der Faktor  $\tau_f$  wird als Fließgrenze bezeichnet. Er ist die Scherspannung, die aufgebracht werden muss damit die Suspension zu Fließen beginnt. Unter Fließfähigkeit versteht man die Fähigkeit der Suspension sich lediglich unter der Wirkung seines Eigengewichtes auszubreiten.

Die Fließfähigkeit wird im Wesentlichen von der Fließgrenze beeinflusst. Sinkt die Schubspannung während des Fließvorganges in der Suspension unter den Wert der Fließgrenze, endet der Fließvorgang.

Die beiden Parameter  $\eta$  und  $\tau_f$  können mittels Viskositätsmessungen im Labor bestimmt werden. Dazu wird die Suspension in einen Rotationsviskosimeter eingebaut und abgeschert. Diese aufwendige Methode wird in der Praxis durch vereinfachte Verfahren ersetzt. Eines dieser Verfahren zur Ermittlung der Fließgrenze stellt das Kugelharpengerät nach SOOS dar.

Fließgrenze und Viskosität wirken sich direkt auf die Sedimentationsbeständigkeit aus. Man versteht unter Sedimentationsbeständigkeit den Widerstand gegen Entmischen sowohl während des Fließvorgangs als auch nach dem Erreichen der endgültigen Lage im Bohrloch. Je geringer die Werte für Viskosität und Fließgrenze sind, desto größer wird die Neigung zum Sedimentieren. Die Folge einer mangelnden Gefügestabilität ist Absetzen von Klarwasser an der Suspensionsoberfläche.

Eine weitere Eigenschaft von Verpresssuspensionen ist die sog. Thixotropie. Darunter versteht man die Eigenschaft der Verflüssigung unter mechanischer Krafteinwirkung und der Verfestigung in Ruhephasen. Außer vom Abbindegrad und der Temperatur wird die Fließgrenze einer Suspension wesentlich von ihrer thixotropen Eigenschaft beeinflusst.

Die Eigenschaften der untersuchten frischen Suspensionen sollen auf Grundlage folgender Kennwerte beurteilt werden:

- Suspensionsdichte
- Fließgrenze

- Filtratwasserabgabe
- Absetzmaß
- Trichterauslaufzeit

Dabei beschreiben die Suspensionsdichte, die Fließgrenze und die Trichterauslaufzeit qualitativ die rheologischen Eigenschaften und im Besonderen die Viskosität der Suspensionen.

Der suspensionsspezifische Kennwert Filtratwasserabgabe kennzeichnet quantitativ die Wasserabgabe an einer Fläche mit vorgegebener Porosität infolge eines auf die Suspension wirkenden Druckes. Dies soll das Verpressen gegen poröses Gebirge bzw. Lockergestein simulieren. Infolge des hydrostatischen Druckes der Suspension wird dabei Wasser in das umgebende Gebirge abgegeben. Bei Schlitzwänden gilt für Bentonit- Zementsuspensionen einen oberer Grenzwert von 130 ml.

Das Absetzmaß beschreibt hingegen das Absondern von Wasser an der Oberfläche der Suspension infolge von Sedimentationseffekten. Dies führt zu einer Volumenverringerung der abgebundenen Suspension. Nach den Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen EAU (1990) soll das Absetzmaß bei Schmal- und Schlitzwänden nicht mehr als 3 % betragen. Bei der gewählten Prüfanordnung mit 1000ml Suspension entspricht dies einem Absetzvolumen von max. 30 ml.

Als rein rechnerischer Kennwert wird weiters der Wasser/Feststoffwert (W/F- Wert) für jede Suspension berechnet. Dieser Wert gibt das Gewichtsverhältnis von verwendetem Wasser zu eingesetztem Feststoff (Summe aller Komponenten, z.B. Bentonit und Zement) an. Hohe W/F- Werte bedeuten dabei generell geringe Suspensionsdichten.

#### 4.1.2 Zusammenfassung und Interpretation der gemessenen Suspensionskennwerte

Wie bereits beschrieben erfolgte das Anmischen der Suspensionen auf Basis einer vorgegebenen Trichterauslaufzeit zwischen 40 und 50 Sekunden. Durch diese Vorgabe sollte die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien sowie die grundsätzliche Durchführbarkeit der weiteren Suspensionsversuche gewährleistet werden. Die gemessenen TAZ betragen maximal 54 Sekunden bei der Suspension aus Material 2 bzw. 43 Sekunden bei Material 4. Der Streubereich beträgt daher 11 Sekunden bei einem Mittelwert von 48 Sekunden. Bei den nachfolgenden Interpretationen der Suspensionskennwerte ist die TAZ in einem Streubereich als konstanter vorgegebener Wert anzusehen.

- Suspensionskennwerte und -eigenschaften der Fertigmischungen

Da die gemessenen Suspensionsdichten gut mit dem errechneten Wasser/Feststoffwert (W/F-Wert) korreliert, erfolgt eine gemeinsame Betrachtung beider Werte. Geringe W/F- Werte entsprechen dabei hohen Suspensionsdichten und umgekehrt. Die gemessenen Dichten aller untersuchten Suspensionen sind in Abbildung 26 dargestellt. Als Anhaltswert zur Beurteilung ist die Dichte von  $\rho_{\text{susp}} = 1,3 \text{ g/cm}^3$  durch eine rote Linie markiert.

Alle untersuchten Fertigprodukte bis auf Material 7 überschreiten diesen Wert. Die maximale Suspensionsdichte betrug  $\rho_{\text{susp}} = 1,77 \text{ g/cm}^3$  und wurde bei Material 12 gemessen. Die kleinste Dichte ergab sich bei Material 7 mit  $\rho_{\text{susp}} = 1,29 \text{ g/cm}^3$ . Umgekehrt proportional dazu verhalten sich die W/F- Werte, siehe Abb. 27. Besonders bei Material 7 errechnet sich ein hoher W/F- Wert bei einer geringen Suspensionsdichte. Die anderen Suspensionen aus Fertigprodukten zeigen W/F- Werte unter 1.

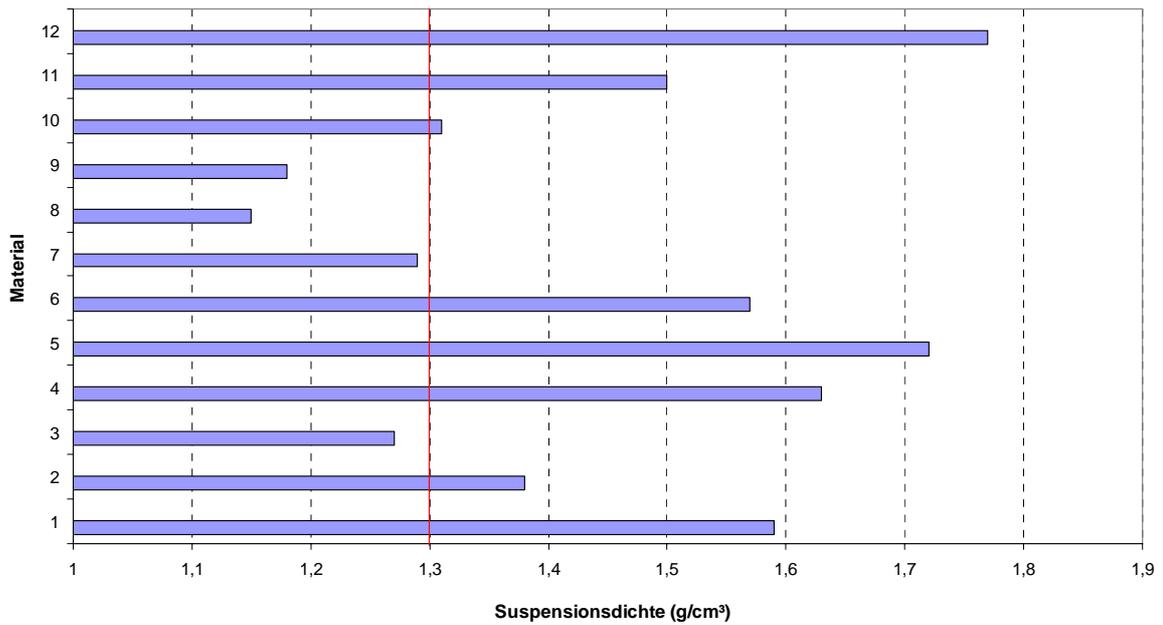


Abbildung 26, Zusammenstellung der gemessenen Suspensionsdichten

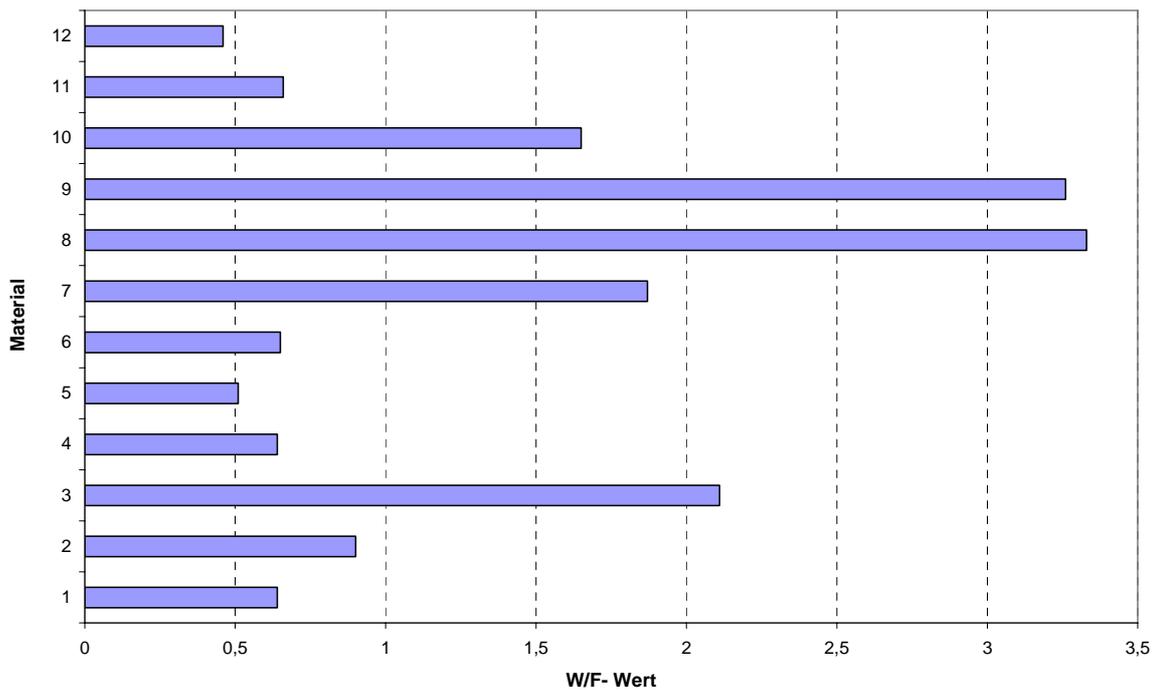


Abbildung 27, Zusammenstellung der errechneten W/F- Werte

Die an den Fertigprodukten ermittelten Fließgrenzen variieren stark, Material 2 zeigt dabei die geringsten Wert mit  $\tau_f = 16 \text{ N/mm}^2$  und Material 7 den höchsten Wert mit  $\tau_f = 66 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Abb.28. Das rheologische Verhalten der Suspensionen entspricht wie bereits beschrieben annähernd dem BINGHAM- Modell. Die Fließfähigkeit wird im Wesentlichen von der Fließgrenze  $\tau_f$  beeinflusst. Sinkt die Schubspannung während des Fließvorganges im der Suspension unter den Wert der Fließgrenze  $\tau_f$ , endet der Fließvorgang

und die Suspension kommt zum Stehen. Das heißt die Fließfähigkeit einer Suspension ist umso größer, je kleiner ihre Fließgrenze ist. Eine fließfähige Konsistenz ist jedoch Voraussetzung für eine holraumfreie Verfüllung.

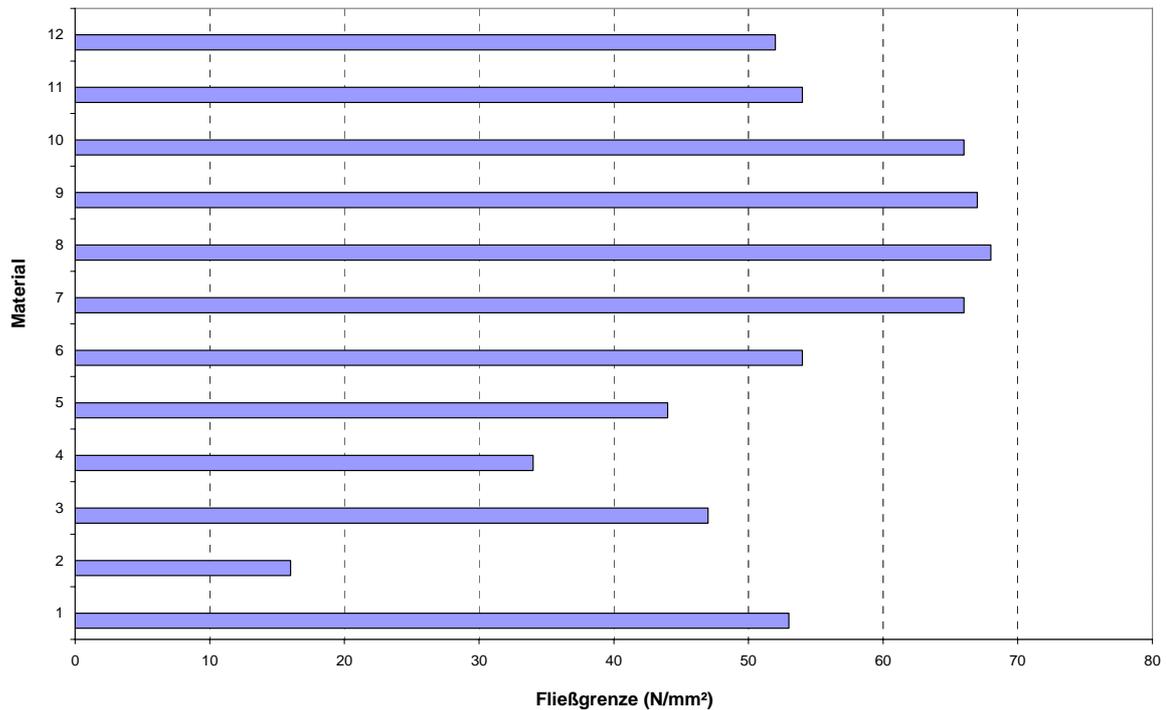


Abbildung 28, Zusammenstellung der ermittelten Fließgrenzen

Die Fließfähigkeit wird im Wesentlichen durch den W/F- Wert sowie durch das Vorhandensein von quellfähigen Phasen in der Suspension beeinflusst. Hohe W/F- Werte führen allgemein zu geringen Fließgrenzen und somit zu fließfähigen Suspensionen. Sind jedoch Quelltone vorhanden binden diese Wasser, was auch bei hohen W/F- Werten zu hohen Fließgrenzen führen kann. Dies erklärt bei Material 7 den hohen Wert der Fließgrenze bei gleichzeitig hohem W/F- Wert.

Große Variationen zeigen sich weiters bei den gemessenen Filtratwasserabgaben, siehe Abbildung 29. Die geringste Filtratwasserabgabe wurde dabei bei Material 7 mit  $f = 31$  ml, die größte bei Material 2 mit  $f = 123$  ml gemessen. Generell zeigt eine große Filtratwasserabgabe, dass freies, ungebundenes Wasser in der Suspension vorhanden ist, welches nicht von hydraulischen Bindemitteln oder quellfähigen Phasen aufgenommen werden kann. Dieses freie Wasser kann im Bohrloch in durchlässiges Gebirge abfiltrieren, was zu einem Volumenverlust in der Suspension führt. Eine große Filtratwasserabgabe deutet bei den Fertigprodukten auf das Fehlen von quellfähigen Phasen hin, da diese bei W/F- Werten unter 1 einen Großteil des Wassers anlagern und diesen im Filterabpressversuch nur zu einem geringen Teil abgeben.

