



RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM  
FAKULTÄT FÜR BAUINGENIEURWESEN  
INSTITUT FÜR KONSTRUKTIVEN INGENIEURBAU  
PROF. DR.-ING. D. STEIN

## ABSCHLUSSBERICHT

zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt

### **„Entwicklung und Erprobung von optimierten Injektionsmitteln und -verfahren zur kontinuierlichen Ring- spaltstützung beim Rohrvortrieb im heterogenen Baugrund“**



im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und  
Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW)

Projektbearbeitung: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Stein  
Dr.-Ing. Britta Schöber  
Dipl.-Ing. Christoph Statetzni

Bochum, 14. November 2007



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Darstellung des Vorhabens</b>	<b>1</b>
1.1	Prinzip des Rohrvortriebs . . . . .	1
1.2	Problemstellung . . . . .	2
1.3	Zielsetzung und Lösungsweg . . . . .	4
1.4	Projektbeteiligte . . . . .	7
1.4.1	Arbeitsgruppe Prof. Stein (Antragsteller) . . . . .	8
1.4.2	BAROID Fluid Services . . . . .	8
1.4.3	CETCO Drillings Products Group . . . . .	9
1.4.4	CIBA Sepciality Chemicals . . . . .	9
1.4.5	CONDAT . . . . .	9
1.4.6	DEGUSSA - heute BASF Construction Polymers GmbH . . . . .	10
1.4.7	IBECO - heute S+B Industrial Minerals GmbH . . . . .	10
1.4.8	PHRIKOLAT Drilling Specialities GmbH . . . . .	10
1.4.9	SÜD-CHEMIE AG . . . . .	11
1.4.10	Dow Wolf Cellulosics . . . . .	11
1.4.11	Centerline GmbH . . . . .	12
1.4.12	edm - Büro für angewandte Geophysik und Probenahmetechnik . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Bentonitsuspensionen</b>	<b>13</b>
2.1	Zusammensetzung und Struktur von Bentonit . . . . .	14
2.2	Herstellung von Bentonitsuspensionen . . . . .	16
2.3	Rheologische Eigenschaften von Bentonitsuspensionen . . . . .	17
2.3.1	Quellverhalten . . . . .	18
2.3.2	Thixotropie . . . . .	20
2.3.3	Fließverhalten . . . . .	20
2.4	Bestimmung der Eigenschaften von Bentonitsuspensionen . . . . .	23

---

2.4.1	Dichte . . . . .	24
2.4.2	Stabilität . . . . .	24
2.4.3	Fließgrenze . . . . .	27
2.4.4	Viskosität . . . . .	31
2.4.5	Gelstärke . . . . .	32
2.4.6	pH-Wert . . . . .	34
2.4.7	Eigenschaftsbestimmung mittels Marsh-Trichter . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Polymere</b>	<b>37</b>
3.1	Definition und Entstehung . . . . .	37
3.2	Polymerarten . . . . .	40
3.3	Polymere als chemisch aktive Additive . . . . .	41
3.3.1	Viskositätsregulierer . . . . .	41
3.3.1.1	Stärke . . . . .	42
3.3.1.2	Xanthan Gum . . . . .	44
3.3.1.3	Guar Gum . . . . .	44
3.3.1.4	Modifizierte Zellulosen (MEC, HEC, CMC) . . . . .	45
3.3.1.5	Synthetische Polymere . . . . .	47
3.3.2	Filtratreduzierer . . . . .	48
3.3.3	Verflüssiger . . . . .	48
3.4	Polymere als chemisch nicht aktive Additive . . . . .	49
3.4.1	Stopfmittel . . . . .	49
3.4.2	Beschwerungsstoffe . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Bestimmung der Suspensionseigenschaften</b>	<b>51</b>
4.1	Versuchsprogramm zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften . . . . .	53
4.2	Herstellung der Bentonitsuspensionen . . . . .	55
4.3	Ermittlung der Suspensionseigenschaften . . . . .	55
4.3.1	Bestimmung der Dichte . . . . .	56
4.3.2	Bestimmung der Filtratverluste (Stabilität) . . . . .	56
4.3.3	Bestimmung der Fließgrenze . . . . .	57
4.3.4	Bestimmung der Viskosität . . . . .	58
4.3.5	Bestimmung der Gelstärke . . . . .	59
4.4	Ergebnisse der ermittelten Suspensionseigenschaften . . . . .	60
4.4.1	Eigenschaften der reinen Bentonitsuspensionen . . . . .	60

4.4.1.1	Calcium-Bentonit IBECO . . . . .	60
4.4.1.2	Natrium-Bentonit IBECO . . . . .	60
4.4.1.3	HT-X Ibeco . . . . .	60
4.4.1.4	B1 Ibeco . . . . .	61
4.4.1.5	B2 Ibeco . . . . .	61
4.4.1.6	W Phrikolat . . . . .	61
4.4.1.7	W plus Phrikolat . . . . .	61
4.4.1.8	Wyoming Benonit Phrikolat . . . . .	61
4.4.1.9	Tunnelgel plus Baroid . . . . .	61
4.4.1.10	Bentonil XR Süd-Chemie . . . . .	62
4.4.1.11	Bentonil CF Süd-Chemie . . . . .	62
4.4.1.12	Tixoton C2 Süd-Chemie . . . . .	62
4.4.1.13	Tixoton C7S Süd-Chemie . . . . .	62
4.4.1.14	Super Gel X Cetco . . . . .	62
4.4.1.15	Hydraul EZ Cetco . . . . .	62
4.4.2	Eigenschaften der durch Zugabe von Polymeren modifizierten Bentonitsuspensionen . . . . .	71
4.4.2.1	Reine Polymere in Kombination mit der Basissuspension B2 . . . . .	71
4.4.2.2	Phrikolat Produkte . . . . .	74
4.4.2.3	Condat Polymere . . . . .	77
4.4.2.4	Baroid Produkte . . . . .	80
4.4.2.5	Cetco Produkte . . . . .	82
4.4.2.6	Ciba Specialities Polymere . . . . .	84
4.4.2.7	Degussa/Basf Polymere . . . . .	86
4.4.2.8	Süd-Chemie Produkte . . . . .	89
4.4.2.9	Wolf Cellulosics Polymere . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Ringspaltinjektion</b>	<b>93</b>
5.1	Injizierbarkeit von nichtbindigem Lockergestein . . . . .	95
5.1.1	Beurteilung der Injizierbarkeit nach der Kornverteilung . . . . .	95
5.1.2	Beurteilung der Injizierbarkeit nach der Durchlässigkeit . . . . .	96
5.1.3	Beurteilung der Injizierbarkeit nach der Porengeometrie . . . . .	96
5.2	Stützmechanismen von Bentonitsuspensionen im nichtbindigen Lockergestein	99
5.2.1	Stützdruckübertragung bei vollständiger Filterkuchenbildung . . . . .	100

---

5.2.2	Stützdruckübertragung bei reiner Eindringung . . . . .	100
5.2.3	Stützdruckübertragung bei unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung . . . . .	102
5.3	Fließvorgänge im nichtbindigen Lockergestein . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Kleinformatige Injektionsversuche zur Ermittlung der Einsatzbereiche und -grenzen von Bentonitsuspensionen</b>	<b>106</b>
6.1	Eigenschaften der Versuchsböden . . . . .	107
6.1.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung . . . . .	107
6.1.1.1	Sand 0: 0,2 - 1 mm . . . . .	109
6.1.1.2	Sand A: 1 - 2 mm . . . . .	109
6.1.1.3	Sand B: 2 - 4 mm . . . . .	110
6.1.1.4	Sand C: 4 - 8 mm . . . . .	110
6.1.1.5	Sand D: 8 - 16 mm . . . . .	111
6.1.1.6	Sand E: 16 - 25 mm . . . . .	112
6.1.2	Bestimmung der Dichte bei lockerer und dichter Lagerung . . . . .	112
6.1.2.1	Sand 0: 0,2 - 1 mm . . . . .	112
6.1.2.2	Sand A: 1 - 2 mm . . . . .	114
6.1.2.3	Sand B: 2 - 4 mm . . . . .	114
6.1.2.4	Sand C: 4 - 8 mm . . . . .	115
6.1.2.5	Sand D: 8 - 16 mm . . . . .	116
6.1.2.6	Sand E: 16 - 25 mm . . . . .	116
6.1.2.7	Bestimmung der Durchlässigkeit . . . . .	117
6.2	Aufbau und Durchführung der Injektionsversuche . . . . .	119
6.3	Versuchsprogramm der kleinformatigen Injektionsversuche . . . . .	125
6.4	Auswertung der Injektionsergebnisse . . . . .	129
6.4.1	Exemplarische Auswertung Calcium-Bentonit (Ibeco) . . . . .	130
6.4.2	Reine Polymerprodukte in Kombination mit der Basis- Bentonitsuspension B2 . . . . .	133
6.4.2.1	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Stärke 0,5 Prozent . . . . .	133
6.4.2.2	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit CMC 0,25 Prozent und 0,5 Prozent	133
6.4.2.3	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit PAC 0,075 Prozent, 0,15 Prozent und 0,3 Prozent . . . . .	134
6.4.2.4	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Guar Gum 0,25 Prozent, 0,5 Prozent und 0,75 Prozent . . . . .	134