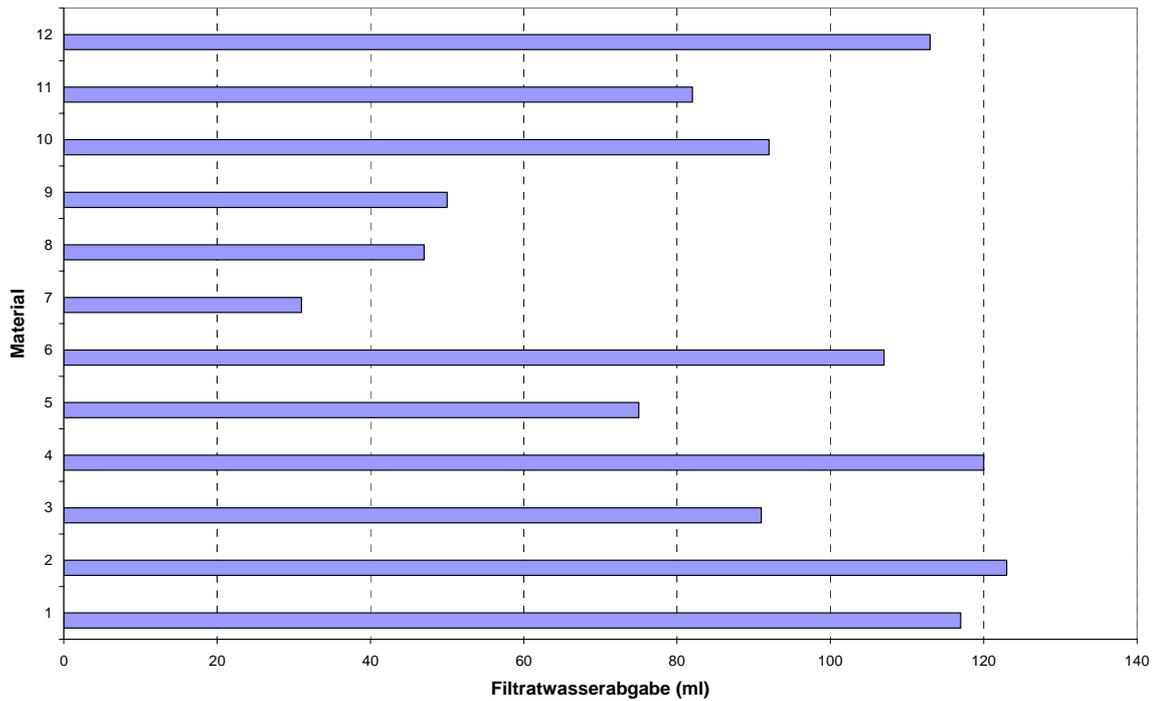


Abbildung 29, Zusammenstellung der gemessenen Filtratwasserabgaben

Das nach 24 Stunden gemessene Absetzvolumen weist den größten Streuungsbereich auf, siehe Abb. 30. An Material 7 zeigte sich dabei das geringste abgesetzte Wasservolumen von  $\Delta V = 0,9$  ml, bei Material 4 hingegen betrug das Absetzvolumen 33,1 ml, was 3,3 % des Gesamtvolumens (1000ml) entspricht. Ein hohes Absetzvolumen deutet auf instabile Suspensionen hin.

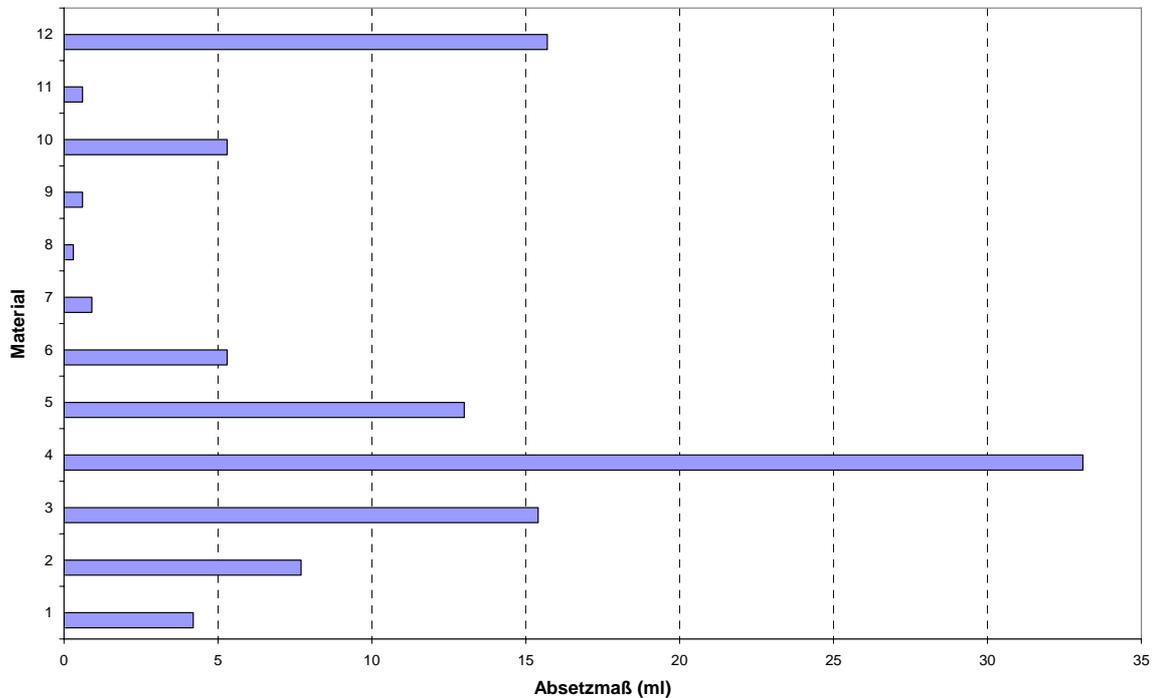


Abbildung 30, Zusammenstellung der nach 24 Stunden gemessenen Absetzvolumina

Aufgrund von Sedimentationserscheinungen kommt es zum Absetzen von Klarwasser an der Oberfläche und somit zu einem Volumenverlust der abgebundenen Suspension. Weiters können sich inhomogene Verfüllkörper ausbilden.

- Suspensionskennwerte und -eigenschaften der Baustellenmischungen

Bei den Baustellenmischungen handelt es sich durchwegs um Zement- Bentonitsuspensionen mit unterschiedlichen Feststoffanteilen. Bei Material 9 ist zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit und zur Erhöhung der Dichte Quarzsand der Körnung 0,063 mm beigefügt. Für alle Rezepturen wurden die gleichen Ausgangsstoffe verwendet.

Die Baustellenmischungen bleiben durchwegs unter der als Anhaltswert angenommenen Suspensionsdichte von  $\rho_{\text{susp}} = 1,3 \text{ g/cm}$ . Aufgrund der in Pkt.2.1.2 beschriebenen Herstellungsprozedur musste noch zusätzlich zu der in der jeweiligen Rezeptur angegebenen Menge Wasser hinzugefügt werden um eine entsprechende Trichterauslaufzeit zu erhalten. Besonders bei der VDI-Mischung sowie der Schweizer Mischung errechnet sich dadurch ein sehr hoher W/F- Wert, welcher mit einer geringen Suspensionsdichte korreliert. Das Material 3 und 10 ist eine Rezeptur in der der Wasseranteil variiert wurde. Material 3 besitzt einen bei gleichem Feststoffanteil höheren Wassergehalt als Material 10, dies zeigt der unterschiedliche W/F-Wert. Bei der Suspension mit geringerem Wasseranteil (Material 10) stellte sich eine Dichte knapp über 1,3 g/cm ein. Die W/F- Werte liegen generell über 1, bei Material 8 und 9 sogar über 3.

Besonderes Augenmerk liegt bei den Baustellenmischungen in der Herstellung, wie bereits unter Pkt. 2.1.2 beschrieben. Aufgrund des Vorquellens des Bentonits lagern die quellfähigen Phasen sehr viel Wasser an und es bildet sich bereits eine Suspension. Durch die Zugabe des Zements erhöht sich kurzzeitig die Viskosität der Suspension bis dieser vollständig dispergiert und das zum Abbinden notwendige Wasser aufnimmt. Beim weiteren Mischen sinkt die Viskosität wieder. Werden die Feststoffkomponenten gleichzeitig in das Anmachwasser eingerührt, so ergeben sich völlig andere Suspensionseigenschaften.

Aus Vorversuchen mit der Rezeptur von Material 3 und 10 konnte dies deutlich gezeigt werden. In Tabelle 31 sind die Suspensionskennwerte dieser Vorversuche zusammengestellt. Gegenüber gestellt sind dabei die Kennwerte von Suspensionen bei deren Herstellung der Bentonit vorgequollen wurden, bezeichnet mit V1, den Kennwerten ohne Vorquellen, bezeichnet mit V2.

Ohne Vorquellen des Bentonits erhält man Suspensionen mit geringer Stabilität (Rezeptur 1-3 V2). Diese zeigen besonders hohe Filtratwasserabgaben von über 200 ml. Weiters kommt es bereits nach 30 Minuten Standzeit zu einem starken Ausbluten. Der Überstand an Klarwasser betrug maximal 31 Volumenprozent.

Die Suspensionen der in den beiden Versuchsserien hergestellten Baustellenmischungen zeigen trotz der im Vergleich zu den Fertigprodukten geringen Dichten hohen Fließgrenzen, vgl. Abbildung 28. Dies ist auf den relativ hohen Anteil an Quellton zurückzuführen. Material 8 besitzt den größten Anteil an Bentonit und zeigt auch die höchste Fließgrenze von  $f = 68 \text{ N/mm}^2$ .

Auch das geringe Absetzvolumen ist durch das Vorhandensein von quellenden Phasen bedingt. Die nach 3 Stunden gemessenen Absetzvoluminas sowie die ermittelten Filtratwasserabgaben weisen bei Material 8, 9 und 10 deutlich auf den Anteil an Bentonit hin. Material 8 besitzt den größten Anteil und zeigt dabei das geringste Absetzvolumen und die kleinste Filtratwasserabgabe. In Material 10 ist dagegen weniger Bentonit enthalten, das Absetzvolumen und die Filtratwasserabgabe sind dementsprechend höher.

Tabelle 31, Zusammenstellung Ergebnisse der Vorversuche mit unterschiedlichem Anmischverfahren

Suspensionskennwerte	Suspension					
	Rezeptur1 V1	Rezeptur2 V1	Rezeptur3 V1	Rezeptur1 V2	Rezeptur2 V2	Rezeptur3 V2
Suspensionsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,33	1,24	1,22	1,24	1,21	1,20
Trichterauslaufzeit (TAZ) (sek.)	58	91	-	33	32	38
Fließgrenze (N/m <sup>2</sup> )	47	57	76	6	6	6
Filtratwasserabgabe (ml)	88	40	34	220	223	98
Absetzmaß nach 1 Std. (%)	0,5	0	0	31	27	1

## 4.2 Eigenschaften der abgebundenen Suspension

### 4.2.1 Volumenbeständigkeit

Die Volumenbeständigkeit der einzelnen Materialien bezieht sich auf die Veränderung der Höhe von Probekörper während der Abbindezeit infolge des Absetzens von Klarwasser an der Oberfläche sowie anderer Schwindvorgänge. Die Ausgangsprobenhöhe betrug dabei 160 mm bei einem Probendurchmesser von 80 mm. Die Volumenbeständigkeit wurde nur an Probekörpern der Versuchsserie 1 ermittelt.

Der größte Verlust an Volumen im abgebundenen Zustand zeigt sich bei Material 3, vgl. Abb. 31. Es handelt sich dabei um eine Baustellenmischung. Im Vergleich dazu zeigen die restlichen Materialien, alles Fertigprodukte, weit geringere Volumenverluste. Bei Vergleich der Fertigprodukte zeigt Material 4 einen höheren Wert. Bei beiden Materialien dürfte es sich dabei um normale Schwindvorgänge infolge der Hydratation des Zementes handeln. Material 4 besitzt auch die höchste Endfestigkeit, was auf einen hohen Zementgehalt und damit verbunden auf ein größeres Schwindmaß schließen lässt.

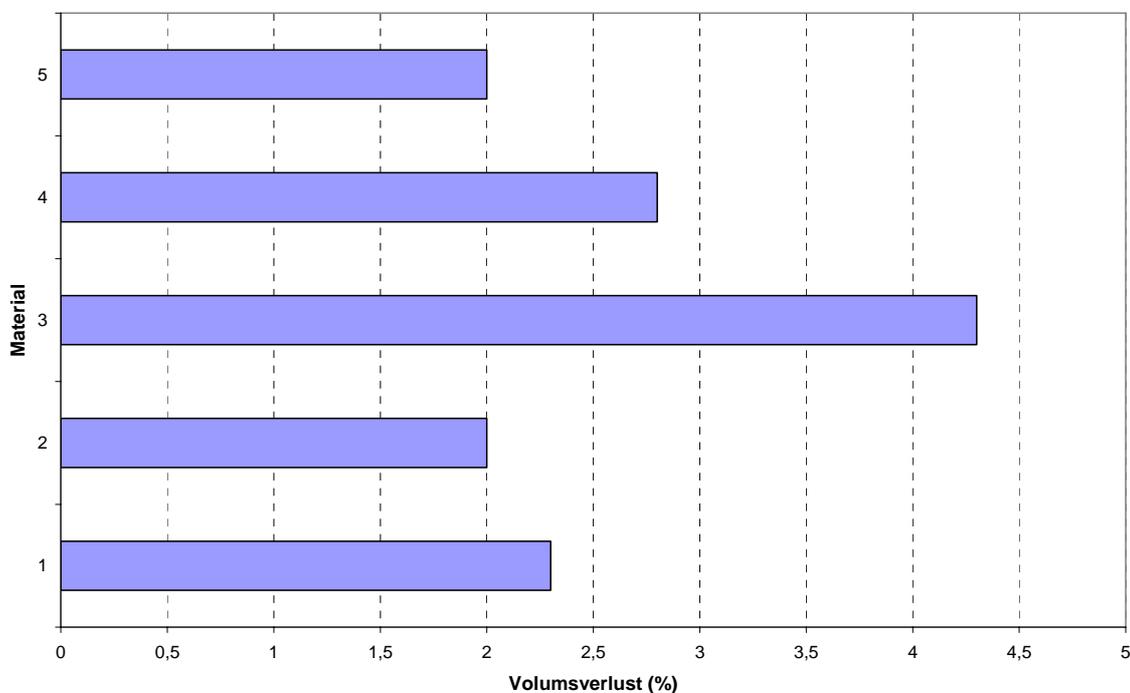


Abbildung 31, Zusammenstellung der gemessenen Volumenveränderung an Probekörper der Serie 1

### 4.2.2 Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde nach 7, 14, 28 und 56 (nur Serie 1) Tagen Abbindezeit an Probekörpern beider Versuchsserien ermittelt. In Abbildung 32 sind die ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten je Material und Abbindezeit dargestellt.

Die Endfestigkeiten liegen dabei zwischen 4,5 N/mm<sup>2</sup> (Material 11) und 0,9 N/mm<sup>2</sup> (Material 5) und zeigen somit einen großen Streubereich.

Neben der Endfestigkeit ist auch der Verlauf des Festigkeitszuwachses interessant. Einige Materialien zeigen einen proportionalen Zuwachs über die Abbindezeit, wie anderen ist der Festigkeitszuwachs zu Beginn gering und erst nach 14 Tagen kommt es zu einem überproportionalen Anstieg. Dieses Verhalten ist besonders bei Material 6 und 7 zu beobachten. Bei Material 6 tritt eine anfängliche Abbindeverzögerung ein, erst bei der 28 Tage Prüfung zeigte sich knapp eine Verzehnfachung des 14 Tage Wertes. Diese Verzögerung in der Hydratation des Zementes dürfte aufgrund von speziellen Zusatzmitteln oder durch Quelltone verursacht worden sein.

Bei Material 8 und 9 konnte aufgrund der geringen Festigkeit keine Prüfung nach 7 Tagen Abbindezeit durchgeführt werden. Auch die nach 28 Tagen gemessene Druckfestigkeit ist im Vergleich zu den anderen Materialien äußerst gering. Für Schlitzwandmassen wird eine Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen von  $q_f = 0,3 \text{ N/mm}^2$  gefordert. Dies im Hinblick auf eine ausreichende Erosionsstabilität. Die beiden Materialien erreichen diese Vorgabe bei weitem nicht. Bei diesen Baustellenmischungen scheint einerseits der W/F- Wert zu hoch, andererseits das Verhältnis von Zement zu Quellton zu gering zu sein.