---

6.4.2.5	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Xanthan Gum 0,5 Prozent und 1 Prozent . . . . .	135
6.4.3	Baroid Produkte . . . . .	136
6.4.3.1	Tunnelgel plus 2,5 Prozent, 3 Prozent, 4 Prozent . . . . .	136
6.4.3.2	Tunnelgel plus 2,5 Prozent mit No Sag 0,08 Prozent und 0,16 Prozent . . . . .	136
6.4.3.3	Tunnelgel plus 2,5 Prozent mit Quik Trol 0,12 Prozent . . . . .	137
6.4.3.4	Tunnelgel plus 3 Prozent mit Diamond Seal 1,2 Prozent und 2,4 Prozent . . . . .	137
6.4.3.5	Tunnelgel plus 3 Prozent mit N-Seal 2 Prozent und 4 Prozent	138
6.4.4	Cetco Produkte . . . . .	139
6.4.4.1	Super Gel X 2,5 Prozent, 3 Prozent, 4 Prozent . . . . .	139
6.4.4.2	Super Gel X 2,5 Prozent mit Rel PAC 0,06 Prozent und 0,24 Prozent . . . . .	139
6.4.4.3	Super Gel X 2,5 Prozent mit Suspend IT mit 0,06 Prozent und 0,24 Prozent . . . . .	140
6.4.4.4	Hydraul EZ 2,5 Prozent, 3 Prozent, 3,5 Prozent und 4 Prozent . . . . .	141
6.4.5	Ciba Specialities Produkte . . . . .	142
6.4.5.1	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Alcomer 507 0,25 Prozent . . . . .	142
6.4.5.2	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Alcomer 1771 0,05 Prozent und 0,1 Prozent . . . . .	142
6.4.6	Condat Produkte . . . . .	143
6.4.6.1	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Visco 2 0,1 Prozent, 0,2 Prozent und 0,3 Prozent . . . . .	143
6.4.6.2	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit VI34 0,1 Prozent und 0,25 Prozent	143
6.4.6.3	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit F11 1 Prozent und 3 Prozent . . . . .	144
6.4.6.4	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Visco M 0,1 Prozent . . . . .	144
6.4.6.5	Visco M 0,25 Prozent und 0,5 Prozent . . . . .	145
6.4.7	Degussa/Basf Produkte . . . . .	146
6.4.7.1	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Polydrill 0,3 Prozent und 1 Prozent	146
6.4.7.2	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Biovis 0,15 Prozent und 0,75 Prozent . . . . .	146
6.4.7.3	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Bioflow 0,2 Prozent, 0,75 Prozent und 1,5 Prozent . . . . .	147
6.4.7.4	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Polyvis II 0,2 Prozent und 0,4 Prozent . . . . .	147

---

6.4.8	Ibeco Produkte . . . . .	148
6.4.8.1	Natrium-Bentonit 12 Prozent . . . . .	148
6.4.8.2	Calcium-Bentonit 14 Prozent und 16 Prozent . . . . .	148
6.4.8.3	B1 6 Prozent, 8 Prozent und 10 Prozent . . . . .	149
6.4.8.4	B2 8 Prozent und 10 Prozent . . . . .	149
6.4.8.5	HT-X 6 Prozent, 8 Prozent und 10 Prozent . . . . .	150
6.4.8.6	HT-X Spezial 3 Prozent, 3,5 Prozent, 4 Prozent und 4,5 Prozent . . . . .	151
6.4.9	Phrikolat Produkte . . . . .	152
6.4.9.1	Wyoming Bentonit 8 Prozent, 10 Prozent, 12 Prozent und 14 Prozent . . . . .	152
6.4.9.2	Wplus 3,5 Prozent und 4 Prozent . . . . .	152
6.4.9.3	W 3 Prozent und 4 Prozent . . . . .	153
6.4.9.4	W 3 Prozent mit Modipol 600 0,075 Prozent und 0,15 Prozent . . . . .	153
6.4.9.5	W 3 Prozent mit Filter Control 0,2 Prozent und 0,4 Prozent	154
6.4.9.6	W 3 Prozent mit Modiflux 230 0,5 Prozent . . . . .	154
6.4.9.7	W 3 Prozent mit Modivis 800 0,2 Prozent . . . . .	155
6.4.10	Süd-Chemie Produkte . . . . .	156
6.4.10.1	Bentonil XR 3 Prozent und 4 Prozent . . . . .	156
6.4.10.2	Bentonil CF 5 Prozent, 6 Prozent und 8 Prozent . . . . .	156
6.4.10.3	Tixoton C2 4 Prozent, 4,5 Prozent und 5 Prozent . . . . .	157
6.4.10.4	Tixoton C7s 3,5 Prozent und 4 Prozent . . . . .	158
6.4.10.5	Bentonil XR 3 Prozent mit SC Mud 0,1 Prozent und 0,2 Prozent . . . . .	158
6.4.10.6	Tixoton C2 4 Prozent mit SC Mud 0,1 Prozent und 0,2 Prozent . . . . .	159
6.4.10.7	Bentonil XR 3 Prozent mit SC Vis 0,1 Prozent und 0,2 Prozent . . . . .	159
6.4.10.8	Tixoton C2 4 Prozent mit SC Vis 0,1 Prozent und 0,2 Prozent . . . . .	160
6.4.11	Wolf Cellulosics Produkte . . . . .	161
6.4.11.1	B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Antisol 30000 0,1 Prozent und 0,2 Prozent . . . . .	161

---

<b>7</b>	<b>Großformatige Versuche zur Simulation der Ringspaltstützung</b>	<b>162</b>
7.1	Aufbau des großformatigen Versuchsstands . . . . .	163
7.2	Untersuchungsprogramm des großformatigen Versuchsstands . . . . .	167
7.2.1	Bestimmung der Suspensionseigenschaften . . . . .	168
7.2.2	Bodeneigenschaften . . . . .	168
7.2.3	Aufzeichnung von Injektionsdruck und -menge . . . . .	168
7.2.4	Aufzeichnung des Zugkraftverlaufs . . . . .	170
7.2.5	Setzungsmessung - optisch . . . . .	171
7.2.6	Erfassung der Eindringtiefe - optisch . . . . .	172
7.2.7	Erfassung der Eindringtiefe - Georadar-Verfahren . . . . .	173
7.2.7.1	Messprinzip . . . . .	173
7.2.7.2	Durchführung der Messungen . . . . .	176
7.2.7.3	Messergebnisse . . . . .	178
7.3	Ergebnisse der großformatigen Modellversuche . . . . .	180
7.3.1	Großversuch 1 . . . . .	180
7.3.1.1	Suspensionseigenschaften . . . . .	180
7.3.1.2	Bodeneigenschaften . . . . .	180
7.3.1.3	Injektionsmesswerte . . . . .	181
7.3.1.4	Zugkraftverlauf . . . . .	182
7.3.1.5	Setzungsmessung - optisch . . . . .	182
7.3.1.6	Erfassung der Eindringtiefe - optisch . . . . .	183
7.3.1.7	Erfassung der Eindringtiefe - Georadar . . . . .	185
7.3.2	Großversuch 2 . . . . .	187
7.3.2.1	Suspensionseigenschaften . . . . .	187
7.3.2.2	Bodeneigenschaften . . . . .	188
7.3.2.3	Injektionsmesswerte . . . . .	189
7.3.2.4	Zugkraftverlauf . . . . .	189
7.3.2.5	Setzungsmessung - optisch . . . . .	190
7.3.2.6	Erfassung der Eindringtiefe - optisch . . . . .	190
7.3.2.7	Erfassung der Eindringtiefe - Georadar . . . . .	192
7.3.3	Großversuch 3 . . . . .	195
7.3.3.1	Suspensionseigenschaften . . . . .	195
7.3.3.2	Bodeneigenschaften . . . . .	196
7.3.3.3	Injektionsmesswerte . . . . .	196

---

7.3.3.4	Zugkraftverlauf . . . . .	196
7.3.3.5	Setzungsmessung - optisch . . . . .	197
7.3.3.6	Erfassung der Eindringtiefe - optisch . . . . .	197
7.3.3.7	Erfassung der Eindringtiefe - Georadar . . . . .	199
7.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	201
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>203</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Eindringwiderstand PE und Reibungswiderstände R beim Rohrvortrieb [Stein 2003] . . . . .	1
1.2	Automatisches Schmiersystem des Herstellers Herrenknecht [Herrenknecht AG 2003] . . . . .	3
2.1	Blättchenförmiger Montmorillonit, Wyoming [Jasmund u. Lagaly 1993] . .	13
2.2	Verschiedene Bentonite: a) Calciumbentonit b) Aktivbentonit [Tonmehl 2002]	14
2.3	Schematische Darstellung Silizium-Tetraeder [] . . . . .	15
2.4	chematische Darstellung Aluminium-Oktaeder [] . . . . .	15
2.5	Quellvorgang eines Montmorillonitkristalls [Pulsfort u. Walz 2000] . . . . .	18
2.6	Ladungsverteilung eines Montmorillonitkristalls . . . . .	19
2.7	Kartenhausstruktur . . . . .	19
2.8	Zeitlicher Verlauf der thixotropen Verfestigung [DIN 4127 1986] . . . . .	21
2.9	Fließkurventypen: A: newtonsches Fließen; B: plastisches Fließen mit Fließgrenze; C: pseudoplastisches Fließen, D: dilatantes Fließen [Ziesmer 2002] .	22
2.10	Fließkurve einer Bentonitsuspension [Möbius 1977] . . . . .	23
2.11	Schematische Darstellung einer Spülungswaage [15] . . . . .	24
2.12	Stabile Suspension: Bentonitpartikel sind im Wasser gleichmäßig verteilt .	25
2.13	Entmischungsarten einer Suspension: Sedimentation (links), Konsolidation (Mitte), Filtration (rechts) . . . . .	25
2.14	Sedimentation im Standzylinder [Walz 2000] . . . . .	26
2.15	Schematische Darstellung einer Filterpresse [Walz 2000] . . . . .	26
2.16	Schematische Darstellung eines Pendelgerätes [DIN 4126-100 1996] . . . . .	28
2.17	Kugelharfe [Leutert 2007] . . . . .	29
2.18	Rotationsviskosimeter [Phrikolat 2007] . . . . .	29
2.19	Fliesskurve einer Bentonitsuspension [Elbe 2003] . . . . .	30
2.20	Shearometer . . . . .	33

---

2.21	Zusammenhang zwischen Gelstärke (Shearometer) und Fließgrenze [Rupert 1980] . . . . .	33
2.22	pH - Indikatorstäbchen [Phrikolat 2007] . . . . .	34
2.23	Schematische Darstellung des Marsh-Trichters [DIN 4126-100 1996] . . . . .	35
2.24	Bestimmung der dynamischen Fließgrenze $dyn\tau_F$ und der differentiellen Viskosität $\eta'$ mit dem Marsh-Trichter [DIN 4126-100 1996] . . . . .	36
3.1	Polymerformen: links: linear, Mitte: verzweigt, rechts: vernetzt . . . . .	38
3.2	Heteropolymerformen: links: Block, Mitte: zufällig, rechts: Pfropf . . . . .	39
3.3	Polykondensation . . . . .	39
3.4	Polyaddition . . . . .	39
3.5	Polyaddition und Polykondensation . . . . .	40
3.6	Glukosemolekül in der Ringformation . . . . .	42
3.7	Amylose als Bestandteil der Stärke . . . . .	43
3.8	Amylopektin als Bestandteil der Stärke . . . . .	43
3.9	Struktur von Xanthan Gum . . . . .	44
3.10	Struktur des Guaran als Bestandteil von Guar Gum . . . . .	45
3.11	Aufbau der Zellulose . . . . .	45
3.12	Strukturformel von Hydroxyethylzellulose (HEC) . . . . .	46
3.13	Strukturformel von Natrium-Carboxymethylzellulose mit einer Substitution . . . . .	46
3.14	Beispiele für synthetische polyacrylamid Polymeren: A) Polyacrylamid B) Polyvinylalkohol C) Polyvinylpyrrolidon D) Polyvinylmethylether . . . . .	47
3.15	Natriumacrylamid . . . . .	47
4.1	Versuchsprogramm Suspensionseigenschaften: Bentonitsuspensionen . . . . .	53
4.2	Versuchsprogramm Suspensionseigenschaften: Bentonitsuspensionen modifiziert mit Polymeren . . . . .	54
4.3	Dispergiergerät Ultra-Turrax . . . . .	55
4.4	Messzylinder zur Bestimmung der Dichte . . . . .	56
4.5	Filterpresse . . . . .	57
4.6	Bestimmung der Marsh-Zeiten mit dem Marsh-Trichter . . . . .	58
4.7	Shearometer . . . . .	59
4.8	Bezeichnung der Gelstärken aus unterschiedlichen Messverfahren . . . . .	60
4.9	Messergebnisse Calcium-Bentonit von Ibeco . . . . .	63
4.10	Messergebnisse Natrium-Bentonit von Ibeco . . . . .	63
4.11	Messergebnisse Bentonit HT-X von Ibeco . . . . .	64

---

4.12	Messergebnisse Bentonit B1 von Ibeco . . . . .	64
4.13	Messergebnisse Bentonit B2 von Ibeco . . . . .	65
4.14	Messergebnisse Bentonit W von Phrikolat . . . . .	65
4.15	Messergebnisse Bentonit W plus von Phrikolat . . . . .	66
4.16	Messergebnisse Wyoming-Bentonit von Phrikolat . . . . .	66
4.17	Messergebnisse Bentonit Tunnelgel Plus von Baroid . . . . .	67
4.18	Messergebnisse Bentonit Bentonil XR von Süd-Chemie . . . . .	67
4.19	Messergebnisse Bentonit Bentonil CF von Süd-Chemie . . . . .	68
4.20	Messergebnisse Bentonit Tixoton C2 von Süd-Chemie . . . . .	68
4.21	Messergebnisse Bentonit Tixoton C7S von Süd-Chemie . . . . .	69
4.22	Messergebnisse Bentonit Super Gel X von Cetco . . . . .	69
4.23	Messergebnisse Bentonit Hydraul EZ von Cetco . . . . .	70
4.24	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und CMC . . . . .	71
4.25	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und PAC . . . . .	72
4.26	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Stärke . . . . .	72
4.27	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Xanthan Gum . . . . .	73
4.28	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Guar Gum . . . . .	73
4.29	Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Modipol 600 . . . . .	74
4.30	Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Filter Control . . . . .	75
4.31	Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Modiflux 230 . . . . .	75
4.32	Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Modivis 800/900 . . . . .	76
4.33	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und F11 . . . . .	77
4.34	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Visco 2 . . . . .	78
4.35	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und VI34 . . . . .	78
4.36	Messergebnisse Visco M als reine Polymerlösung . . . . .	79
4.37	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Visco M . . . . .	79
4.38	Messergebnisse Bentonit Baroid Tunnelgel plus 2,5 Prozent und No-Sag . . . . .	80
4.39	Messergebnisse Bentonit Baroid Tunnelgel plus 2,5 Prozent und Quick Trol . . . . .	81
4.40	Messergebnisse Bentonit Cetco Super Gel X 2,5 Prozent und Rel PAC . . . . .	82
4.41	Messergebnisse Bentonit Cetco Super Gel X 2,5 Prozent und Suspend IT . . . . .	83
4.42	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Alcomer 507 . . . . .	84
4.43	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Alcomer 1771 . . . . .	85
4.44	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Polydrill . . . . .	86
4.45	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Biovis . . . . .	87

---

4.46	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Bioflow . . . . .	87
4.47	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Polyvis II . . . . .	88
4.48	Messergebnisse Bentonit Bentonil XR 3 Prozent und SC Mud P . . . . .	89
4.49	Messergebnisse Bentonit Bentonil XR 3 Prozent und SC Vis . . . . .	90
4.50	Messergebnisse Bentonit Tixoton C2 4 Prozent und SC Mud P . . . . .	90
4.51	Messergebnisse Bentonit Tixoton C2 4 Prozent und SC Vis . . . . .	91
4.52	Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Antisol 30.000 . . . . .	92
5.1	Automatisches Schmiersystem des Herstellers Herrenknecht [Herrenknecht AG 2003] . . . . .	94
5.2	Einsatzgrenzen der Injektionsmittel in Abhängigkeit der Korngrößenvertei- lung [Perbix u. Teichert 1995] . . . . .	95
5.3	Eindringfähigkeit von Injektionsgut in Lockergestein nach der Durchlässig- keit des Bodens und der Korngröße des Injektionsmittels [Cambefort 1969]	96
5.4	Porengrößenbereiche [Semrich u. Stadler 2001] . . . . .	97
5.5	Ebener Schnitt durch eine Porenengstelle [Schulze 1993] . . . . .	97
5.6	Ermittlung der Porenengstellenverteilung aus der Körnungskurve [Schulze 1993] . . . . .	98
5.7	Porenengstellenverteilungen verschiedener Böden [Schulze 1993] . . . . .	99
5.8	Schematische Darstellung der Filterkuchenbildung [Kilchert u. Karstedt 1984]	100
5.9	Schematische Darstellung der Eindringung [Kilchert u. Karstedt 1984] . . .	101
5.10	Eindringtiefen von Bentonisuspensionen [Ibeco 1998] . . . . .	102
5.11	Wechsel des Fließens von Kugel- zu Zylinderform [Donel 1990] . . . . .	103
5.12	Einfluss der Porengröße auf den Injektionskörper [Donel 1990] . . . . .	103
5.13	Druck-Mengen-Grafik für verschiedene k-Werte [Donel 1990] . . . . .	105
6.1	Kleinformatiger Injektionsstand . . . . .	106
6.2	Übersicht der untersuchten Böden . . . . .	108
6.3	Körnungslinie Sand 0, Sand A - Sand E . . . . .	108
6.4	Sieblinienbestimmung Sand 0 . . . . .	108
6.5	Sieblinienbestimmung Sand A . . . . .	109
6.6	Sieblinienbestimmung Sand B . . . . .	110
6.7	Sieblinienbestimmung Sand C . . . . .	111
6.8	Sieblinienbestimmung Sand D . . . . .	111
6.9	Sieblinienbestimmung Sand E . . . . .	112
6.10	Übersicht Lagerungsdichte Sand 0, A, B, C, D und E . . . . .	113

---

6.11	Lockerste Lagerung Sand 0 . . . . .	113
6.12	Dichteste Lagerung Sand 0 . . . . .	113
6.13	Lockerste Lagerung Sand A . . . . .	114
6.14	Dichteste Lagerung Sand A . . . . .	114
6.15	Lockerste Lagerung Sand B . . . . .	114
6.16	Dichteste Lagerung Sand B . . . . .	115
6.17	Lockerste Lagerung Sand C . . . . .	115
6.18	Dichteste Lagerung Sand C . . . . .	115
6.19	Lockerste Lagerung Sand D . . . . .	116
6.20	Dichteste Lagerung Sand D . . . . .	116
6.21	Lockerste Lagerung Sand 0 . . . . .	117
6.22	Dichteste Lagerung Sand E . . . . .	117
6.23	Auswertung K-Wert für Sand A bis Sand D . . . . .	118
6.24	Plexiglaszylinder . . . . .	119
6.25	Deckel Plexiglaszylinder . . . . .	119
6.26	Anschluss Schlauch - Zylinder mit geöffnetem Ventil . . . . .	120
6.27	Schlauchpumpe . . . . .	121
6.28	Doppel-Plungerpumpe . . . . .	121
6.29	Beispiel Druckverlauf aus der Injektion mit der Schlauchpumpe . . . . .	122
6.30	Beispiel Druckverlauf aus der Injektion mit der Plungerpumpe . . . . .	123
6.31	CAD - Darstellung Abstandhalter . . . . .	124
6.32	Befüllte und in den Versuchsstand eingebaute Plexiplaszylinder . . . . .	125
6.33	Versuchsprogramm kleinformatige Injektionsversuche . . . . .	127
6.34	Fortsetzung: Versuchsprogramm kleinformatige Injektionsversuche . . . . .	128
6.35	Beispiel zur Auswertung der gemessenen Versuchsdaten . . . . .	129
6.36	Beispiel Calcium-Bentonit 14 Prozent: Ergebnisse des Injektionsversuches .	130
6.37	Beispiel: Calcium-Bentonit 14 Prozent, Druckverlauf, Sand 0 und Sand A mit 1 l/m . . . . .	131
6.38	Beispiel: Calcium-Bentonit 14 Prozent, Durchflussmessung, Sand 0 und Sand A mit 1 l/min . . . . .	132
6.39	Injektionsergebnisse: Stärke . . . . .	133
6.40	Einsatzbereiche: Stärke . . . . .	133
6.41	Injektionsergebnisse: CMC . . . . .	133
6.42	Einsatzbereiche: CMC . . . . .	133