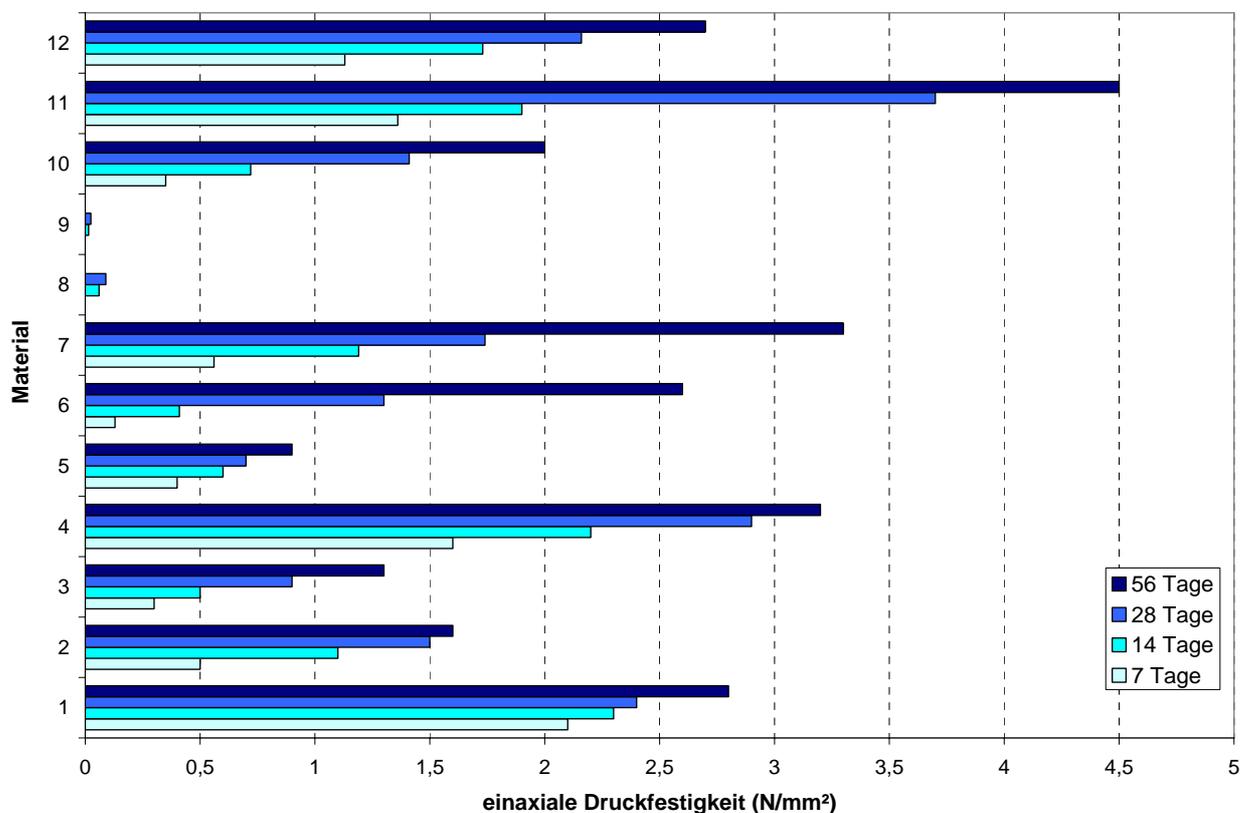


Abbildung 32, Zusammenstellung der gemessenen einaxialen Druckfestigkeiten an Probekörper zu verschiedenen Abbindezeitpunkten

Der veränderte Wasseranteil bei gleich bleibendem Feststoffgehalt zeigt auch bei Material 3 und 10 eine deutliche Auswirkung in der Druckfestigkeit. Der niedrigere Wassergehalt bei Material 10 bringt dabei höhere Druckfestigkeiten. Das vorgegebene Verhältnis von Zement und Bentonit führt zu einer proportionalen Zunahme der Druckfestigkeit.

Ein relativ rasches Abbinden zeigt Material 1 und 4, hier ergeben bereits die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen im Vergleich zur Endfestigkeit hohe Werte. Beide Materialien dürften daher einen entsprechend hohen Bindemittelanteil bei geringem Anteil an Quellton. Dies würde auch die hohen Filtratwasserabgaben der frischen Suspensionen erklären.

### 4.2.3 Wasserdurchlässigkeit der ausgehärteten Suspension

Der Wasserdurchlässigkeitskoeffizient  $k_f$  wurde an Probekörpern beider Serien nach 28 Tagen Abbindezeit bei einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  ermittelt. Abbildung 27 zeigt eine Zusammenstellung der ermittelten Werte.

Bleiben die Materialien 9 und 10 unberücksichtigt, so variieren die Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten zwischen  $k_f = 1E-9$  und  $1E-8$  m/s. Bei Lockergesteinsböden entspricht dies einem schwach durchlässigen bis sehr schwach durchlässigen Boden wie Schluff- Tongemischen.

Wie bereits bei der einaxialen Druckfestigkeit unter Pkt.4.2.2 beschrieben führt der hohe W/F Wert in Kombination mit dem geringen Verhältnis von Zement zu Quellton zu durchlässigeren Probekörpern. Die während der Hydratation des Zementes entstehenden Phasen verschließen nur geringe Teile des Porenraumes, sodass noch genügend offene Kanäle als Wasserwegigkeiten offen bleiben.

Von der EAU (1990) wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f \leq 5 E-8$  m/s für konventionelle Dichtmassen zur Bautechnischen Abdichtung gegen Grundwasser gefordert. Dabei ist jedoch unklar ob es sich um die reine Materialdurchlässigkeit oder um die Systemdurchlässigkeit samt allen Einbauten handelt.

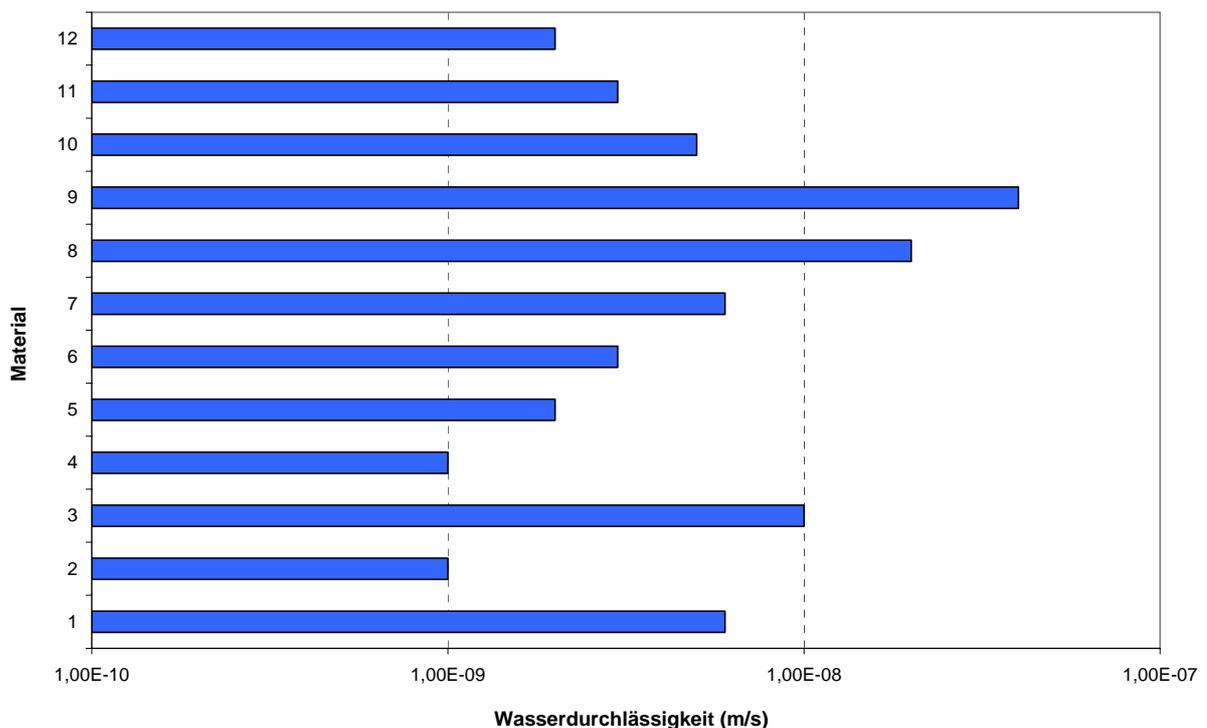


Abbildung 33: Darstellung der ermittelten Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten

Die im Labor ermittelten Durchlässigkeiten geben nur die reine Materialdurchlässigkeit der abgebundenen Suspensionen wider. Die Systemdurchlässigkeit, d.h. die Durchlässigkeit der Verpressung samt Sondenverrohrung ist um ca. um eine halbe bis eine Zehnerpotenz höher anzusetzen.

#### 4.2.4 Erosionsbeständigkeit der abgebundenen Suspensionen

Die Erosionsbeständigkeit der abgebundenen Suspension wurde in dem sog. Pinhole- Test in Anlehnung an die ÖNORM B 4452 ermittelt.

Bis auf Material 8 und 9 ergaben die Messungen relativ konstante Durchflussrate je nach Prüfkörper von 20-35 l/h. Bei Prüfkörper 8 und 9 wurden Durchflussraten  $q > 50$  bzw.  $q > 200$  l/h gemessen. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf Nicht-Beständigkeit gegen Erosion, welche sich auf Grund der geringen Festigkeit ergeben. Laut einschlägiger Literatur ist eine Erosionsbeständigkeit erst ab Festigkeiten größer 300 kN/m<sup>2</sup> zu erwarten.

#### 4.2.5 Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechseleinwirkung

Da der Begriff „Frostbeständigkeit“ normativ in der ÖNORM B 3303 für Betone geregelt ist, wurde in dieser Studie bewusst auf diesen Begriff verzichtet. Stattdessen wird der Begriff „Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechseleinwirkung“ definiert.

Die dazu durchgeführten Prüfungen orientieren sich zwar an der oben zitierten Norm, weichen aber in folgenden Randbedingungen von dieser ab:

- Die laut Norm vorgegebenen Beforstungstemperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  wird auch bei übermäßigem Wärmeentzug in der Tiefsonde nicht erreicht. Es erfolgte daher in Absprache mit dem Auftraggeber die Festlegung von folgendem abgeänderten Temperaturprofil für die Frost-Tauwechselbeanspruchung:
  - 8 Stunden Abkühlen von  $+10^{\circ}\text{C}$  auf  $-10^{\circ}\text{C}$
  - 4 Stunden konstante Temperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$
  - 8 Stunden auftauen auf  $+10^{\circ}\text{C}$
  - 4 Stunden konstante Temperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$
- Die Probenlagerung während des Versuches erfolgte nicht in Wasser, da dies teilweise zu einer vollständigen Zerstörung der Probekörper führen würde. Die in den verschiedenen Rezepturen verwendeten Quellphasen (Tonminerale) würden beim Einfrieren Wasser abgeben und beim Auftauen dieses wieder aufnehmen. Dadurch entsteht ein Schrumpf- und Quellprozess, welcher den Probekörper zerstört.
- Nach 28 Frost-Tauzyklen erfolgten eine visuelle Beurteilung der Probekörper sowie die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit als objektiver Parameter. Aus dem Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit mit einer gleichaltrigen, jedoch nicht gefrosteten Probe, können eventuelle strukturelle Schwächungen infolge der Frosteinwirkung aufgezeigt werden. Bei Versuchsserie 2 wurde zusätzlich eine visuelle Beurteilung als auch eine Bestimmung der Druckfestigkeit an Probekörpern, welche 10 Frost –Tauzyklen ausgesetzt waren, durchgeführt.

Die Abmessungen der Probekörper betrug  $D= 80$  mm,  $H= 80$  mm (hergestellt aus einem Probekörper 80/160), von jedem Material wurden 2 Probekörper befrosten.

Um den Prozess der Frosteinwirkung in der verpressten Sonde realitätsnahe zu simulieren erfolgte in der ersten Untersuchungsserie ein zweiter Frost-Tauwechselfersuch. Dabei wurde ein quaderförmiger Probekörper mit den Abmessungen 15x15x5 cm. Der Probekörper wurde dabei an der Unterseite und an den Seitenflächen mit wärmedämmenden Material umgeben, sodass nur die Oberseite direkt dem Frost ausgesetzt ist. Dies entspricht in

etwa den Verhältnissen in der verpressten Sonde, da hier eine mögliche Befrostung nicht allseitig auf die Verpressung einwirkt, sondern diese nur von den Sondenrohren ausgeht.

Die Auswertung der visuellen Beurteilung an den Probekörper nach der Frost-Tauwechselbeanspruchung zeigten fast durchgehend leichte bis schwere Schäden in Form von Rissen und Abplatzungen bis hin zum Bruch des Probekörpers. Die einzige Ausnahme bilden die Probekörper aus Material 2 und 11, hier waren keine sichtbaren Schäden erkennbar.

Exemplarisch sind in Abbildung 34 und 35 ein quaderförmiger Probekörper mit Rissen in der Stirnfläche sowie ein durch die Frosteinwirkung gebrochener zylindrischer Probekörper dargestellt.

Auch die bei Versuchsserie 1 zusätzlich durchgeführten Frost-Tauwechselversuche an quaderförmigen Probekörper ergeben bei der visuellen Beurteilung ein ähnliches Bild. Auch hier blieb nur der Probekörper aus Material 2 ohne sichtbare Schäden. Bei allen anderen Probekörper zeigten sich horizontal durchgehende Risse.

Aufgrund der visuellen Beurteilung der Probekörper kann daher nur das Material 2 und 11 hinsichtlich der Ausbildung von optisch wahrnehmbaren Schäden als Frost- Tauwechselbeständig eingestuft werden.



Abbildung 34, Probekörper mit Riss in Stirnfläche und gebrochener Probekörper

Bei allen anderen untersuchten Materialien kam es infolge der Frost-Tauwechselbeanspruchung zu sichtbaren Schäden an den Probekörpern.

Für eine quantitative Beurteilung des Einflusses von Frost- Tauwechseln erfolgte die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit an den befestigten zylindrischen Probekörpern sowie an gleichaltrigen Probekörpern welche bei Raumtemperatur gelagert wurden.



Abbildung 35, Quaderförmige Probekörper mit horizontalen Rissen und Abplatzungen

Aus dem Vergleich beider Werte lassen sich Rückschlüsse auf strukturelle Schäden in den Frost-Tauwechsel beanspruchten Proben ziehen.

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse dieser Versuche zusammengestellt. Dabei wurden die Proben 28 Frost – Tauwechseln unterzogen. Die Versuchsreihe „Probe ohne Befrostung“ beinhaltet dabei die einaxialen Druckfestigkeiten der gleichaltrigen Parallelproben, die Reihe „Probe mit Befrostung“ die Druckfestigkeiten der

befrostenen Proben. Die Prozentangaben geben den Abfall der Druckfestigkeit bezogen auf die unbefrosthete Probe wider.

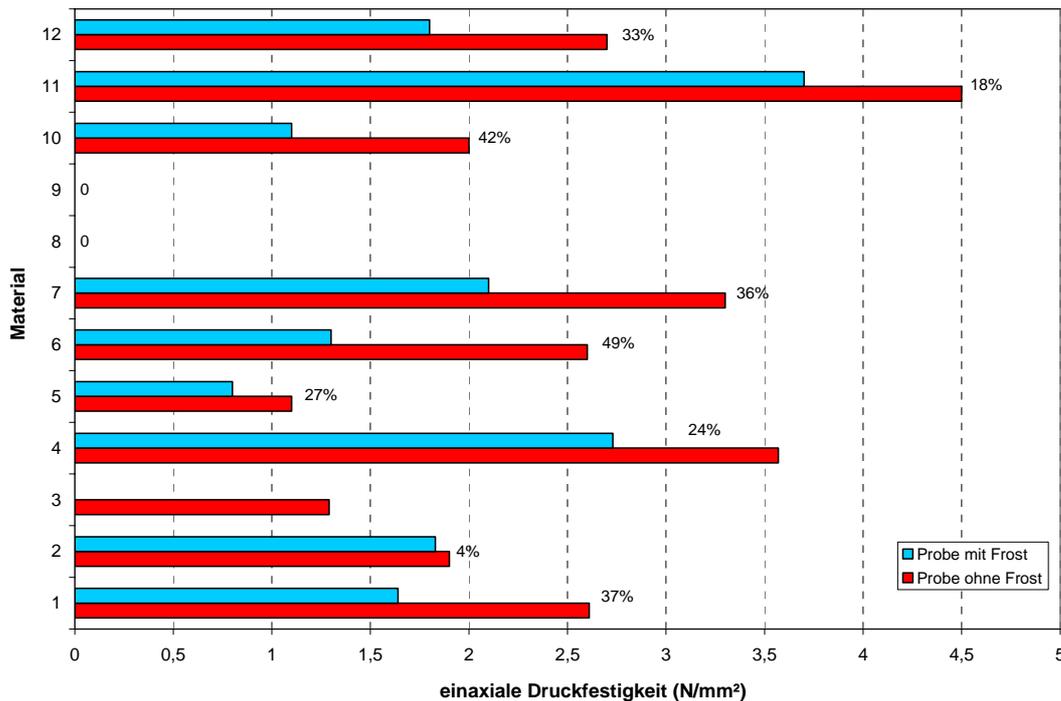


Abbildung 36, Darstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche vor und nach Befrostung, 28 F/T-Wechsel

Für die Proben aus Material 8 und 9 war diese Versuche nicht möglich, da die Probekörper bei der Frost-Tauwechselbeanspruchung zerbrachen.