---

6.43	Injektionsergebnisse: PAC . . . . .	134
6.44	Einsatzbereiche: PAC . . . . .	134
6.45	Injektionsergebnisse: Guar Gum . . . . .	134
6.46	Einsatzbereiche: Guar Gum . . . . .	135
6.47	Injektionsergebnisse: Xanthan Gum . . . . .	135
6.48	Einsatzbereiche: Xanthan Gum . . . . .	135
6.49	Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus . . . . .	136
6.50	Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus . . . . .	136
6.51	Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit No Sag . . . . .	136
6.52	Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit No Sag . . . . .	137
6.53	Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit Quick Trol . . . . .	137
6.54	Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit Quick Trol . . . . .	137
6.55	Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit Diamond Seal (Quellzeit 10 Minuten) . . . . .	137
6.56	Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit Diamond Seal (Quellzeit 30 Minuten) . . . . .	138
6.57	Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit Diamond Seal . . . . .	138
6.58	Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit N-Seal . . . . .	138
6.59	Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit N-Seal . . . . .	138
6.60	Injektionsergebnisse: Cetco - Super Gel X . . . . .	139
6.61	Einsatzbereiche: Cetco - Super Gel X . . . . .	139
6.62	Injektionsergebnisse: Cetco - Super Gel X mit Rel PAC . . . . .	139
6.63	Einsatzbereiche: Cetco - Super Gel X mit Rel PAC . . . . .	140
6.64	Injektionsergebnisse: Cetco - Super Gel X mit Suspend IT . . . . .	140
6.65	Einsatzbereiche: Cetco - Super Gel X mit Suspend IT . . . . .	140
6.66	Injektionsergebnisse: Cetco - Hydraul EZ . . . . .	141
6.67	Einsatzbereiche: Cetco - Hydraul EZ . . . . .	141
6.68	Injektionsergebnisse: Ciba - Alcomer 507 . . . . .	142
6.69	Einsatzbereiche: Ciba - Alcomer 507 . . . . .	142
6.70	Injektionsergebnisse: Ciba - Alcomer 1771 . . . . .	142
6.71	Einsatzbereiche: Ciba - Alcomer 1771 . . . . .	142
6.72	Injektionsergebnisse: Condat - Visco 2 . . . . .	143
6.73	Einsatzbereiche: Condat - Visco 2 . . . . .	143
6.74	Injektionsergebnisse: Condat - VI 34 . . . . .	143

---

6.75 Einsatzbereiche: Condat - VI34 . . . . .	144
6.76 Injektionsergebnisse: Condat - F 11 . . . . .	144
6.77 Einsatzbereiche: Condat - F 11 . . . . .	144
6.78 Injektionsergebnisse: Condat - B2 mit Visco M . . . . .	144
6.79 Injektionsergebnisse: Condat - Visco M . . . . .	145
6.80 Einsatzbereiche: Condat - Visco M mit und ohne Bentonit B2 . . . . .	145
6.81 Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Polydrill . . . . .	146
6.82 Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Polydrill . . . . .	146
6.83 Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Biovis . . . . .	146
6.84 Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Biovis . . . . .	146
6.85 Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Bioflow . . . . .	147
6.86 Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Bioflow . . . . .	147
6.87 Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Polyvis . . . . .	147
6.88 Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Polyvis . . . . .	147
6.89 Injektionsergebnisse: Ibeco - Natrium-Bentonit . . . . .	148
6.90 Einsatzbereiche: Ibeco - Natrium-Bentonit . . . . .	148
6.91 Injektionsergebnisse: Ibeco - Calcium-Bentonit . . . . .	148
6.92 Einsatzbereiche: Ibeco - Calcium-Bentonit . . . . .	148
6.93 Injektionsergebnisse: Ibeco - B1 . . . . .	149
6.94 Einsatzbereiche: Ibeco - B1 . . . . .	149
6.95 Injektionsergebnisse: Ibeco - B2 . . . . .	149
6.96 Einsatzbereiche: Ibeco - B2 . . . . .	150
6.97 Injektionsergebnisse: Ibeco - HT-X . . . . .	150
6.98 Einsatzbereiche: Ibeco - HT-X . . . . .	150
6.99 Injektionsergebnisse: Ibeco - HT-X spezial . . . . .	151
6.100 Einsatzbereiche: Ibeco - HT-X spezial . . . . .	151
6.101 Injektionsergebnisse: Phrikolat - Wyoming Bentonit . . . . .	152
6.102 Einsatzbereiche: Phrikolat - Wyoming Bentonit . . . . .	152
6.103 Injektionsergebnisse: Phrikolat - W plus . . . . .	152
6.104 Einsatzbereiche: Phrikolat - W plus . . . . .	153
6.105 Injektionsergebnisse: Phrikolat - W . . . . .	153
6.106 Einsatzbereiche: Phrikolat - W . . . . .	153
6.107 Injektionsergebnisse: Phrikolat - Modipol 600 . . . . .	153
6.108 Einsatzbereiche: Phrikolat - Modipol 600 . . . . .	154

---

6.109	Injektionsergebnisse: Phrikolat - Filter Control . . . . .	154
6.110	Einsatzbereiche: Phrikolat - Filter Control . . . . .	154
6.111	Injektionsergebnisse: Phrikolat - Modiflux 230 . . . . .	154
6.112	Einsatzbereiche: Phrikolat - Modiflux 230 . . . . .	155
6.113	Injektionsergebnisse: Phrikolat - Modivis 800 . . . . .	155
6.114	Einsatzbereiche: Phrikolat - Modivis 800 . . . . .	155
6.115	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Bentonil XR . . . . .	156
6.116	Einsatzbereiche: Süd-Chemie - Bentonil XR . . . . .	156
6.117	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Bentonil CF . . . . .	156
6.118	Einsatzbereiche: Süd-Chemie - Bentonil CF . . . . .	157
6.119	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Tixoton C2 . . . . .	157
6.120	Einsatzbereiche: Süd-Chemie - Tixoton C2 . . . . .	157
6.121	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Tixoton C7s . . . . .	158
6.122	Einsatzbereiche: Phrikolat - Tixoton C7s . . . . .	158
6.123	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Mud mit Bentonil XR . . . . .	158
6.124	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Mud mit Tixoton C2 . . . . .	159
6.125	Einsatzbereiche: Süd-Chemie - SC Mud . . . . .	159
6.126	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Vis mit Bentonil XR . . . . .	159
6.127	Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Vis mit Tixoton C2 . . . . .	160
6.128	Einsatzbereiche: Süd-Chemie - SC Vis . . . . .	160
6.129	Injektionsergebnisse: Wolf Cellulosics - Antisol 30000 . . . . .	161
6.130	Einsatzbereiche: Wolf Cellulosics - Antisol 30000 . . . . .	161
7.1	Schematische Darstellung des Versuchsstands . . . . .	163
7.2	Eingebautes Vortriebsrohr mit Lippendichtung an der Zugseite . . . . .	164
7.3	Schematische Darstellung des Vortriebsrohres bestehend aus zwei 3 m langen PE-Rohren mit unterschiedlichen Durchmessern . . . . .	164
7.4	Kolbenpumpe DP 63 der Firma Obermann . . . . .	165
7.5	Genereller Versuchsaufbau mit geologischem Wechsel (Startsituation) . . .	165
7.6	Einbau des nichtbindigen Lockergesteins mit geologischem Wechsel . . . . .	166
7.7	Einsatz des leichten Verdichtungsgeräts beim Einbau des nichtbindigen Lockergesteins . . . . .	166
7.8	Versuchsprogramm . . . . .	167
7.9	Bezeichnungen der Lagerungsdichte, Zuordnung zu Versuchsergebnissen bei gleichförmigen, nichtbindigen Böden über Grundwasser [Rizkallah 1995] . .	168