Es zeigt sich ein sehr großer Streubereich von 4% bis 49 % Verlust an Druckfestigkeit. Daraus zeigt sich sehr deutlich die unterschiedliche Beständigkeit gegen die Frost- Tauwechseleinwirkung der einzelnen Materialien. Es ist jedoch ratsam eine Überinterpretation der Versuchsergebnisse zu vermeiden, da es sich um Einzelversuche und nicht um Versuchsreihen handelt.

Diese Versuche wurden bei Versuchsserie 2 auch bereits nach 10 Frost-Tauwechseln ausgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt. Ein Zusammenhang zwischen Anzahl der Frost-Tauwechsel und dem Rückgang der einaxialen Druckfestigkeit ist nicht herstellbar.

Die Ergebnisse zeigen deutlich einen Zusammenhang zwischen Befrostung und Rückgang an Druckfestigkeit. Die Festlegung eines Kriteriums zur Beurteilung der Beständigkeit gegenüber Frost- Tauwechselbeanspruchung über den Abfall der Druckfestigkeit erscheint als ein gangbarer Weg. Aufgrund der geringen Probenzahl kann zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nur ein Richtwert angegeben werden.

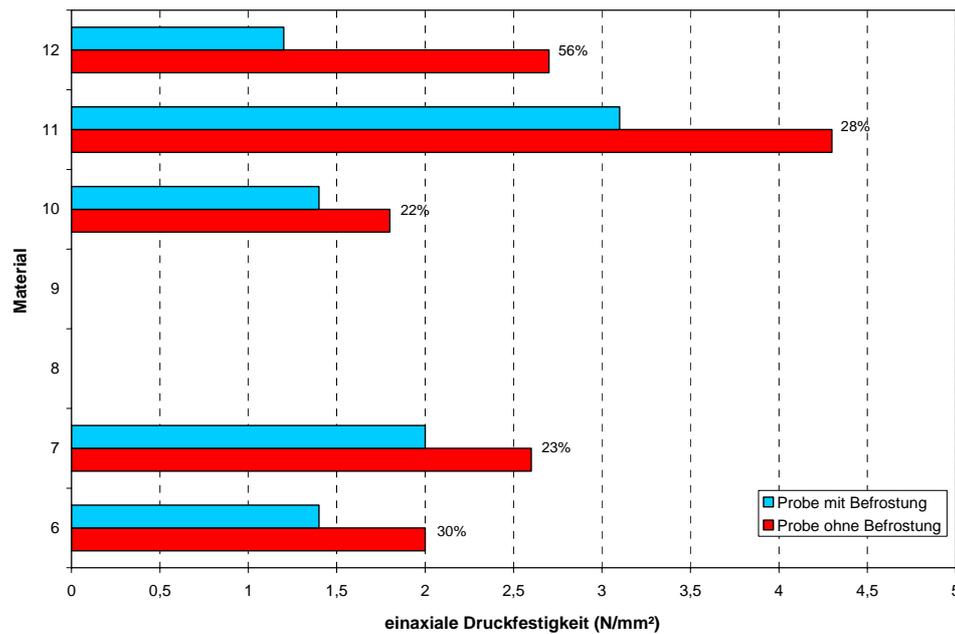


Abbildung 37, Darstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche vor und nach Befrostung, 10 F/T-Wechsel

#### 4.2.6 Wärmeleitfähigkeit der befesteten und unbefesteten Suspensionen

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte wiederum an befesteten Probekörpern und parallel dazu an gleichaltrigen Proben ohne Befrostung. Die Messungen erfolgten an beiden Versuchsserien, die Ergebnisse der Messungen an den zylindrischen Probekörpern der Serie 1 sind in Abbildung 38, die Messungen an den quaderförmigen Proben in Abbildung 39 grafisch dargestellt.

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der unbefesteten Probekörper bewegen sich bei den Fertigprodukten zwischen 2,39 W/mK (Material 11) und 0,77 W/mK (Material 7). Die von den Herstellern oft genannte Wärmeleitfähigkeit von 2 W/mK wird daher nur von einem Produkt erreicht. Die gemessene Baustellenmischung Material 3 und 10 besitzt aufgrund der unterschiedlichen Wassergehalte beim Anmischen auch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten. Die mit einem höheren Wasseranteil angemischte Probe zeigt erwartungsgemäß eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

Der Vergleich zwischen den Wärmeleitfähigkeiten von Probekörpern mit und ohne Frosttauwechselbeanspruchung, wie in Abbildung 38 und 39 dargestellt, zeigt je nach Material deutliche bis geringe Unterschiede. Am befesteten Probekörper werden dabei durchwegs geringere Wärmeleitfähigkeiten gemessen. Dies kann wie bei der einaxialen Druckfestigkeit auf eine Veränderung Gefügestruktur durch Mikrorisse hervorgerufen werden, was zu einer Verschlechterung der Wärmeleitung im Material führt. In den Diagrammen ist weiters der Rückgang der Wärmeleitfähigkeit als Prozentwert zu jedem Material eingetragen. Bei den quaderförmigen Probekörpern erfolgte die Messung an zwei Stellen, welche mit A und B bezeichnet wurden. Die gemessenen Wertepaare sind relativ einheitlich, nur die Messwerte an Probe 5 zeigen eine große Streuung.

Die Korrelation zwischen den Messungen an zylindrischen und an quadratischen Probekörper ist als gering einzustufen. Die jeweiligen prozentualen Rückgänge beider Messungen weisen große Unterschiede auf.

Aufgrund der eher punktuellen Messung erscheint die Festlegung eines Kriteriums zur Beurteilung der Frost-Tauwechselbeständigkeit über den Abfall an Wärmeleitfähigkeit als eher ungünstig. Es wären dabei mehrere

Messungen an der Oberfläche des Prüfkörpers durchzuführen um einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten. Weiters ist die gemessene Wärmeleitfähigkeit stark vom Wassergehalt der Probe abhängig.

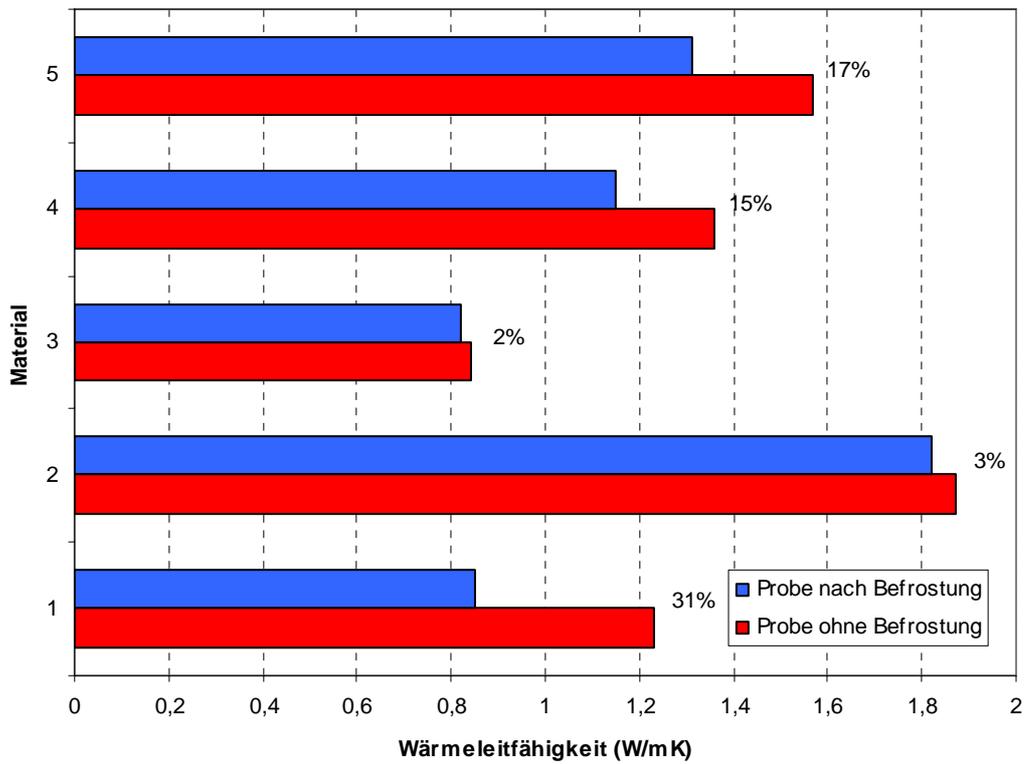


Abbildung 38, grafische Darstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten an befestigten Proben und Vergleichsproben

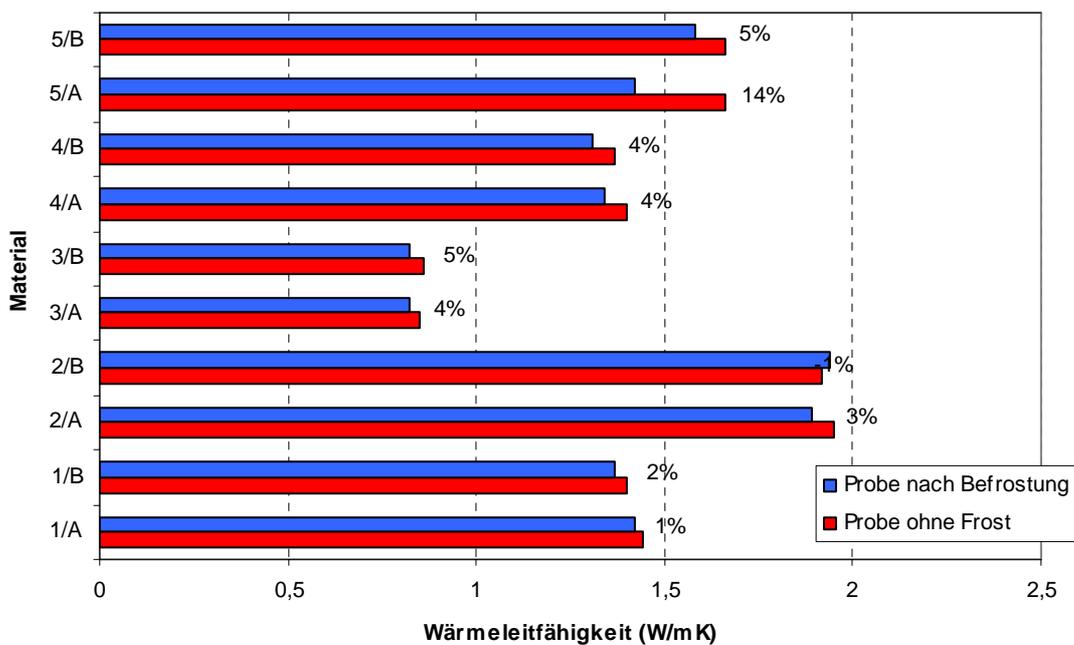


Abbildung 39, grafische Darstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten an befestigten quaderförmigen Proben

### 4.3 Zusammenfassung der Baustellenmessungen

Die Messungen direkt an der Baustelle sollten einerseits die im Labor gemessenen Suspensionskennwerte verifizieren und andererseits sollen die Messungen selbst auf ihre Tauglichkeit auf der Baustelle überprüft werden.

Die Ergebnisse zeigten etwas höhere Suspensionsdichten als im Labor. Dadurch ergaben sich auch viskosere Suspensionen, welche im MARSH- Trichter mit der Auslaufdüse DN 3 mm nicht mehr gemessen werden können. Bei Material 12 war auch die Fließgrenze nicht mehr messbar. Bei Baustelle 1, Material 12 wurde aufgrund der gespannten Grundwasserverhältnisse die Dichte erhöht.

Als auf der Baustelle praktikabel erwies sich die Messung der Suspensionsdichte. Bei höheren Dichten ist die Bestimmung der Trichterauslaufzeit mit kleinem Düsendurchmesser nicht möglich. Auch die Bestimmung der Fließgrenze ist dabei nicht möglich, da alle Kugeln an der Oberfläche der Suspension bleiben.

### 4.4 Zusammenfassung und Interpretation der Modellversuche

#### 4.4.1 Allgemeines

In Summe erfolgte die Durchführung von fünf Modellversuchen mit unterschiedlichen Randbedingungen. Ziel dabei war einerseits die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit des Gesamtsystems (Verpressmaterial mit eingebauter Sondenverrohrung samt Abstandhalter) und andererseits die Visualisierung von möglichen Wasserwegigkeiten durch Einfärbung des durchströmenden Wassers mit einem Farbracer.

Als Randbedingungen für die Versuche wurden folgende Parameter herangezogen:

- Verpressmaterial, in Summe wurden drei unterschiedliche Materialien verwendet
- Simulation der Bohrspülung durch eine Bentonitsuspension
- Beaufschlagung der Sondenverrohrung mit Druck, statisch und variabel
- Beaufschlagung des Verpresskörpers mit unterschiedlichen Druckniveaus.

Die Herstellung der Suspensionen erfolgte gem. Herstellerangaben, es wurde versucht die Suspensionskennwerte (TAZ und Suspensionsdichte) der Laborversuche unter Pkt.2.1.3 zu erreichen. Folgende Materialien wurden für die Modellversuche verwendet:

Tabelle 32, Zusammenstellung der Materialien der Verpresskörper

Verpresskörper Nr.	Material	Suspensionsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Trichterauslaufzeit (s)
1	4	1,67	41
2	2	1,38	50
3			
4	5	1,69	64
5			

Die Versuche zur Ermittlung der Systemdurchlässigkeit wurden nach 24 Stunden Abbindezeit durchgeführt, die Durchströmung des Verpresskörpers erfolgte dabei von unten nach oben.

#### 4.4.2 Zusammenfassung und Auswertung der Modellversuche

- Auswertung Materialdurchlässigkeit - Systemdurchlässigkeit

In Abbildung 40 sind die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Probekörpern der Laborversuche als auch der Versuche zur Ermittlung der Systemdurchlässigkeit der Verpresskörper als Balkendiagramm dargestellt. Zur besseren Unterscheidung wurde jedem Verpresskörper eine Farbe zugeordnet. Die nach 28 Tagen geprüfte Materialprobe trägt dabei die Bezeichnung Mat.X Labor, die bereits nach 24 Abbindezeit parallel zu den Verpresskörpern gemessene Vergleichsprobe ist mit VK X Labor bezeichnet.

Augenscheinlich ist der Unterschied in der Durchlässigkeit zwischen den 28 Tage alten Probekörpern, und den erst 24 Stunden alten Probekörpern. Er beträgt bei Material 2 und 4 mehr als eine Zehnerpotenz. Dies ist durch den Abbindeprozess des Zementes zu erklären. Im Laufe dieses Vorganges bilden sich Zementphasen aus, welche die Porosität vermindern. Bei Beton dauert dieser Vorgang in etwa 28 Tage, je nach Zusammensetzung der Suspensionen kann dieser Vorgang auch noch länger dauern.

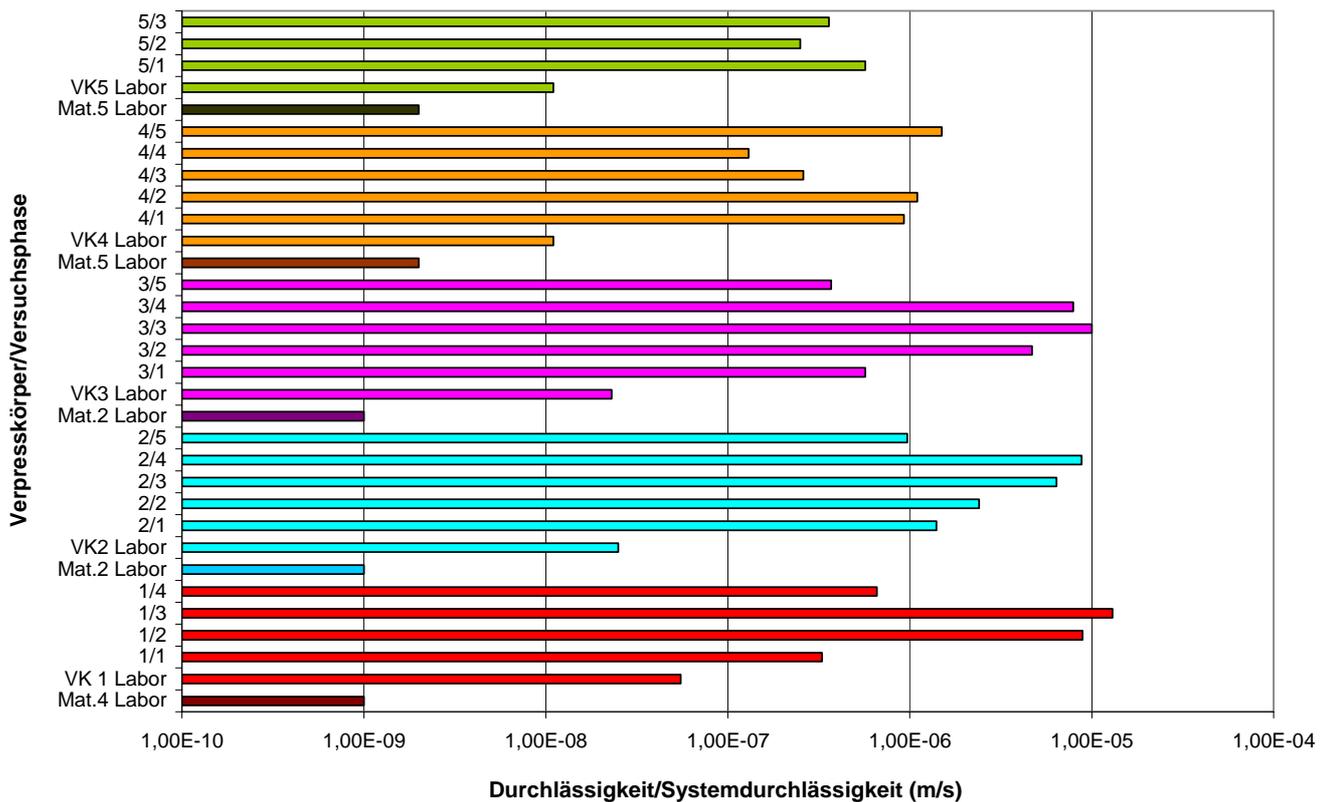


Abbildung 40, Zusammenstellung der gemessenen Durchlässigkeiten bzw. Systemdurchlässigkeiten

Der Unterschied zwischen der reinen Durchlässigkeit des Materials und der Systemdurchlässigkeit des gesamten Verpresskörpers zeigt sich bereits deutlich in der ersten Versuchsphase bei geringen hydraulischen Gradienten. In Tabelle 33 sind die gemessenen Werte der Material- und Systemdurchlässigkeiten zusammengestellt. Besonders deutlich ist dies bei Verpresskörper 2 und 4 erkennbar, hier ist die Systemdurchlässigkeit bereits in der ersten Versuchsphase um knapp 2 Zehnerpotenzen höher als die reine Materialdurchlässigkeit. Der hydraulische Gradient ist hingegen in der Versuchsphase 1 etwa um den Faktor 10 geringer. Vergrößert man in den nachfolgenden Versuchsphasen den hydraulischen Gradienten, so nimmt die Systemdurchlässigkeit des Verpresskörpers zu und somit auch die Differenz zur reinen Materialdurchlässigkeit.

Tabelle 33, Zusammenstellung der gemessenen Material- und Systemdurchlässigkeiten

Verpresskörper Nr.	Durchlässigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit		Durchlässigkeit nach 24 Stunden Abbindezeit		Systemdurchl. in Versuchsphase 1	
	i	k <sub>f</sub>	i	k <sub>f</sub>	i	k <sub>f</sub>
1	30	1 E-9	30	5,5 E-8	6,28	3,3 E-7
2	30	1 E-9	30	2,5 E-8	3,57	1,4 E-6
3	30	1 E-9	30	2,3 E-8	3,18	5,7 E-7
4	30	2 E-9	30	1,1 E-8	3,13	9,3 E-7
5	30	2 E-9	30	1,1 E-8	6,54	5,7 E-7

Da das Material wie bereits beschrieben bei einem hohen hydr. Gradienten eine geringere Durchlässigkeit zeigt, kann die Erhöhung der Systemdurchlässigkeit nur durch Wasserwegigkeiten an Grenzflächen erklärt werden. In dem Modellkörper entstehen diese Wegigkeiten einerseits entlang der Grenzflächen Sondenrohre – Verpressmaterial und andererseits entlang der Grenzfläche Außenrohr – Verpressmaterial, siehe Abbildung 41. Betrachtet man den Querschnitt des Verpresskörpers, so verhalten sich die benetzten Linien wie folgt:

$$\text{Benetzter Umfang Innenrohr: } U = D \times \pi = 14,5 \text{ cm} \times 3,14 = 45,55 \text{ cm}$$

$$\text{Benetzter Umfang Sondenrohre: } U = 4 \times D \times \pi = 4 \times 3,2 \text{ cm} \times 3,14 = 40,21 \text{ cm}$$

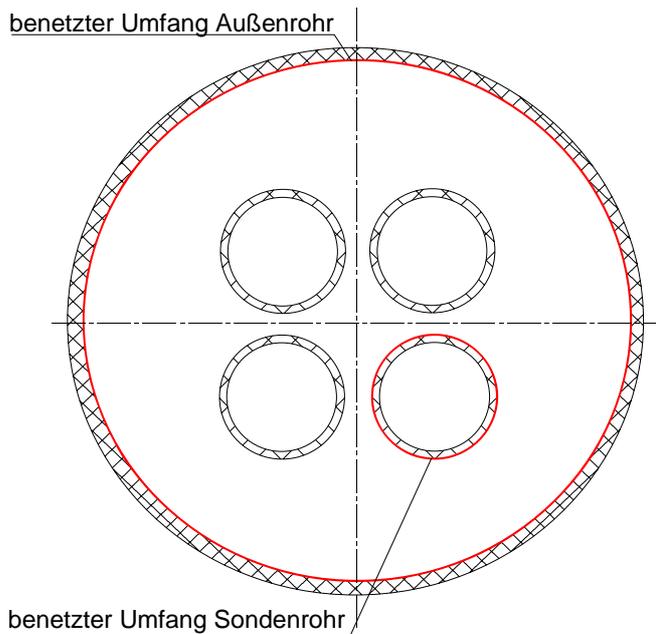


Abbildung 41, Benetzte Linien im Querschnitt des Verpresskörpers

Berücksichtigt man die Besandung des Außenrohres zur Erhöhung des Fließwiderstandes, so kann eine Gewichtung von 50 % zu 50 % angenommen werden. Das heißt die Erhöhung der Systemdurchlässigkeit basiert zu 50 % aufgrund der Wasserwegigkeiten an der Grenzfläche Sondenrohre – Verpressmaterial. Die restlichen 50% ergeben sich durch Umläufigkeiten entlang des Außenrohres. Außer Acht bleiben dabei eventuell auftretende Dehnungen des Außenrohres infolge der Druckbeanspruchung. Dies könnte unter Umständen bei Verpresskörper 1 in Versuchsphase 2 und 3 aufgetreten sein. Hier wurde ein handelsübliches PVC- Kanalrohr als Außenrohr verwendet. Der relativ starke Anstieg der Systemdurchlässigkeit zwischen Versuchsphase 1 (1 bar) und 2 (2 bar) deutet unter Umständen auf eine Dehnung des Rohres hin. Für die weiteren Modellversuche wurden daher hochzugfeste Abflussrohre aus PP verwendet.

- Visuelle Beurteilung der Modellkörper

Nach Abschluss der Modellversuche wurden die Verpresskörper abgebaut und aufgeschnitten. Aufgrund der Einfärbung des In den Versuchen verwendeten Wassers mit einem Fartracer konnten die Wasserwegigkeiten an den Grenzflächen visualisiert werden. Für jeden Verpresskörper ist dazu eine entsprechende Fotodokumentation in Anhang B angefügt.

Die in den Modellversuchen verwendeten Verpressmaterialien bildeten durchwegs homogene Körper, es konnten keine Sedimentationseffekte oder Materialentmischungen festgestellt werden. Weiters zeigten sich keine Hohlräume im Bereich der Sondenverrohrung und der dazugehörigen Abstandhalter, vgl. Abbildung 42. Auch die bewusst eingebaute Fehlstellen an der die Sondenverrohrung das Außenrohr berührt wurde vollständig mit Suspension umhüllt.



Abbildung 42, Vollständige Umhüllung des Abstandhalters bei Verpresskörper 5

Mit Hilfe des Tracers konnte sehr gut die Wasserwegigkeit entlang der Grenzflächen zwischen Außenrohr und Verpressmaterial sowie Sondenverrohrung und Verpressmaterial visualisiert werden. Dies bestätigt die Theorie, dass die im Vergleich zur Materialdurchlässigkeit erhöhte Systemdurchlässigkeit aufgrund der Wasserwegigkeiten an den Grenzflächen bedingt ist. Exemplarisch dafür sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 der Verpresskörper 2 und 4 dargestellt. Deutlich zeigt sich die Anlagerung des Fartracers am Verpressmaterial, welches direkt die Sondenrohre umgibt.



Abbildung 43, Anlagerung des Fartracers im Bereich der Sondenverrohrung bei Verpresskörper 4



Abbildung 44, Anlagerung des Farbtacers im Bereich der Sondenverrohrung bei Verpresskörper 2

Die Bilder zeigen deutlich, dass sich der Tracer nicht vollständig in der gesamten Grenzfläche um das Sondenrohr abgelagert hat, vielmehr zeigt sich eine Art Marmorierung am Verpressmaterial. Daraus lässt sich folgern, dass es zu keiner vollständigen Wasserbewegung entlang der gesamten Mantelfläche der Sondenrohre kommt, sondern es zur Ausbildung von einzelnen Stromlinien kommt. Diese laufen in unregelmäßiger Ausformungen an der Mantelfläche nach oben.

Bei der Herstellung von zwei Modellkörper (Verpresskörper 3 und 5) erfolgte die Simulation der in der Praxis verwendeten Bohrspülung durch eine Bentonitsuspension. Beim Befüllen wurde versucht diese durch die Verpresssuspension zu verdrängen. Nach dem Öffnen beider Verpresskörper zeigte sich, dass die Bentonitsuspension nicht verdrängt wurde sondern als Pfropfen am unteren Ende der Verpressstrecke verblieb. Abbildung 45 zeigt das untere Ende des Verpresskörpers 3, die Verpresssuspension ist dabei teilweise unter die Bentonitsuspension geflossen, konnte diese jedoch nicht zur Gänze verdrängen. Ein Teil der Bentonitsuspension ist dabei entlang der Sondenrohre aufgestiegen und hat diese ummantelt, Abbildung 46 zeigt den Nahbereich der Sondenrohre mit den eingefärbten Bentonit umgeben von der Verpresssuspension.

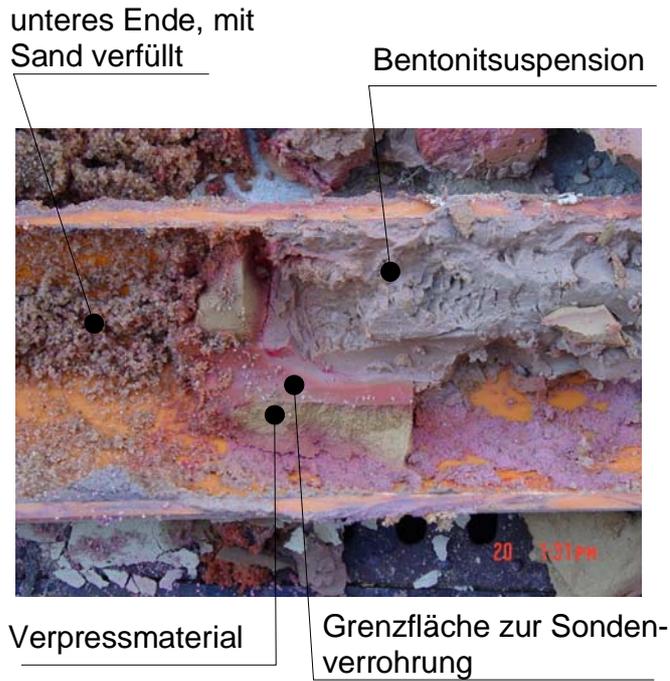


Abbildung 45, Verpresskörper 5, Detail Bentonitpfropfen



Abbildung 46, Verpresskörper 5, Detail Bereich Sondenverrohrung

Auch bei der Herstellung von Verpresskörper 3 konnte die in das Außenrohr eingefüllte Bentonitsuspension nicht aus dem Rohr verdrängt werden. Es bildete sich vor dem Abstandhalter ein Bentonitpfropfen, dieser ist in Abbildung 46 gezeigt. Deutlich ist auch die Einfärbung des Bentonits im Bereich der Sondenverrohrung zu sehen, der umgebende Bentonit besitzt hingegen seine ursprüngliche Farbe. Es dürfte sich daher auch im Bentonit einer bevorzugten Wasserwegigkeit entlang der Sondenverrohrung ausgebildet haben.

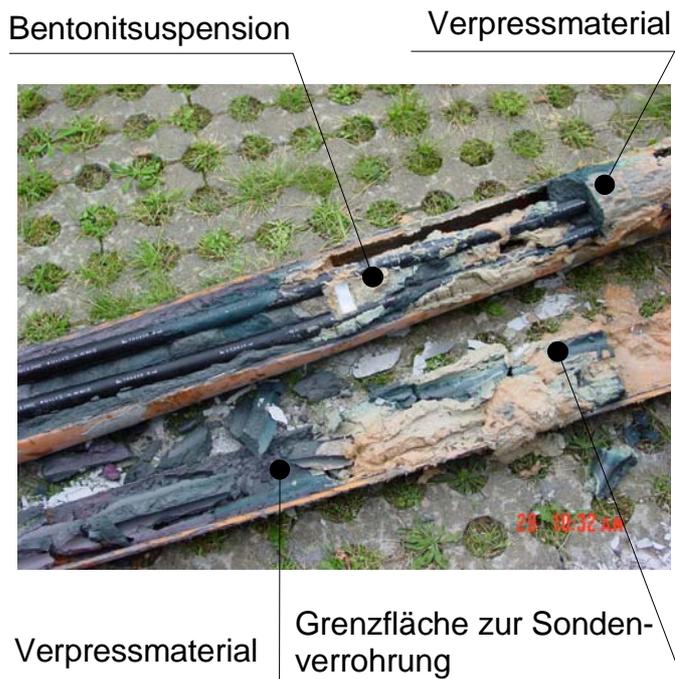


Abbildung 47, Verpresskörper 3, Detail Bentonitpfropfen

#### 4.5 Beurteilung der untersuchten Verpressmaterialien

In nachstehender Tabelle sollen die untersuchten Verpressmaterialien für Erdwärmesonden hinsichtlich ihrer Eigenschaften in Suspensionsform als auch im abgebundenen Zustand beurteilt werden. Diese Beurteilung basiert auf den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen an den frischen Suspensionen und den daraus hergestellten Probekörpern. Da es sich beim Material 3 und 10 um die gleiche Rezeptur mit unterschiedlichen Wassergehalten handelt werden diese Materialien zusammengefasst.