7.10 Steuer PC der Fa. Centerline GmbH, Wesel . . . . .	169
7.11 BSU, MSU, BCU und Durchflussmesser der Fa. Centerline GmbH, Wesel . . . . .	169
7.12 Laufrad der Fa. Centerline GmbH, Wesel, zur Erfassung des Vortriebswegs . . . . .	170
7.13 Kraftmessdose zur Erfassung der Zugkraft . . . . .	170
7.14 Referenzmessung des Zugkraftverlaufs . . . . .	171
7.15 Abziehen der Überschüttung mit einem Brett und Anzeichnen der Geländelinie . . . . .	171
7.16 Messpunkte zur Ermittlung der gesamten Schichtdicke (Eindringtiefe) bestehend aus standfestem Ringspalt und umhüllendem standfesten Lockergestein . . . . .	172
7.17 Frequenzspektrum eines zeitlimitierten Signals . . . . .	174
7.18 Darstellung des Messprinzips des Georadars . . . . .	174
7.19 Messprinzip des Georadaes mit zwei Antennen-Konfiguration . . . . .	175
7.20 Georadar-Antenne mit montiertem Kunststoffrohr zum Führen der Antenne innerhalb des Vortriebsrohres . . . . .	176
7.21 Lage und Verlauf der Georadarprofile auf 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr, ... und 12 Uhr, innerhalb des Vortriebsrohres DN 200 . . . . .	177
7.22 Lage des Nullpunktes der Georadarprofile innerhalb des Längsschnittes und der Vorderseite des Versuchsstandes . . . . .	178
7.23 Lage des definierten geologischen Wechsels innerhalb des Versuchsstandes . . . . .	179
7.24 Spektralanalytische Zuordnung der Tiefenlage erfasster Phasenverläufe innerhalb der Leitungszone . . . . .	179
7.25 Großversuch 1: Versuchsaufbau . . . . .	180
7.26 Großversuch 1: Suspensionseigenschaften B2 (neu) . . . . .	181
7.27 Großversuch 1: Ergebnisse der Rammsondierung Sand B und Sand C . . . . .	181
7.28 Großversuch 1: Aufzeichnung SDV13 . . . . .	182
7.29 Großversuch 1: Aufzeichnung des Zugkraftverlaufs . . . . .	183
7.30 Großversuch 1: Freigelegter Rohrstrang, standfester Boden um das Vortriebsrohr . . . . .	184
7.31 Großversuch 1: Optisch erfasste Eindringtiefen . . . . .	184
7.32 Großversuch 1: Messung des standfesten Bodens . . . . .	184
7.33 Großversuch 1: Ringspalt vollständig mit Bentonitsuspension gefüllt . . . . .	185
7.34 Großversuch 1: Aufzeichnung der Georadarmessungen: GPR-Profile 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr, 9 Uhr: Tiefen des mit reiner Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts . . . . .	186
7.35 Großversuch 1: 3D-Ansicht Georadarmessung: Flächenverteilung des mit reiner Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts . . . . .	186

---

7.36	Großversuch 2: Versuchsaufbau . . . . .	187
7.37	Großversuch 2: Suspensionseigenschaften . . . . .	188
7.38	Großversuch 2: Ergebnisse der Rammsondierung Sand B und Sand C . . .	188
7.39	Großversuch 2: Aufzeichnung SDV13 . . . . .	189
7.40	Großversuch 2: Aufzeichnung des Zugkraftverlaufs . . . . .	190
7.41	Großversuch 2: Bodenauszug aus dem Versuchsstand (links); Setzungen an der Oberfläche (rechts) . . . . .	190
7.42	Großversuch 2: Übergang vom feinkörnigen zum grobkörnigen Lockerge- stein erkennbar an größere Eindringtiefe der Suspension . . . . .	191
7.43	Großversuch 2: Eindringtiefen . . . . .	191
7.44	Großversuch 2: Messung des standfesten Bodens (links: Sand B; rechts: Sand C) . . . . .	192
7.45	Großversuch 2: Vollständig mit polymermodifizierter Bentonitsuspension gefüllter Ringspalt . . . . .	192
7.46	Großversuch 2: Aufzeichnung der Georadarmessungen: GPR-Profile 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr, 9 Uhr: Tiefen des mit reiner Bentonitsuspension gefüll- ten Ringspalts . . . . .	193
7.47	Großversuch 2: 3D-Ansicht Georadarmessung: Flächenverteilung des mit polymermodifizierte Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts . . . . .	194
7.48	Großversuch 3: Versuchsaufbau . . . . .	195
7.49	Großversuch 3: Suspensionseigenschaften . . . . .	196
7.50	Großversuch 3: Ergebnisse der Rammsondierung in Sand C und Sand D . .	197
7.51	Großversuch 3: Aufzeichnung SDV13 . . . . .	198
7.52	Großversuch 3: Feigelegter Rohrstrang . . . . .	198
7.53	Großversuch 3: Eindringtiefen . . . . .	198
7.54	Großversuch 3: Messung des standfesten Bodens (links: Sand D; rechts: Sand C) . . . . .	199
7.55	Großversuch 3: Mit mechanischem Stopfmittel gefüllter Ringspalt . . . . .	199
7.56	Großversuch 3: Aufzeichnung der Georadarmessungen: GPR-Profile 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr, 9 Uhr: Tiefen des mit mechanischen Stopfmitteln und Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts . . . . .	200
7.57	Großversuch 3: 3D-Ansicht Georadarmessung: Flächenverteilung des mit mechanischen Stopfmitteln und Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts . .	201

# Kapitel 1

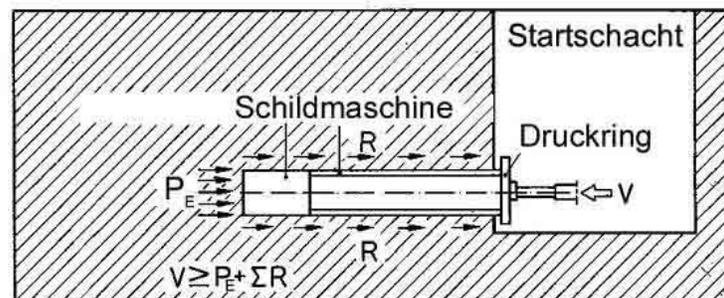
## Darstellung des Vorhabens

### 1.1 Prinzip des Rohrvortriebs

Beim Rohrvortrieb werden von einem Startschacht aus mit Hilfe einer Pressstation bzw. Hauptpressstation unter Zuhilfenahme von Zwischenpressstationen Vortriebsrohre durch den Baugrund bis in einen Zielschacht vorgetrieben. Der Vortrieb in gerader oder gekrümmter Linienführung wird dabei durch eine steuerbare Schildmaschine ermöglicht, die dem ersten Rohr vorgeschaltet ist. Das Lockergestein wird an der Ortsbrust von Hand, mechanisch teilflächig oder vollflächig abgebaut und durch den vorgetriebenen Rohrstrang nach über Tage abgefördert.

In Abhängigkeit des Außendurchmessers kommen im Werk vorgefertigte Vortriebsrohre mit Kreisringquerschnitt  $1200 \leq DN/ID \leq 4000$  oder in einer Feldfabrik vor Ort hergestellte Vortriebsrohre mit noch größerer Nennweite zur Anwendung [STEIN 2003].

Das Einpressen von Schildmaschine und Rohrstrang erfolgt mit Hilfe der von der Hauptpressstation erzeugten Vortriebskraft. Sie dient zur Überwindung des Eindringwiderstandes  $P_E$  des Bohrkopfs in den anstehenden Baugrund und der Reibungswiderstände  $R$  entlang der Mantelfläche der Schildmaschine sowie des nachfolgenden Rohrstranges im Boden, nachfolgend auch Mantelreibung genannt (vgl. Abbildung 1.1).



**Abbildung 1.1:** Eindringwiderstand  $P_E$  und Reibungswiderstände  $R$  beim Rohrvortrieb [Stein 2003]

Die Vortriebskraft ist abhängig von Bodenart, Überdeckungshöhe, Vortriebslänge, Außendurchmesser der Vortriebsrohre, Beschaffenheit der Rohraußenfläche sowie von Ausführungsdetails, wie z.B. Vortriebsgeschwindigkeit, Stützung des Erd- und ggf. Grundwasserdrucks an der Ortsbrust, Größe und Stützung des Querschnittes, Schmierung des Rohrstranges sowie der Linienführung. Die Vortriebskraft bestimmt im Zusammenhang mit der maximal zulässigen Axialbelastung der Vortriebsrohre im wesentlichen die erreichbare Vortriebslänge.

Maßgebend für die Größe der Vortriebskraft ist insbesondere bei Langstreckenvortrieben die Mantelreibung, die linear mit der Vortriebslänge anwächst. Um sie zu reduzieren, werden heute vornehmlich verfahrenstechnische Maßnahmen angewandt, wie z.B. Anordnung eines Ringspalts (Überschnitt), Einsatz von Stütz- und Gleitmitteln im Ringspalt (Schmierung durch Bentonitsuspensionen) oder Zwischenpressstationen, wobei letztere nicht Gegenstand des Forschungsprojekts sind.

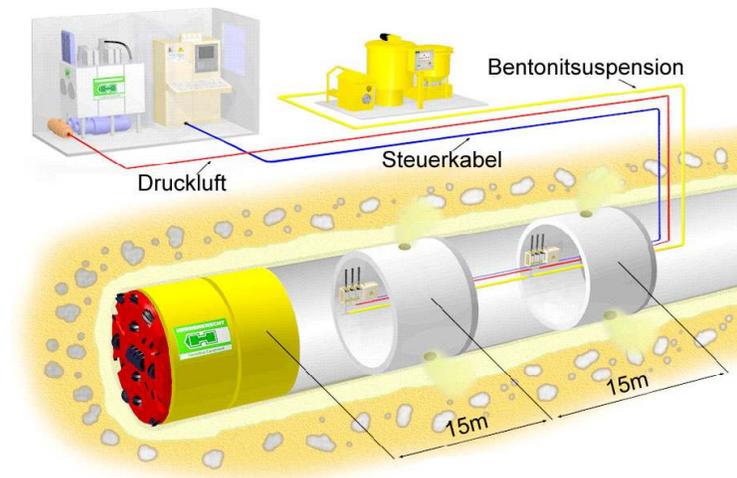
Als Ringspalt wird der Hohlraum zwischen Rohraußenwand und anstehendem Boden bezeichnet, der planmäßig durch die Verwendung eines Schildes mit größerem Außendurchmesser als dem Rohraußendurchmesser entsteht. Um eine effektive Reduzierung des Reibungswiderstands zu erzielen, sollte der Ringspalt während der Vortriebsarbeiten über die gesamte Vortriebslänge erhalten bleiben. Dies gelingt i.d.R. relativ problemlos im standfesten, homogenen Baugrund.

Im nichtstandfesten Baugrund und insbesondere bei Langstreckenvortrieben wird immer ein Stütz- und Gleitmittel in Form einer Bentonitsuspension in den Ringspalt eingepresst bzw. injiziert, um den Hohlraum zu stützen und einen durchgehenden Schmierfilm zu erzeugen, in dem der Rohrstrang im Idealfall schwebt. In der Funktion als Gleitmittel dient die eingesetzte Suspension zur Verminderung der Mantelreibung am Umfang des Rohrstranges und der Vortriebsmaschine; als Stützmittel dient sie zur Stützung des Ringspalts [STEIN 2003].