Es wird darauf hingewiesen, dass, insbesondere bei den Kennwerten der abgebundenen Suspension, nur eine relativ geringe Anzahl von Prüfkörpern gemäß Auftrag untersucht werden konnte. Die dabei gefundenen Ergebnisse sind daher generell nur als richtungweisend anzusehen. Für eine Verifizierung der Prüfwerte sind umfangreichere Versuchsreihen mit variablen Rezepturen und einer größeren Anzahl von Prüfkörpern unerlässlich.

Tabelle 34, Zusammenstellung und Beurteilung der untersuchten Suspensionseigenschaften

Eigenschaft	Verpressmaterial				
	1	2	3/10	4	5
Verarbeitbarkeit /Pumpbarkeit	gute Verarbeitbarkeit, gut Verpumpbar				
Suspensionsstabilität/ Volumsbeständigkeit	gut	gut	gering/gut	gering- ausreichend	gut
Suspensionsdichte	hoch	gering	gering/nieder	hoch- sehr hoch	sehr hoch
Druckfestigkeit / Druckfestigkeitsentwicklung	hoch, rasches Abbindeverhalten	mittel	nieder	hoch	gering-mittel
Wasserdurchlässigkeit	gering	gehr gering	gering	sehr gering	sehr gering
Erosionsstabilität	gegeben	gegeben	gegeben	gegeben	gegeben
Widerstand gegen Frost- Tauwechselbeanspruchung					
Kriterium 1: Abfall der einaxialen Druckfestigkeit	37	4	-/42	24	27
Kriterium 2: Abfall der Wärmeleitfähigkeit	31	3	2	15	17

Tabelle 35, Zusammenstellung und Beurteilung der untersuchten Suspensionseigenschaften, Fortsetzung

Eigenschaft	Verpressmaterial					
	6	7	8	9	11	12
Verarbeitbarkeit /Pumpbarkeit	gute Verarbeitbarkeit, gut Verpumpbar	gute Verarbeitbarkeit, höherer Energieaufwand beim Verpumpen	gute Verarbeitbarkeit, höherer Energieaufwand beim Verpumpen	gute Verarbeitbarkeit, höherer Energieaufwand beim Verpumpen	gute Verarbeitbarkeit, gut Verpumpbar	gute Verarbeitbarkeit, gut Verpumpbar
Suspensionsstabilität/ Volumsbeständigkeit	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	mittel
Suspensionsdichte	hoch	gering	zu gering	zu gering	hoch	sehr hoch
Druckfestigkeit / Druckfestigkeitsentwicklung	mittel,	mittel,	zu gering	zu gering	sehr hoch	hoch
Wasserdurchlässigkeit	gering	gering	hoch	hoch	sehr gering	sehr gering
Erosionsstabilität	gegeben	gegeben	bedingt gegeben	nicht gegeben	gegeben	gegeben
Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung						
Kriterium 1: Abfall der einaxialen Druckfestigkeit nach 28 FTW	49	36	--	--	18	33
Kriterium 2: Abfall der Wärmeleitfähigkeit nach 28 FTW	1	8	--	--	11	35

## 5 Empfehlungen für die Überarbeitung des ÖWAV- Regelblattes 207

Aus der gegenständlichen Untersuchung von sieben am Markt angebotenen Fertigprodukten sowie von drei Rezepturen zur Herstellung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden sollen folgende Punkte zusammenfassend festgehalten werden:

- Die untersuchten Fertigprodukte weisen hinsichtlich ihrer Suspensionseigenschaften als auch ihrer Eigenschaften im abgebunden Zustand große Unterschiede auf. Durch die Vorgabe einer Trichterauslaufzeit von 40 bis 50 Sekunden musste bei einigen Produkten der Wasseranteil erhöht werden. Große Streuungen zeigten sich bei den Suspensionsparametern Fließgrenze, Filtratwasserabgabe und Absetzmaß. Bei den abgebundenen Suspensionen variierte besonders die einaxiale Druckfestigkeit
- Die Probeverpressungen zeigten sehr homogene Verpresskörper, die Sondenvorrohrung samt Abstandhalter wurden von der Suspension vollständig umhüllt. Das vollständige Verdrängen einer simulierten Bohrspülung war unter den gegebenen Randbedingungen problematisch. In der Praxis an der Baustelle sollte daher zur Sicherstellung der vollkommenen Verdrängung einer eventuell vorhandenen Bohrspülung die Suspensionsdichte am Bohrlochmund gemessen werden. Der Verpressvorgang sollte beim Beginn des Ausfließens der Suspension am Bohrlochmund auf jeden Fall noch weiter fortgesetzt werden.
- Lässt man die Beständigkeit gegenüber Frost- Taubeanspruchung außer Acht, so erscheinen alle Fertigprodukte als Verpressmaterial für Erdwärmesonden geeignet.
- Bei den Rezepturen für Baustellenmischungen erscheint nur die Rezeptur von Material 10 als geeignet. Dabei sollte der vorgegebene Wasseranteil nicht vergrößert werden. Die Rezepturen von Material 8 und 9 wird als generell ungeeignet eingestuft
- Die Problematik der Festlegung einer vollkommenen Beständigkeit gegenüber einer Frost-Tauwechselbeanspruchung erscheint als kritisch, da mit Ausnahme eines Materials dieses Kriterium nicht erfüllt wird. Alternativ dazu kann der Abfall der einaxialen Druckfestigkeit oder der Abfall der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Frost-Tauwechselbeanspruchung zur Beurteilung der Beständigkeit gegenüber einer Frost-Tauwechselbeanspruchung herangezogen werden.
- Die gemessene Systemdurchlässigkeit liegt bis zu einer Zehnerpotenz über der eigentlichen Materialdurchlässigkeit. Die dabei auftretenden Wasserwegigkeiten sind an den Grenzflächen zwischen Sondenvorrohrung und Verpressmaterial gebunden.
- Im Zuge des Verpressvorganges sollten folgende Daten dokumentiert werden:
  - Produktbezeichnung bzw. Angabe der Rezeptur samt der dazu verwendeten Materialien.
  - Der sich daraus errechnete W/F - Wert
  - Der gemessene Wert der Suspensionsdichte im Zulauf und beim Austreten am Bohrlochmund.
  - Das Absetzmaß nach 3 Stunden

- Um die Funktion der Suspension als abdichtendes und wärmeleitendes Verfüllmaterial bei Erdwärmesonden zu gewährleisten sollten die in Tabelle 34 zusammengestellten Mindestanforderungen eingehalten werden:

Tabelle 36, Zusammenstellung Mindestanforderungen Verpresssuspension

Parameter	Mindestanforderung	Bemerkung
W/F- Wert	Bei Fertigprodukten < 1 Bei Baustellenmischungen < 1,5	der W/F – Wert ist von der Bohrfirma vor Verpressbeginn anzugeben
Suspensionsdichte	$\geq 1,3 \text{ g/cm}^3$	
Fließgrenze	< 80N/m <sup>2</sup>	um Pumpbarkeit und Verarbeitungsfähigkeit zu gewährleisten
Filtratwasserabgabe	< 130 ml	nach 7,5 Minuten bei 7 bar Druck
Absetzmaß	< 3 %	gem. EAU
Einax.Druckfestigkeit nach 7 Tagen	$\geq 0,3 \text{ N/mm}^2$	zur Gewährleistung der Erosionsstabilität
Einax.Druckfestigkeit nach 28 Tagen	$\geq 0,6 \text{ N/mm}^2$	Zur sicheren Gewährleistung der Erosionsstabilität im Ausgehärteten Zustand.
Wasserdurchlässigkeit nach 28 Tagen	$\leq 1\text{E-}8 \text{ m/s}$	
Sicherheit gegenüber Frost-Tauwechselbeanspruchung		
Kriterium 1: Abfall der Druckfestigkeit nach 10 FTW	max. 35%	Richtwert, als mögliches Kriterium, leicht prüfbar
Kriterium 2: Abfall der Wärmeleitfähigkeit nach 10 FTW		Mögliches Kriterium, große Streuung bei Messung, mehrere Messpunkte sind für repräsentative Messung notwendig

- Für an der Baustelle gemischte Suspensionen sollten folgende Randbedingungen unbedingt eingehalten werden:
  - Generell sind hochgeschlackte Zemente der Klasse CEM III/A oder B zu verwenden, sind diese im Handel nicht erhältlich können auch Zemente der Güte CEM II/B-S verwendet werden. Reine Portlandzement sollten nicht verwendet werden.
  - Die Verwendung von zementstabilem, aktivierten Natriumbentonit, z.B. Aktiv-Bentonit IBECO CT oder Aktiv-Bentonit IBECO B1 ist anzuraten.
  - Der Bentonit ist ohne Zement mit Wasser mind. 10 Minuten klumpenfrei anzurühren, erst dann ist der Zement zuzugeben. Eine gleichzeitige Zugabe von Bentonit und Zement in das Anmachwasser führt zu niederviskosen Suspensionen mit generell schlechteren Eigenschaften.
  - Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen ist die Rezeptur von Material 10 zum Verpressen von Erdwärmesonden als geeignet zu bezeichnen.
  - Die Dichte der Suspension sollte mindestens 1,3 g/cm<sup>3</sup> betragen, ist die Bohrspülung aus dem Bohrloch durch die eingebrachten Verpresssuspension zu verdrängen, so ist die Dichte der Verpresssuspension entsprechend zu erhöhen.
  - Eine Erhöhung der Suspensionsdichte sollte nicht unbedingt durch die Erhöhung des Zementanteils erfolgen, vielmehr ist die Zugabe von mineral. Sanden oder Mehlen hoher spez. Dichte zielführender.
  - Eine entsprechende Mischvorrichtung samt Behälter zum Vorquellen des Bentonits soll auf der Baustelle vorhanden sein.

## 6 Verwendete Literatur

*Bentonit im Tiefbau*, Handbuch der Fa. IBECO, 2006

*Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen*, Deutsche Geotechnische Gesellschaft, 2004

*Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätskriterien für Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau*, DVGW, 2003

*Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“*, Deutsche Geotechnische Gesellschaft, 2000

*Verfüllung von Hohlräumen mit hydraulischen Bindemittel im Tiefbau*, Fa. Anneliese BUT, 1999

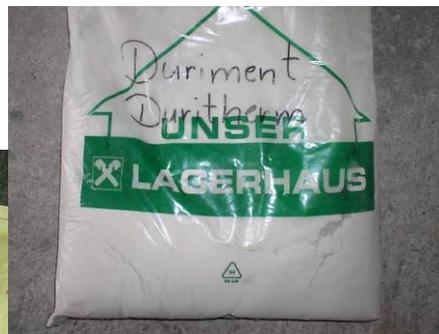
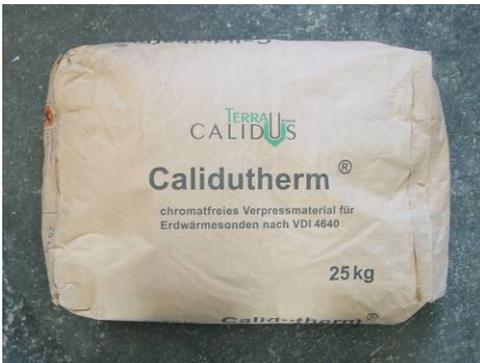
*Untersuchung von Abdichtungsmaterialien für Erdwärmesonden*, Bericht ARC--U-0336

Einschlägige Fachnormen

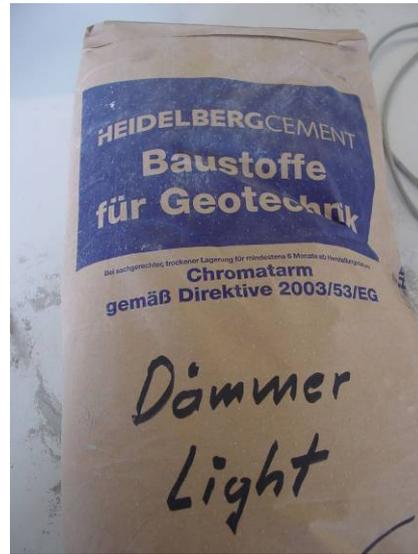
Datenblätter der untersuchten Verpressmaterialien

# **ANHANG A: FOTODOKUMENTATION LABORVERSUCHE**

Produkte:



Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden



Versuchsdurchführungen: Frischsuspension



FILTERPRESSE



MARSHTRICHTER



PROBENHERSTELLUNG



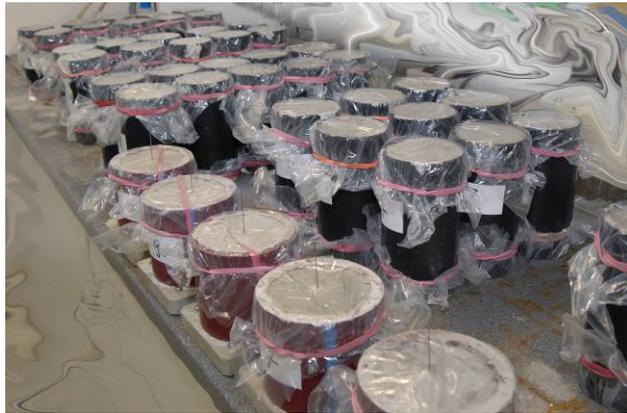
KUGELHARFE



ROHDICHTE  
ABSETZMASS



Lagerung im Klimaraum:

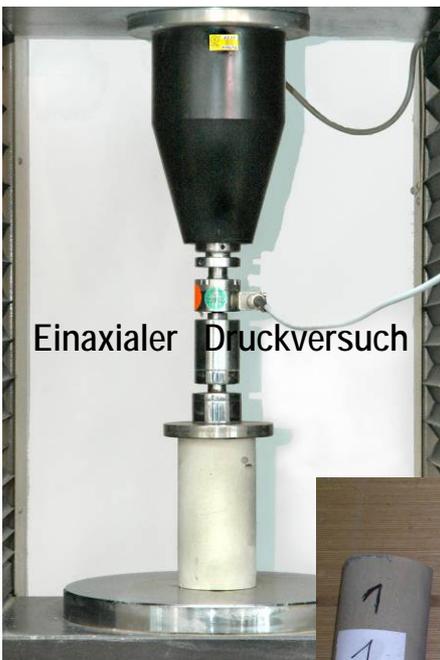


Versuchsdurchführungen:

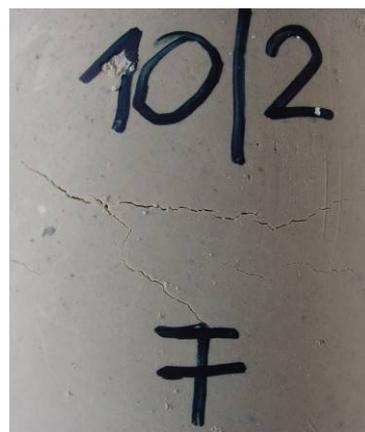
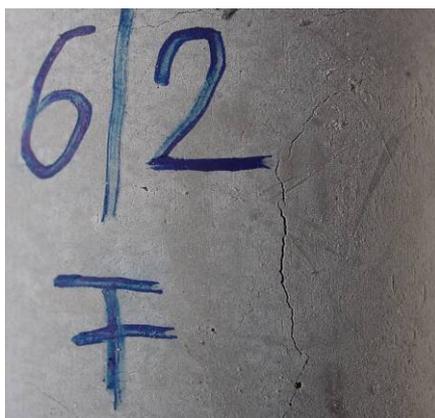
Festsuspension



Druckfestigkeit H/D 1:2



Beispiele Frostschäden:



# **ANHANG B:**

## **FOTODOKUMENTATION MODELLVERSUCHE**





Abbildung 5, Versuchsstand 2 Rohre



Abbildung 6, Druckbeaufschlagung Sondenrohre



Abbildung 7, Überfließen der Suspension



Abbildung 8, Wasserzufluß am unteren Rohrende



Abbildung 9, Anrühren der Suspension



Abbildung 10, Druckzylinder mit Druckregelung

## B2 VERPRESSKÖRPER 1



Abbildung 11, Verpresskörper 1, unteres Ende



Abbildung 12, VK 1 oberes Ende



Abbildung 13, VK 1, Fehlstelle



Abbildung 14, VK 1 Fehlstelle und Abstandhalter

## B2 VERPRESSKÖRPER 2



Abbildung 15, VK2, gesamt



Abbildung 16, VK2, unteres Ende



Abbildung 17, VK2, Detail oberes Ende



Abbildung 18, VK2, Detail Tracerablagerung



Abbildung 19, VK2, Detail Tracerablagerung an Grenzfläche zu Sondenverrohrung



Abbildung 20, Tracerablagerung an Grenzfläche zum Außenrohr

### B3 VERPRESSKÖRPER 3



Abbildung 21, Verpresskörper 3



Abbildung 22, Einschluss Bentonitsuspension



Abbildung 23, Detail Bentoniteinschluss



Abbildung 24, Detail Übergang Suspension- Bentonit



Abbildung 25, Detail Traceranlagerung an Mantelfläche



Abbildung 26, Detail Einschluss Bohrspülung

## B4 VERPRESSKÖRPER 4



Abbildung 27, Verpresskörper 4



Abbildung 28, VK 4, unteres Ende



Abbildung 29, Detail Anlagerung Tracer an Sondenrohren



Abbildung 30, Detail Anlagerung Tracer



Abbildung 31, Detail Umhüllung Abstandhalter

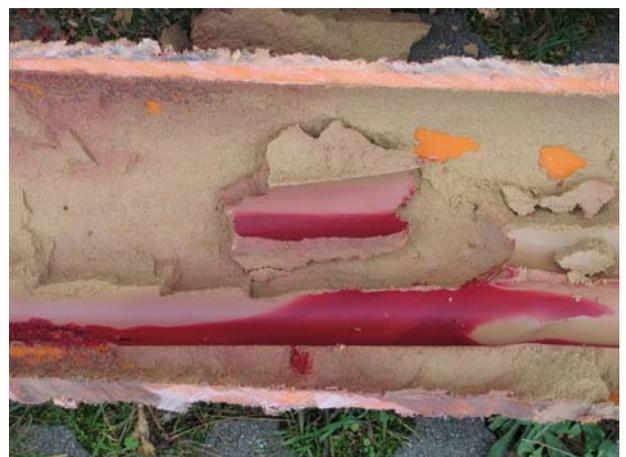


Abbildung 32, Detail Anlagerung Tracer an Grenzfläche zu Sondenrohren

## B5 VERPRESSKÖRPER 5



Abbildung 33, Verpresskörper 5

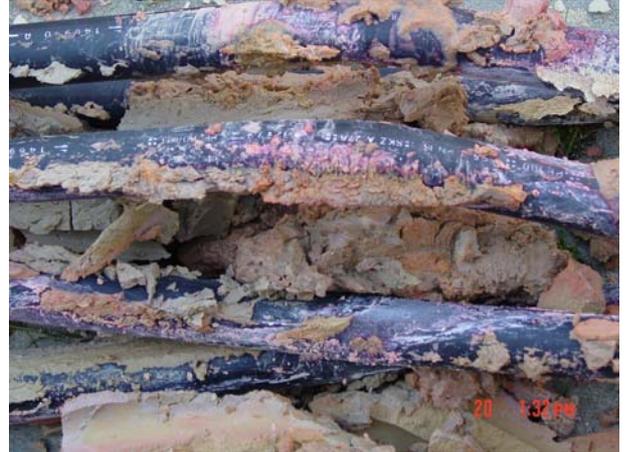


Abbildung 34, VK5, Detail Sondenverrohrung



Abbildung 35, VK5 unteres Ende



Abbildung 36, VK5, Detail Bentonitpfropfen



Abbildung 37 und 38, VK5 Bentoniteinspülung entlang der Sondenverrohrung

**ANHANG C:**  
**DATENBLÄTTER DER FERTIGPRODUKTE**

# Technisches Datenblatt Calidutherm®

## **Verarbeitung**

Am Verarbeitungsort wird Calidutherm® mit Wasser vermischt um eine fließ- und pumpfähige Suspension zu erhalten. Die genaue Wassermenge richtet sich nach dem Härtegrad des verwendeten Wassers und dem Mischenergieeintrag der Mischer-Pumpen-Einheit. 25kg Calidutherm® können mit einer Zugabemenge von 11 – 17 Liter Wasser angemischt werden. Eine optimal verarbeitbare Suspension wird bei einer Zugabemenge von 15 Liter Wasser pro 25 kg Calidutherm® erreicht. Bei Bedarf, z.B. stark klüftiger Geologie, können auch geringere Wassermengen verwendet werden. Dafür bildet die verwendete Verpresstechnik (Verpressdruck) die Grenze.

Calidutherm® wird bis zum vollständigen Aufschluss in einem Zwangsmischer angemischt. Ein Kolloidmischer ist nicht zwingend erforderlich. Dabei wird dem vordosierten Wasser bei laufendem Mischer die entsprechende Menge Calidutherm® hinzugefügt.

## **Stoffliche Angaben**

Calidutherm® ist ein vorgemischtes Trockenprodukt zur Herstellung von Verpresssuspensionen für Erdwärmesonden nach VDI 4640/Blatt 2.

Calidutherm® wird aus natürlichen Tonmineralien, Hochofenzement und Quarzsand hergestellt und in verarbeitungsgerechten Ventildapiersäcken zu 25 kg bereitgestellt. Calidutherm® ist trocken zu lagern.

Die Korngröße der Quarzsandkomponente beträgt < 0,5 mm und ist feindispers verteilt.

## **Eigenschaften nach Gesundheits- und Wasserschutz**

Calidutherm® enthält nur natürliche Ausgangsstoffe. Es erfüllt deutlich die Vorgaben der TRGS 613 und der DIN EN 196-10 von < 2ppm an löslichem Cr VI. Die Analysenwerte von Calidutherm® weisen 0,000005 - 0,000006 % an löslichem Chrom VI aus. Damit ist Calidutherm® als chromatfrei zu bezeichnen.

Im Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG sind alle relevanten Merkmale benannt, die ausschließlich durch den im Produkt enthaltenen Anteil an Hochofenzement geprägt werden.

Eine chemische Unbedenklichkeitsuntersuchung liegt vor (Eluat).

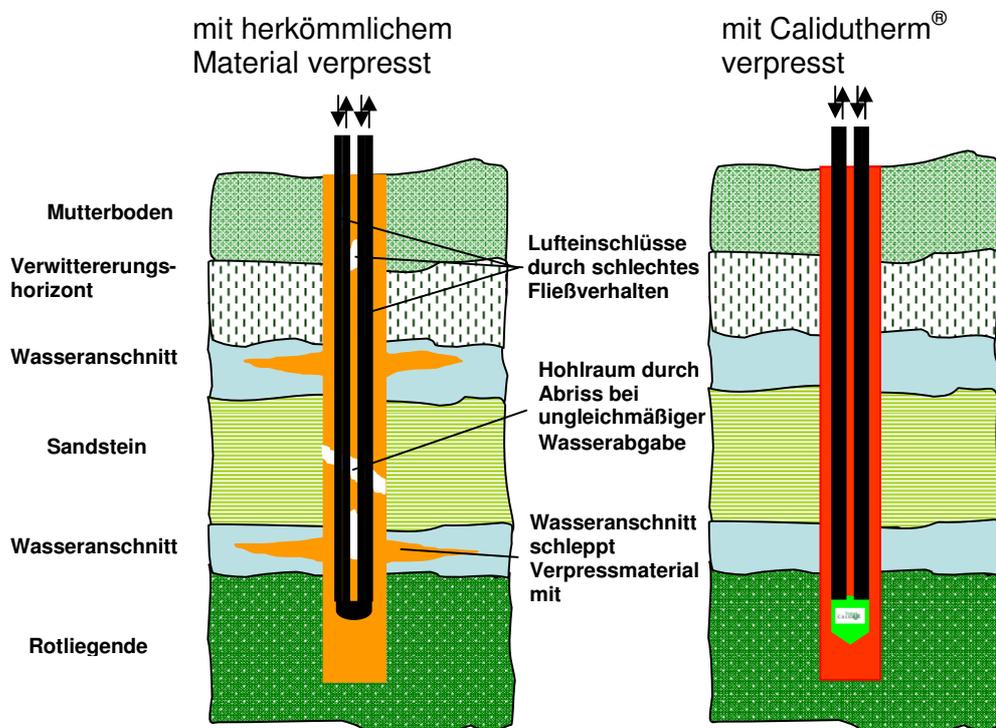
## Technische Vorteile

Die Fließeigenschaften von Calidutherm® sind derart optimiert, dass eine hohlraumfreie Verpressung des Ringraumes der Erdwärmesonde erreicht wird. Eine Hohlrumbildung durch unterschiedliches Quellen oder zeitversetzter Wasserabgabe ist ausgeschlossen. Mittels Calidutherm® lassen sich vollständig ummantelte Erdwärmesonden erstellen.

Calidutherm® erhärtet wesentlich schneller als herkömmliche Verpressmaterialien. Kommt die Suspension nach dem Verpressen im Bohrloch zur Ruhe, sorgt die sich einstellende Thixotropie schnell zur Überbrückung von kleinen Hohlräumen. Damit wird der Verschleppung der Suspension durch Grundwasser entgegengewirkt. Eine negative Beeinflussung des Grundwassers wird somit vermieden. Beim Bohren durchfahrene Grundwasserstockwerke werden schnell wieder getrennt. Mit Calidutherm® können Erdwärmesonden dauerhaft wasserdicht verpresst werden.

Calidutherm® bleibt auch nach der Aushärtung plastisch und bietet bei normaler geologischer Aktivität (Setzung, Verschiebung) statische Sicherheit für die Erdwärmesonde.

Eine gleichmäßig verpresste und optimal an die Geologie angekoppelte Erdwärmesonde besitzt einen gleichmäßigeren Wärmeaustausch und realisiert somit eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Systems über die gesamte Betriebsdauer. Calidutherm® verbessert die Effizienz des Systems aus Boden, Verpressmaterial und Sonde. Die Wärmeleitfähigkeit liegt in Abhängigkeit von der anstehenden Geologie bei ca. 2,0 W/mK.



### **3-Komponenten Mischung**

Zement: der enthaltene Anteil an Hochofenzement CEM III/B 32,5 N LH/HS/NA macht Calidutherm® sulfatbeständig (nach DIN 1164,T.10) und frostbeständig bis ca. -15 °C und erfüllt damit eine wesentliche Forderung der VDI 4640

Tonmineral: verbesserte Fließeigenschaften, keine Wasserabgabe, kein Absacken des Verpressniveaus, Anteil an quellfähigen Tonmineralien (Smektite) mindestens 4%

Quarzsand: in Form von Quarzmehl, sehr fein und gleichmäßig verteilt: hohe Wärmeleitfähigkeit und aufgrund der hohen Feinheit geringer Verschleiß an der Mischer-Pumpen-Einheit

### **Vorteile durch Einsatz eines fertiggemischten Produktes**

Das Mischungsverhältnis der Komponenten nach VDI 4640 wird bei Calidutherm® immer konstant eingehalten und bei der Herstellung kontrolliert.

Es können keine Dosierfehler auf der Baustelle auftreten.

Calidutherm® lässt eine an den Verbrauch angepasste Dosierung zu. Es entstehen an der Verfüllstelle keine überschüssigen Restmengen an Rohstoffkomponenten und fertiger Suspension.

Durch die Bereitstellung des fertig vorgemischten Calidutherm® entsteht auf der Baustelle eine erhebliche Zeiteinsparung, da keine Einzeldosierung von Rezepturbestandteilen vorgenommen werden muss. Dadurch wird ein kontinuierlicher Verpressvorgang möglich.

Der Aufschluss in der Mischer-Pumpen-Einheit erfolgt durch die sorgfältige Auswahl der Komponenten vollständig homogen. Klumpenbildungen, die zur Verstopfung des Füllschlauches führen, werden vermieden.

Der Reinigungsaufwand der Mischer-Pumpen-Einheit ist im Vergleich mit herkömmlich verwendeten Verpressmaterialien deutlich reduziert. So lassen sich kürzere Reinigungszeiten auf der Baustelle realisieren.

Für eine automatisierte Herstellung der Verpresssuspension bietet Calidutherm® eine wesentliche Voraussetzung, weil keine einzelnen Komponenten vor Ort gemischt werden müssen.

### **Ergiebigkeit und Rohdichte**

1 m<sup>3</sup> Verpressmaterial = 1032 kg Calidutherm® + 619 Liter Wasser bei Wasser : Calidutherm® = 0,6.

Rohdichte (bei Mischungsverhältnis Wasser : Calidutherm® = 0,6): 1,65 kg/dm<sup>3</sup>



## DURITHERM

### VERFÜLLBINDER FÜR ERDWÄRMESONDEN

DURITHERM ist ein hydraulischer Verfüllbinder für Erdwärmesonden. Dieser speziell entwickelte Baustoff besitzt mindestens ebenso hohe Wärmeleitfähigkeit wie das umliegende Erdreich.

#### Eigenschaften

DURITHERM verfügt aufgrund seiner Kornabstufung und geringen Isolation über eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Der Verfüllmörtel wird mit mehreren Kornfraktionen hergestellt, um eine optimale Gleichmäßigkeit der Sieblinie zu garantieren. Das Größtkorn beträgt 0,3 mm.

Durch Zugabe spezieller Additive wird die Viskosität und Abdichtung optimiert. Aufgrund der Zusammensetzung wird ein Absetzmaß  $< 2 \%$  gewährleistet, sowie ein Schwinden minimiert um die evtl. Formteile von Sonden optimal gegen Korrosion zu schützen. Die Abbindewärme liegt bei einem W/B-Wert von 0,40 bei nur 2,2 K.



#### Anwendungsgebiete

DURITHERM wird für folgende Anwendungsgebiete empfohlen:

- Verfüllmaterial bzw. Bohrlochstützung bei Erdwärmebohrungen

#### Vorteile

- Verbesserung der Jahresarbeitszahl und damit verbundene Energieeinsparung
- Bei unveränderter Entzugsleistung und gleich bleibender Sondenlänge sinken die Temperaturen im Bohrloch nicht so tief ab, so dass eventuell Frostschutzmittel gespart werden kann (abhängig von weiterer Leitungsführung)
- Hohe Ergiebigkeit und dadurch Kosteneinsparung
- Leichte Verarbeitbarkeit, keine zusätzlichen Stoffe nötig

#### Verarbeitung und Materialbedarf

DURITHERM weist eine sehr hohe Ergiebigkeit auf. Für 1 m<sup>3</sup> Suspension benötigt man ca. 1.250 kg DURITHERM. Durch den in der Fertigmischung enthaltenen optimierten Zementgehalt bleibt die Mischung auch bei weiterer Wasserzugabe bindfähig.

Das Verpressen erfolgt mit handelsüblichen Injektionspumpen (z.B. MAI 200). Silos bzw. Injektionstechnik können auf Wunsch von der Firma Betontechnik zur Verfügung gestellt werden.



## Technische Daten

Form	_____	<i>Pulver</i>
Farbe	_____	<i>grau</i>
Größtkorn	_____	<i>&lt; 0,3 mm</i>
W/B-Wert	_____	<i>0,35 bis 0,40</i>
Absetzmaß	_____	<i>&lt; 2 %</i>
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R$	_____	<i>Tabellenwert nach VDI 4640</i>
Abbindewärme	_____	<i>2,2 K bei W/B 0,40</i>
Druckfestigkeiten an Prismen mit W/B=0,4		
7 Tage	_____	<i>ca. 1,5 N/mm<sup>2</sup></i>
28 Tage	_____	<i>ca. 2,2 N/mm<sup>2</sup></i>
Trinkwassertauglichkeit nach DVGW Arbeitsblatt W 270		

## Produkt-/Qualitätskontrolle

Die Produkt- bzw. Qualitätskontrolle von DURITHERM erfolgt im Labor des Herstellerwerks und garantiert die gleichmäßige Zusammensetzung und Eigenschaften.

## Lagerung

Lagerdauer: 6 Monate  
Lagerbedingungen: trocken lagern

## Lieferform

Sackware zu 25 kg  
Lose im Silo. Füllgewicht auf Anfrage

Die Angaben dieser Produktinformation basieren auf dem derzeitigen Kenntnisstand und erheben keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Aus den Daten lassen sich keine rechtlichen Ansprüche ableiten. Der Verarbeiter hat durch Versuche und Prüfungen sicherzustellen, dass das Produkt für den jeweiligen Einsatzzweck geeignet ist. Der Verarbeiter hat bestehende Gesetze, Normen und sonstige Bestimmungen eigenverantwortlich einzuhalten. Informationsstand Mai 2007



## K INJEKT-THERM

Körnung 0 / 0.0 mm (gute Wärmeleitfähigkeit)

**Zusammensetzung:** Der **K INJEKT-THERM** ist ein werkgemischter mineralischer Injektionsbinder, auf Zement- und Bentonitbasis ohne Körnung.