Die Ringspaltinjektion erfolgt im laufenden Vortrieb über das automatische Einpressen über Injektionsstutzen im Rohrstrang (Abbildung 1.2). Die Injektion wird zeit-, volumen- oder druckabhängig automatisch durch gezieltes Ansteuern der einzelnen Schmierstationen und Injektionsstutzen durchgeführt. Die Injektionsbedingungen werden in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers, der Vortriebslänge sowie der geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen vom Maschinenführer am PC des Steuerstandes vorgenommen und können jederzeit geändert werden [STEIN 2003].

## 1.2 Problemstellung

Der vorgenannte Idealfall wird in der Praxis aufgrund der Heterogenität des Baugrundes äußerst selten erreicht. Einerseits gibt es zur Zeit kein Stütz- und Gleitmittel (Bentonitsuspension), das unabhängig von Bodenart (insb. Korngrößenverteilung und Wasserdurchlässigkeit), Standfestigkeit des Bohrloches und Vortriebsdauer generell eingesetzt werden kann, und andererseits keine technische Möglichkeit, partiell auf wechselnde geologische Randbedingungen durch Injektion eines jeweils geeigneten Stütz- und Gleitmittels zu reagieren.



**Abbildung 1.2:** Automatisches Schmierystem des Herstellers Herrenknecht [Herrenknecht AG 2003]

Die Verbesserung dieser aktuellen Situation, d.h. die durch die gezielte Injektion von an die jeweiligen Anforderungen optimal angepassten Stütz- und Gleitmitteln (Bentonitsuspension) in den Ringspalt erreichbare, effektive Reduktion der Mantelreibung über die gesamte Vortriebsstrecke, generiert einerseits eine erhebliche Minderung des Risikopotentials bei der Durchführung von Rohrvortrieben und andererseits immense Einsparpotentiale hinsichtlich der Vortriebszeit und Vortriebskosten durch:

- Steigerung der von einem Startschacht aus erreichbaren Vortriebslänge bei gleichzeitiger Reduzierung der erforderlichen Anzahl der kostenintensiven Start- und Zielschächte für die gesamte Baumaßnahme.
- Reduzierung der Anzahl von Zwischenpresstationen (ZPS) unter Einsparung der zusätzlichen Kosten für Einbau und Vorhaltung der erforderlichen Anlagenteile bei gleichzeitiger Steigerung der Vortriebsleistung durch Reduzierung der Anzahl der taktweise vorzupressenden Rohrstrangabschnitte (Anmerkung: ein Vortrieb mit ZPS benötigt ca. 40% mehr Zeit als ein Vortrieb ohne ZPS über die gleiche Vortriebslänge).
- Reduzierung der Anzahl an Schmierstationen im Rohrstrang durch Vergrößerung ihres Abstandes mit Kosteneinsparungen für Vorhaltung, Einbau und Betrieb der Anlagen

Die Probleme der bestehenden Verfahrenstechnik zur Ringspaltstützung bei Rohrvortrieben sind gekennzeichnet durch folgende Umstände:

- A Die Modifizierung von als Stütz- und Gleitmitteln eingesetzten Bentonitsuspensionen mit Hilfe von Additiven und insbesondere Polymeren ist im wesentlichen von der

Erfahrung der auf der Baustelle tätigen Fachkräfte abhängig. Es gibt zwar entsprechende Regelwerke zum Einsatz von Polymeren, wie z.B. das Merkblatt W 116 des DVGW *Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser* (04.1998) mit entsprechenden Dosierungsempfehlungen für die jeweilige Rezeptur, doch aufgrund der großen Bandbreite an verfügbaren Polymerarten mit unterschiedlichen Wirkungsweisen sind diese jedoch eher als allgemeingültige Handlungsempfehlungen zu betrachten. Für den spezifischen Anwendungsfall werden daher in der Praxis i.d.R. eigene Versuche zur Identifizierung geeigneter, modifizierter Bentonitsuspensionen durchgeführt bzw. selbst formulierte Bentonitsuspensionen eingesetzt. Hierbei besteht allerdings die Gefahr, dass Kombinationen mehrerer Polymere zu unerwünschten Reaktionen führen können [Darley u. Gray 1988] und die gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen keinen Eingang in die Fachwelt finden.

- B Die derzeit eingesetzten automatischen Schmier-systeme injizieren über im Rohrstrang integrierte Schmierstationen kontinuierlich die vorab festgelegte Bentonitsuspension in den Ringspalt. Dabei sind Injektionsmittelmengen und -drücke für jede Schmierstation individuell einstellbar. Da jedoch alle Schmierstationen von einer einzigen, im Bereich des Startschachtes installierten Mischstation aus mit der Bentonitsuspension über einen geschlossenen Kreislauf versorgt werden, ist es nicht möglich, an den einzelnen Schmierstationen entlang der Vortriebstrasse auf wechselnde geologische Situationen mit unterschiedlichen und speziell für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Bentonitsuspension zu reagieren. Somit kann eine erfolgreiche Stütz- und Schmierwirkung nur in Teilbereichen des Rohrstrangs erzielt werden.
- C In rolligen, kiesigen Böden besteht darüber hinaus die Gefahr, dass der aufgefahrene Ringspalt direkt hinter dem Schildschwanz, d.h. bei Freigabe des Ringspalts im hinteren Teil der Schildmaschine, über dem Rohrstrang zusammenbricht. In diesem Fall gibt es keine Möglichkeiten, diesen wieder herzustellen. Der dadurch bedingte sprunghafte Anstieg der Mantelreibung erhöht die Gefahr des Festfahrens des Vortriebs beträchtlich.

### 1.3 Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel des Forschungsprojekts ist es, die theoretischen und praktischen Grundlagen zu schaffen, die im Rohrvortrieb Tätigen bei der Wahl des Stütz- und Gleitmittels fachlich zu unterstützen. Bei der Durchführung von Vortriebsmaßnahmen kann der nicht standfeste Baugrund (insbesondere nichtbindiges Lockergestein) durch die Injektion geeigneter Stütz- und Gleitmittel in Form von Bentonitsuspensionen in den Ringspalt verbessert werden. Die Bodenverbesserung bezieht sich im Zusammenhang mit einer effektiven Ringspaltstützung auf

- eine **Erhöhung** der temporären, d.h. zumindest für die Dauer des Vortriebs wirkenden, **Standfestigkeit** des aufgefahrenen Hohlraums (Ringspalt) sowie

- auf eine **Verringerung** der **Durchlässigkeit** des Bodens gegenüber der eingesetzten Bentonitsuspension.

Die Auswahl geeigneter Bentonitsuspensionen zur Ringspaltstützung für eine Vortriebsmaßnahme basiert auf den im Rahmen des Bodengutachtens verifizierten Parametern des anstehenden Baugrunds, wie z.B. Bodenart, Sieblinie und Durchlässigkeit, und liegt in der Verantwortung des Bauausführenden. Dazu sind erweiterte Kenntnisse der geologischen und hydrogeologischen Grundlagen sowie der fachgerechten Herstellung und Verwendung von Bentonitsuspensionen auch unter Einsatz von Polymeren erforderlich.

Da auf dem deutschen Markt eine Vielzahl von Bentonit- und Polymerprodukten zur Verfügung steht, ist es für den Einzelnen schwierig, sich fachlich umfassend zu informieren. Diese Lücke soll durch das vorliegende Forschungsprojekt geschlossen werden, indem

- die theoretischen Grundlagen über die Eigenschaften und das Verhalten von Bentoniten und Polymeren zusammengefasst werden,
- die auf dem deutschen Markt erhältlichen Bentonit- und Polymerprodukte vorgestellt werden,
- die Suspensionseigenschaften der jeweiligen Produkte und Produktkombinationen systematisch untersucht und zusammengefasst werden,
- die Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen der Suspensionen im nichtbindigen Lockergestein (definiert über Bodenart, Sieblinie und Durchlässigkeitsbeiwert) untersucht und aufgezeigt werden sowie
- der Nachweis erbracht wird, dass bei Auswahl einer auf das anstehende nichtbindige Lockergestein angepassten Bentonitsuspension der Ringspalt effektiv gestützt werden kann.

Die Ergebnisse werden in Arbeitshilfen für die Rohrvortriebsbaustelle zusammengefasst und können so dem Verantwortlichen die Auswahl der jeweils geeigneten Bentonitsuspension für einen konkreten Anwendungsfall erleichtern.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die hier vorgestellten Bentonit- und Polymerprodukte keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben können. Zudem können die Forschungsergebnisse nur Richtwerte darstellen, die in Abhängigkeit von den spezifischen Randbedingungen bei einer Vortriebsmaßnahme variieren können und den Bauausführenden nicht von der Verantwortung befreien, sich von den Herstellern projektspezifisch zur Produktauswahl informieren und beraten zu lassen.

Die Erarbeitung der Arbeitshilfen erforderte eine systematische Untersuchung und Aufbereitung der relevanten Aspekte. Nachfolgend wird die im Rahmen des Forschungsprojekts gewählte Arbeitsweise dargestellt:

- A Bentonitsuspensionen zeichnen sich durch bestimmte Eigenschaften, wie z.B. Fließgrenze und Thixotropie, aus. Diese Eigenschaften werden im Grundlagenkapitel 2

ausführlich vorgestellt. Ergänzend werden die zur Bestimmung dieser Eigenschaften prinzipiell zur Verfügung stehenden Messmethoden dargestellt und die Auswertung der gemessenen Parameter erläutert.