**Lieferung:** Der **K INJEKT-THERM** wird in 25 kg Säcken, BigBag oder lose in Silo geliefert.

**Anwendung:** Der **K INJEKT-THERM** wird zum Verfüllen von Erdwärmesonden verwendet.

**Grundlagen:** Der **K INJEKT-THERM** wurde auf folgende Eignung untersucht.

- Umweltverträglicher durch 50% weniger Zement als bei herkömmlichen Injektionsmischungen.
- Wärmeleitfähiger, 25% mehr als herkömmliche Injektionsmischungen.
- Besseres Sprödverhalten durch geringere Druckfestigkeiten und elastischen Eigenschaften.
- Werkgemischtes Material und dadurch kontrollierte Mischungen auf den Baustellen.
- Dickflüssiges Verarbeiten und dadurch geringes Auswaschen und kontrollierteres Verfüllen der Sonde.

**Verarbeitung:** Der **K INJEKT-THERM** wird mit einer Mörtelmischpumpe z.B. Typ **K MUNGG (max. 50 bar)** verarbeitet. Bei Erstverarbeitung wird die Ausführung vom Mörtel- und Maschinenlieferanten überwacht.

<b>Technische Daten:</b>	Sackinhalt:	25 kg
	Körnung:	0.0 mm
	Ergiebigkeit:	25 l (1000 l/t.)
	WM Faktor pro Sack:	15 l
	Wärmeleitfähigkeit:	0.9 -1.0 W/mK
	Rohdichte:	1350 kg/m <sup>3</sup>
	Schüttdichte	1100 kg/m <sup>3</sup>



**Charakter:** Der **K INJEKT-THERM** erweist sich als sehr sämig, elastisch (mit geringen Druckfestigkeiten), quellend und wärmeleitfähig. Durch die guten Eigenschaften ermöglicht sich ein einwandfreies Injizieren und weites Pumpen.

Die Angaben in dieser Produkte-Information haben beratenden Charakter. Rechtsverbindlichkeiten können daraus nicht abgeleitet werden. Produktveränderungen aufgrund technischer Entwicklungen bleiben vorbehalten.

**! Siehe unter K Injektionsanlagen und Automation!**

## STÜWAPRESS F – 10

### Frostsicheres Erdwärmesonden-Verpressmaterial

In dem wachsenden Markt der Erdwärmesonden Wärmepumpenanlagen wird zunehmend die Forderung nach frostsicheren Verpressmaterialien gestellt, da als zirkulierendes Wärmeübertragungsmedium eine frostsichere Flüssigkeit verwendet wird. Mittels der Wärmepumpe ist es leicht möglich, die Flüssigkeit z.B. bis  $-10^{\circ}\text{C}$  abzukühlen, was in Spitzenheizperioden (Ende Winterzeit) oder bei unterdimensionierten Anlagen oft passiert. Somit sind Erdwärmesondenanlagen systembedingt häufig Frost-/Tau-Wechselprozessen ausgesetzt, die mit der Zeit Risse hervorrufen oder sogar zur Zerstörung des Verfüllmaterials führen können.

Durch das kältetechnisch optimierte Verpressmaterial STÜWAPRESS F-10 wird bei diesen Anlagen ein ausreichender Frostpuffer geschaffen. Durch umfangreiche Frost-/Tau-Wechselversuche und anschließende Simulationsstudien konnte die Mischung des Verpressmaterials soweit optimiert werden, dass von einer Frostsicherheit bis  $-10^{\circ}\text{C}$  gesprochen werden kann. Dies ist für die meisten Erdwärmesondenanlagen ausreichend, da auch unter ungünstigen Bedingungen die Temperatur des Umlaufmediums nur bis ca.  $-5$  bis  $-8^{\circ}\text{C}$  absinken wird. Somit sind ausreichende Reserven vorhanden, auch unter der Berücksichtigung, dass die Versuche noch bis  $-20^{\circ}\text{C}$  positive Ergebnisse zeigten.

Das Material besteht aus einer Ton / Quarzmehl / Zement Kombination und wird ohne Zugabe weiterer Komponenten mit Wasser angemischt.

Der verwendete Hochofenzement ist unbedenklich hinsichtlich der hygienischen Anforderungen im Trinkwasserbereich.

#### *Eigenschaften:*

W/F-Wert [-]	0,6
Suspensionsdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,6
Absetzmaß [Vol-%]	< 1
Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ ]	1,5
Marsh-Zeit [l/min]	0,37
28-Tage-Druckfestigkeit [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	1,76

Empfohlene Mischung pro  $\text{m}^3$  Suspension:  
1000 kg STÜWAPRESS F-10 zzgl. 600 Liter  
Wasser

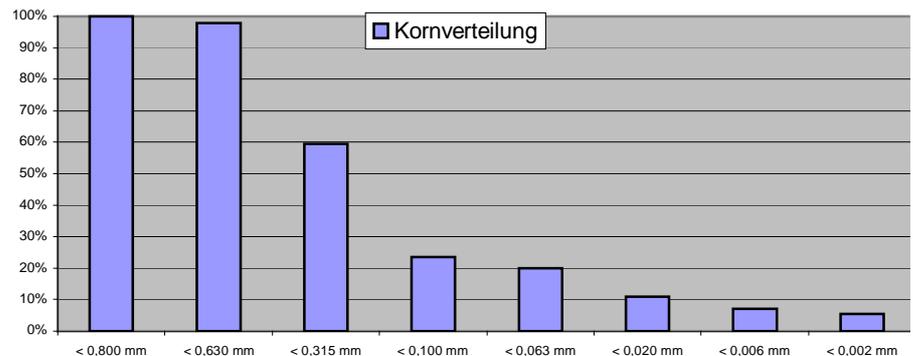


## STÜWATHERM®

### Produkteigenschaften:

- hohe Wärmeleitfähigkeit (2,0 W/mK) bedingt durch Kornabstufung und Zugabe eines natürlichen Stoffes. Bei dem Produkt wurden Erkenntnisse der Bodenmechanik (Porenvolumen, Kornstruktur) mit Grundsätzen der Leitfähigkeit kombiniert. Ein Verschließen von möglichst vielen Poren führt zu geringerer Isolation und dadurch zu einer hohen Leitfähigkeit.
- Körnung < 0,8 mm (max 1 mm Korn möglich); abgestuftes Quarzkorn, gesiebt und wieder zusammengefügt. Zugabe einer spez. Tonmischung.– Verbesserung der tixotropen Eigenschaften.
- Chemische Unbedenklichkeitsbescheinigung liegt vor.
- Farbe: weiß, bräunlich; Anlieferung als Trockenmischung
- Tonanteil: 25-30%. Ton wurde zugemischt um das Bindevermögen unter Wasser zu verbessern.
- Folgende Mischungsempfehlung ergibt 1 m<sup>3</sup> verpressbare Suspension. Auf 1000 kg STÜWATHERM kommen 150 kg Zement und 650 l Wasser. Bei Verwendung von STÜWATHERM Z ist die erforderliche Zementmenge schon werkseitig beigemischt.
- Durch den hohen Zementanteil behält die Suspension auch bei weiterer Zugabe von Wasser noch ihre Bindefähigkeit.

Körnung	Anteile
< 0,800 mm	99,90%
< 0,630 mm	97,80%
< 0,315 mm	59,40%
< 0,100 mm	23,50%
< 0,063 mm	19,90%
< 0,020 mm	11,00%
< 0,006 mm	7,00%
< 0,002 mm	5,50%



### Vorteile:

- Bei gleichbleibender Länge der Erdwärmesonden und Einsatz von STÜWATHERM wird weniger Strom zum Wärmepumpenbetrieb benötigt. Die Jahresarbeitszahl steigt von 3,5 auf 3,8-4,0. Das bedeutet 10-15 % Energieeinsparung.
- Bei gleicher Entzugsleistung und gleichbleibender Erdwärmesondenlänge werden die Temperaturen im Bohrloch nicht so tief absinken, so dass evtl. auf Frostschutzmittel in der Sonde verzichtet werden kann.

### Hinweis:

Der Einsatz des Materials ist für optimale Anlagen-Betriebspunkte vorgesehen, bei denen die Temperatur des Umlaufmediums über der Frostgrenze liegt.

Anlieferung: verpackt in Big Bags (Gebinde ca.1 to) oder in 25 kg Säcken (Gebinde 1 to)

## Produktbeschreibung

ThermoCem® erreicht im Vergleich zu herkömmlichen Verfüllbaustoffen in etwa die doppelte Wärmeleitfähigkeit bei zugleich optimalen Verarbeitungseigenschaften. Der Bohrlochwiderstand wird dadurch um 20 – 35 % herabgesetzt. Der Einsatz von ThermoCem® führt zu einer signifikanten Leistungssteigerung von Erdwärmesonden. Neben Einsparmöglichkeiten bei der Sondenlänge wird die Systemsicherheit maßgeblich erhöht.

Das Produkt kann ohne weitere Zuschlagsstoffe nur durch Zugabe von Wasser zu einer fließfähigen Suspension angemischt werden.

## Eigenschaften

ThermoCem® ist ein aus natürlichen Rohstoffen gefertigter Trockenbaustoff. Die hohe Wärmeleitfähigkeit von ThermoCem® wird ohne Zugabe von chemischen Additiven erreicht. Der hydraulisch abbindende Trockenbaustoff gewährleistet einen kraftschlüssigen Verbund mit der Erdwärmesonde und garantiert somit einen optimalen Wärmetransport zwischen Sonde und Erdreich. Die Einbettung des Sondenrohrs in ThermoCem® sichert deren optimale Lage im Bohrloch und schützt vor Punktlasten aus dem Erdreich. Durch Verwendung ausgewählter Tonkomponenten werden Dichtigkeit und Plastizität positiv beeinflusst.

ThermoCem® ermöglicht eine hohlraumfreie und volumenbeständige Bohrlochverfüllung, um Wasserhorizonte abzudichten. Die Auswahl spezieller Bindemittel stellt die Beständigkeit gegen sulfathaltige Wässer sicher. Das umweltgerechte Produkt ist natürlich auch in Wasserschutzzonen I und II einsetzbar.

ThermoCem® entspricht den Anforderungen an Grundwasser-Messstellenabdichtungen gemäß DVGW-Merkblatt W 121.

## Verarbeitungshinweise

Die Verarbeitung kann mit gängigen Durchlauf- oder Zwangsmischern erfolgen. Optimalen Aufschluss erreicht ThermoCem® mit einem Kolloidalmischer.

## Lieferung / Lagerung

25-kg-Säcke auf Euro-Palette, rundum geschrumpft; Siloware oder Big-Bag.

Trockene Lagerung auf Paletten ist erforderlich. Bei sachgemäßer Lagerung ist das Material mind. 6 Monate haltbar.



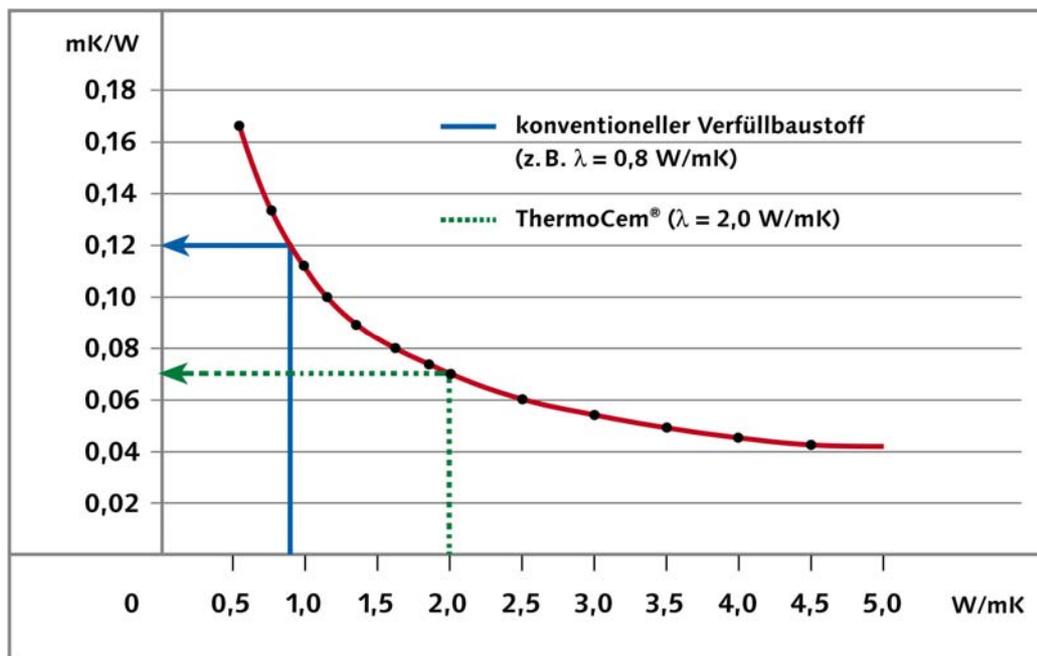
Der Bohrlochwiderstand  $R_s$  hat die Dimension  $m \cdot K/W$  und ist wie folgt definiert:

$$R_s = \frac{T_{\text{Fluid}} - T_{\text{Bohrlochwand}}}{q}$$

$T_{\text{Fluid}}$  = Temperatur des Sondenfluids in Kelvin

$T_{\text{Bohrlochwand}}$  = Temperatur an der Bohrlochwand in Kelvin

$q$  = Wärmestrom in  $W/m$



**Bild 1:** Vergleich des Bohrlochwiderstandes  $R_s$  eines herkömmlichen Verfüllbaustoffs mit ThermoCem®.

Stand: April 2007

*Die vorstehenden Daten beziehen sich auf Versuche unter Laborbedingungen mit den üblichen messtechnischen Toleranzen. Diese – wie auch Aufzeichnungen über sonstige „Eignungsversuche“ – dienen dazu, Erkenntnisse über die grundsätzliche Eignung unseres Produktes in Bezug auf den Einsatzzweck zu gewinnen. Die Angaben sind nicht – auch nicht im Fall einer projektbezogenen Untersuchung – als Eigenschaftszusicherung mit der Folge zu verstehen, dass wir für Schäden infolge Fehlens von Merkmalen und / oder Eigenschaften verantwortlich gemacht werden können. Unsere Erkenntnisse entbinden den Auftraggeber deshalb nicht von eigenen orientierenden Versuchen und eigenverantwortlichen Entscheidungen.*

## Zementbezeichnungen ab 2002

<b>ab 1.1.2002</b> <b>Zementbezeichnungen nach EN 197-1</b> N= übliche Anfangsfestigkeit R= hohe Anfangsfestigkeit	<b>Zementbezeichnung</b>	<b>bis 31.12.2001</b> <b>Zementbezeichnung nach ÖN B 3310</b>
CEM I 32,5 N oder R CEM I 42,5 N oder R CEM I 52,5 N oder R	Portlandzement	PZ 275 PZ 375 PZ 475
CEM I 32,5 N oder R WT 33 C <sub>3</sub> A-frei/HS C <sub>3</sub> A-frei CEM I 42,5 N oder R WT 38 C <sub>3</sub> A-frei/HS C <sub>3</sub> A-frei	erhöht sulfatbeständiger Portlandzement	PZ 275 HS, C <sub>3</sub> A-frei PZ 375 HS, C <sub>3</sub> A-frei
CEM II / A-S 32,5 N oder R CEM II / A-S 42,5 N oder R	Portlandhüttenzement	PZ 275 (H) PZ 375 (H)
CEM II / A-V 32,5 N oder R CEM II / A-V 42,5 N oder R	Portlandflugaschezement	PZ 275 (F) PZ 375 (F)
CEM II / A-L 32,5 N oder R CEM II / A-L 42,5 N oder R	Portlandkalksteinzement	PZ 275 (K) PZ 375 (K)
CEM II / A-M 32,5 N oder R CEM II / A-M 42,5 N oder R	Portlandkompositzement	PZ 275 (C) PZ 375 (C)
CEM II /B-S 32,5 N oder R CEM II /B-V 32,5 N oder R CEM II /B-M 32,5 N oder R	Portlandhüttenzement Portlandflugaschezement Portlandkompositzement	EPZ 275 FAZ 275 CMZ 275
CEM III / A 32,5 N oder R CEM III / B 32,5 N oder R CEM III / C 32,5 N oder R	Hochofenzement	HOZ 275 durch ÖN 3310 nicht abgedeckt