- B Variationen der Suspensionseigenschaften ergeben sich prinzipiell durch unterschiedliche Konzentrationen eines Bentonitproduktes oder durch die Zugabe von Polymeren. Die Grundlagen zu Polymeren werden im Kapitel 3 behandelt. Neben der Darstellung der unterschiedlichen Polymerarten werden insbesondere die in Suspensionen zur Ringspaltstützung eingesetzten Polymere vorgestellt und ihre Wirkungsweise diskutiert.
- C Die Suspensionseigenschaften von reinen und durch die Zugabe von Polymeren modifizierten Bentonitsuspensionen wurden anhand der ausgewählten Messmethoden systematisch bestimmt. Im Kapitel 4 werden die untersuchten Bentonit- und Polymerprodukte vorgestellt und die Messwerte der Suspensionen aufgelistet. Anhand dieser Aufstellungen wird deutlich, wie die gezielte Veränderung bestimmter Suspensionseigenschaften durch einen variierten Bentonitgehalt und/oder durch die Zugabe von Polymeren erreicht werden kann.
- D Im Rahmen der in Kapitel 6 vorgestellten kleinformatischen Injektionsversuche wird der Einsatzbereich der Bentonitsuspensionen bestimmt. Als Einsatzbereich ist in diesem Zusammenhang das o.g. Ziel zur **Verringerung der Durchlässigkeit** des Bodens definiert. Eine in einen Boden eindringende Bentonitsuspension kann diese Verringerung auf zwei Wegen erreichen. Zum einen kann durch die Fähigkeit von Bentonitsuspensionen, Schubspannungen zu übertragen, eine begrenzte Eindringtiefe der Suspension in den Boden bestimmt werden. Zum anderen kann eine mechanische Verstopfung die Hohlräume im Boden verschließen. Beide Effekte werden ausführlich im Kapitel 5 erläutert. Bei der Durchführung der Injektionsversuche werden die vorab untersuchten und hinsichtlich ihrer Eigenschaften definierten Bentonitsuspensionen in Modellböden bestehend aus nichtbindigem Lockergestein injiziert. Vorab wurde die jeweilige Bodenart, Sieblinie und Durchlässigkeit untersucht und definiert (Kapitel 6.1). Anhand der Injektionsergebnisse war es nun möglich, für die jeweils eingesetzte Bentonitsuspension den Einsatzbereich sowie auch die Einsatzgrenzen anzugeben.
- E Die durch die spezifische Injektion angestrebte und erreichbare **Standfestigkeitserhöhung** des aufgefahrenen Hohlraums (Ringspaltstützung) wurde abschließend anhand von Modellversuchen im Grossversuchsstand nachgewiesen. Hierbei wurde im praktischen Versuch die Verfahrenstechnik der Ringspaltherstellung im Zuge des Vortriebs simuliert und vortriebsbegleitend eine an das anstehende nichtbindige Lockergestein angepasste Bentonitsuspensionen in den Ringspalt injiziert. Die Versuchsbeschreibung und die Ergebnisse enthält Kapitel 7.

Konkret lassen sich aus diesem Untersuchungsprogramm folgende Inhalte für die im Rohrvortrieb Tätigen ableiten:

- A Die Eigenschaften von Bentoniten und Bentonitsuspensionen werden zusammenfassend dargestellt sowie die fachgerechte Herstellung und Verwendung der Suspensionen erläutert.
- B Es werden die Grundlagen zu Polymeren beschrieben, die eine Modifizierung von Bentonitsuspensionen sinnvoll unterstützen und somit den jeweiligen Einsatzbereich erweitern können.
- C Eine erste Übersicht fasst die spezifischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen bestehend aus verschiedenen Produkten in unterschiedlicher Konzentration und teils durch die Zugabe von ausgewählten Polymeren modifiziert zusammen. Diese Übersicht schafft eine Katalogisierung der mit unterschiedlichen Produkten erreichbaren Suspensionseigenschaften. Es muss an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen werden, dass diese Übersicht nicht die Formulierung der Anforderungen an eine Bentonitsuspension für den spezifischen Anwendungsfall ersetzen kann. Es wird daher empfohlen, gemeinsam mit den Herstellern der Bentonit- und/oder Polymerprodukte eine projektspezifische Suspensionsrezeptur zu erarbeiten.
- D Für jede der hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersuchten und katalogisierten Bentonitsuspension werden im Rahmen einer zweiten Übersicht der Einsatzbereich und die Einsatzgrenzen dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den Böden um Einkornböden aus dem Bereich der nichtbindigen Lockergesteine handelt. Einkornböden in unterschiedlichen Korngrößenbereichen weisen im Vergleich zu einem Boden mit gut gestufter Sieblinie in ähnlichen Korngrößenbereichen jeweils den größtmöglichen Porenraum und somit die größtmögliche Durchlässigkeit auf. Die Ergebnisse der Injektionsversuche liegen somit vom theoretischen Ansatz her auf der *sicheren Seite*, so dass beispielsweise die definierte Eindringtiefe bei einem vergleichbaren, gut gestuften Boden immer geringer sein wird als die in den Versuchen im Einkornboden ermittelte. Die Versuchsergebnisse können eine grundlegende Einordnung der Wirksamkeit einer Bentonitsuspension in einem Boden aufzeigen; sie befreien den Planer und Ausführenden einer Vortriebsmaßnahme nicht von der Verantwortung, ein qualifiziertes und auf die Vortriebsmaßnahme zugeschnittenes Baugrundgutachten heranzuziehen und die Bentonitsuspension(en) den Anforderungen entsprechend zu konzipieren.

## 1.4 Projektbeteiligte

Mit der Durchführung des Forschungsprojektes war ausschließlich eine Arbeitsgruppe unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietrich Stein an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität Bochum beauftragt. Alle weiteren Projektpartner haben unentgeltlich ihr Wissen, ihre praktischen Erfahrungen, ihr Engagement und ihre Produkte in die Forschungs- und Entwicklungsarbeit eingebracht und so zum erfolgreichen Projektabschluss beigetragen.

Zum Dank und als Anerkennung der Leistungen werden die Projektpartner sowie ihre Qualifikationen im folgenden vorgestellt.

### 1.4.1 Arbeitsgruppe Prof. Stein (Antragsteller)

Prof. Dr.-Ing. D. Stein forscht und lehrt seit 1991 an der Ruhr-Universität Bochum erfolgreich auf dem Gebiet des Leitungsbaus in offener und geschlossener Bauweise sowie der Instandhaltung von Kanalisationen mit den Schwerpunkten Wartung, Reinigung, Inspektion und Sanierung. Einen breiten Raum haben dabei seit 1985 die Injektionsverfahren zur Abdichtung und/oder Verbesserung von Lockergestein eingenommen.

Durch die langjährige Forschungs- und Lehrtätigkeit an der Ruhr-Universität Bochum hat Prof. Stein einen hochspezialisierten Wissensstand generiert, der u.a. in den folgenden Standardlehrbüchern zusammengefasst wurde:

- Grabenloser Leitungsbau [STEIN 2003]
- Instandhaltung von Kanalisationen [STEIN 1998]
- Der begehbare Leitungsgang [STEIN 2002]

Im Auftrag der verschiedensten Institutionen, wie beispielsweise BMBF, MUNLV, DBU und der Industrie wurden und werden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. D. Stein u.a. folgende Forschungsvorhaben bearbeitet und durchgeführt:

- *Untersuchung der möglichen Einsatzbereiche von Polyurethan-Systemen in Lockergesteinen verschiedener Sieblinien und Wassersättigungsgrade* von 1984 bis 1986, gefördert vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes NRW (MWF-NRW) in Zusammenarbeit mit der Bergbauforschung, Essen / Bayer Leverkusen / IWS, Berlin.
- *Ultraschallmessungen zur Ausbreitungskontrolle von Injektionskörpern* von 1985 bis 1986, gefördert vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes NRW (MWF-NRW) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (FhG, IzfP), Saarbrücken.
- *Entwicklung und Erprobung umweltfreundlicher Injektionsmittel und -verfahren zur Behebung örtlich begrenzter Schäden und Undichtigkeiten in Kanalisationen unter Berücksichtigung des Gewässerschutzes* von 1989 bis 1991, gefördert vom Umwelt-Bundesamt in Zusammenarbeit mit IWS, Berlin / Hygieneinstitut, Gelsenkirchen.

### 1.4.2 BAROID Fluid Services

Baroid Fluid Services, USA, vertreten durch den Beratungsservice Deutschland, liefert Flüssigkeitssysteme, Spezialprodukte und Dienstleistungen, die die aktuellsten Fortschritte der Technik repräsentieren. Alle Vorschriften mit Bezug auf Umwelt als auch die Qualitätsprozesse von Baroid Fluid Services folgen allen formalen und dokumentierten Prozessen, um Konsistenz zu gewährleisten.

Das Kundendienstnetzwerk von Baroid Fluid Services beinhaltet strategisch günstig liegende Produktlager und Mischanlagen, ein Forschungs- und Entwicklungsteam, zu dessen Aufgaben die Entwicklung neuer Produkte und Systeme gehört, ebenso wie eine Arbeit, die durch sichere Ausführung und durch verantwortungsvollen Umgang mit der Umwelt gekennzeichnet ist [übersetzt aus Firmeninformation [www.baroid.com](http://www.baroid.com)].

Von der Fa. Baroid wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Bentonit- und Polymerprodukte sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

### 1.4.3 CETCO Drillings Products Group

Cetco Drilling Products Group, England, vertreten durch den Beratungsservice Deutschland, vertreibt Spezialbohrspülungen für Horizontalbohrungen und Brunnenbohrungen. Des Weiteren liefert die Gruppe eine Produktpalette zur Anwendung in der Brunnensanierung.

Cetco bietet seinen Kunden aus verschiedenen Industriezweigen auf weltweiter Ebene Produkte und Dienstleistungen aus der gewerblichen Anwendung, Betonabdichtungen für unterirdische Bauwerke, Auskleidungssysteme zur Flüssigeindämmung von Deponien bis zur Flutkontrolle, sowie nicht auf Öl und Gas bezogene Bohrungen einschließlich Fundamente, Brunnenbau und Horizontalbohrungen. CETCO wird durch die Firma AMCOL International unterstützt, die wiederum mehr als 80 Jahre Erfahrung mit Bentonitabbau und -herstellung besitzt [übersetzt aus Firmeninformation [www.cetco.com](http://www.cetco.com)].

Von der Fa. Cecto wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Bentonit- und Polymerprodukte sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

### 1.4.4 CIBA Sepciality Chemicals

Der Hauptsitz der Ciba Specialty Chemicals befindet sich in Basel, Schweiz und unterteilt sich in drei Marktsegmente: Kunststoffzusätze, Umhüllungeffekte sowie Wasser- und Papierbehandlung. Das Unternehmen wurde im Januar 1997 selbstständig und entstand aus dem Spezialchemiebetrieb der ehemaligen Ciba-Geigy Limited als diese mit SONDAX Limited fusionierte, um die Novartis AG zu bilden [übersetzt aus Firmeninformation [www.ciba.com](http://www.ciba.com)].

Von der Fa. Ciba wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Polymerprodukte zur Verfügung gestellt.

### 1.4.5 CONDAT

Condat ist heute eine der weltweit führenden Firmen für Schmiermittel im Tiefbau (Tunnelbau, Bergbau und Bohrungen) und in der Umformtechnik [übersetzt aus Firmeninformation [www.condat.fr](http://www.condat.fr)].

Von der Fa. Condat wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Polymerprodukte sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

#### **1.4.6 DEGUSSA - heute BASF Construction Polymers GmbH**

Die BASF Construction Polymers GmbH (ehem. Degussa), Leverkusen, ist ein führender Hersteller von Bau- und Ölfeldpolymeren. Die Gesellschaft gehört innerhalb der BASF AG zum Unternehmensbereich Bauchemie.

Neben Bohrspülungen ist die BASF Construction Polymers GmbH außerdem auf Zusatzmittel für die Tiefbohrzementierung spezialisiert. So wird eine nahezu vollständige Palette von Spezialpolymeren angeboten, mit deren Hilfe die Rohre in Öl- und Gasbohrungen sicher zementiert werden können. Jährlich werden weltweit schätzungsweise 90 000 Bohrungen niedergebracht, wobei bei rund einem Drittel Polymere made by BASF Construction Polymers zum Einsatz kommen [Firmeninformation [www.basf.com](http://www.basf.com)].

Von der Fa. Degussa/Basf wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Polymerprodukte zur Verfügung gestellt.

#### **1.4.7 IBECO - heute S+B Industrial Minerals GmbH**

S+B Industrial Minerals, Mannheim, ist einer der führenden Hersteller von Produkten auf Basis von Bentoniten, Kohlenstoffträgern und anderen Mineralstoffen und ein anerkannter und leistungsstarker Partner der Gießerei-, der Feuerfest-, der Stahl-, der Bau- und Papierindustrie.

Das Lieferprogramm umfasst Formhilfsstoffe, C-Träger und Gemische für die Giessereiindustrie, Bentonite für die Bau- und Papierindustrie, Gießpulver, synthetische Schlacken und Abdeckmittel für die Stahlindustrie sowie hochwertigste mineralische Rohstoffe für die Glas-, Keramik-, Stahl- und Feuerfestindustrie [Firmeninformation [www.ibeco.de](http://www.ibeco.de)].

Von der Fa. Ibeco wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Bentonitprodukte sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

#### **1.4.8 PHRIKOLAT Drilling Specialities GmbH**

Die Phrikolat Gruppe besteht aus:

- Phrikolat Chemische Erzeugnisse GmbH, Siegburg
- Phrikolat Drilling Specialities GmbH, Siegburg
- Phrikolat Drilling Services GmbH, Spremberg

Die Ursprünge der Firma Phrikolat Chemische Erzeugnisse GmbH gehen bis in die 50er Jahre zurück. Seit 1956 wurde in Siegburg CMC (Carboxymethylcellulose) produziert.

CMC wird unter anderem als Spülmittelzusatz in großen Mengen bei Bohrungen nach Öl, Gas und Wasser eingesetzt. Vor dem Hintergrund dieser langjährigen Erfahrung hat Phrikolat eigene Spülmittelsysteme und -zusätze entwickelt.

Ausdruck einer Spezialisierung auf Spülmittelsysteme und -zusätze sind die beiden Ausgründungen im Bereich Drilling. 1997 wurde die Phrikolat Drilling Services GmbH in Spremberg gegründet. Im Jahr 2000 die Phrikolat Drilling Specialties GmbH in Siegburg [Firmeninformation [www.phrikolat.de](http://www.phrikolat.de)].

Von der Fa. Phrikolat wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Bentonit- und Polymerprodukte sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

### 1.4.9 SÜD-CHEMIE AG

Die Süd-Chemie AG, München, ist ein weltweit tätiges unabhängiges Spezialchemieunternehmen. Die Süd-Chemie entwickelt, produziert und vermarktet vielseitig nutzbare Adsorbentien und Additive sowie leistungsstarke Katalysatoren. Die Produkte ermöglichen eine schonende und intelligente Nutzung natürlicher Ressourcen. Damit leistet das Unternehmen einen wichtigen Beitrag zu den Wertschöpfungsketten in einer Vielzahl von Industrien, unter anderem der Chemie-, Mineralöl-, Lebensmittel-, Konsumgüter- und Gießereindustrie sowie der Wasserbehandlung, Umwelttechnik und der Bauwirtschaft.

In ihrem Geschäftsbereich Adsorbentien und Additive entwickelt die Süd-Chemie Spezialchemikalien auf Basis des natürlichen Tonminerals Bentonit [Firmeninformation SÜD-CHEMIE].

Von der Fa. Süd-Chemie wurden die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Bentonit- und Polymerprodukte sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

### 1.4.10 Dow Wolf Cellulosics

Dow Wolf Cellulosics, Deutschland, ist Partner für die Entwicklungen und Anwendungsberatung von Cellulose-Derivaten. Die hoch spezialisierten Cellulose-Derivate Hydroxyethylmethylcellulose, Hydroxypropylmethylcellulose, Methylcellulose, Hydroxyethylcellulose, Ethylcellulose, Carboxymethylcellulose und Nitrocellulose) sowie verwandte Produkte (Polyethylenoxid, Latex Puder und kationische Polymere) erfüllen in Märkten wie Food, Personal Care, Pharmaceuticals, Construction Materials, Paint und einer Vielzahl weiterer Märkte in den unterschiedlichsten Anwendungen wichtige Funktionen.

Am 1. Juli 2007 entstand Dow Wolf Cellulosics als Geschäftsbereich der The Dow Chemical Company aus der Wolff Walsrode AG und Dow's Water Soluble Polymers [Firmeninformation [www.dow.com](http://www.dow.com)].

Von der Fa. Wolf Cellulosics wurde das in den folgenden Kapiteln vorgestellte Polymerprodukt zur Verfügung gestellt.

### **1.4.11 Centerline GmbH**

Die Centerline GmbH ist ein weltweit operierendes Unternehmen, das sich auf die Entwicklung und den Vertrieb von Navigations- und Datenerfassungssystemen in den Bereichen Microtunneling und Rohrvortrieb spezialisiert hat. Hervorgegangen aus der 1995 gegründeten Schwarzer GmbH kann das Unternehmen auf eine über 10-jährige Historie und weit über 100 erfolgreich durchgeführte Rohrvortriebs- und Microtunnelingprojekte zurückblicken [Firmeninformation [www.centerline-gmbh.com](http://www.centerline-gmbh.com)].

Von der Fa. Centerline wurde die stand-alone Version des Steuerungsmoduls SDV13 zur Steuerung und Überwachung der Bentonitinjektionen im Rahmen der Grossversuche sowie das Expertenwissen im Rahmen von Diskussionen zur Verfügung gestellt.

### **1.4.12 edm - Büro für angewandte Geophysik und Probenahmetechnik**

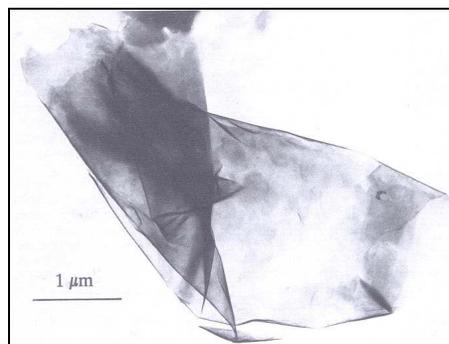
Das Büro für angewandte Geophysik und Probenahmetechnik wurde 1995 in Sandstedt gegründet. Bis August 1996 lagen die Schwerpunkte der Tätigkeiten im Consulting-Bereich hinsichtlich der Anwendung geophysikalischer Meßverfahren, innovativer Probenahmetechnik und dem Erstellen von Arbeitskonzepten für messtechnische Untersuchungen bei Altlasten, für die Lagerstätten erkundung, für geologische Kartierungen und hydrogeologische Aufnahmen.

# Kapitel 2

## Grundlagen der Bentonitsuspensionen

Bentonit ist ein natürlich vorkommender quellfähiger Ton, der durch die Verwitterung vulkanischer Asche oder gleichartiger Ablagerungen entstanden ist. Seinen Namen erhielt Bentonit nach der Fundstätte Fort Benton im US-Bundesstaat Wyoming, wo er 1898 erstmalig entdeckt wurde.

Den Hauptbestandteil von Bentonit bildet das Mineral Montmorillonit, ein Aluminiumhydroxysilikat, welches weitgehend die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bentonits bestimmt. Als Aluminiumhydroxysilikat gehört es zur Gruppe der Phyllosilikate, der Blätterstruktur-Silikate [Ibeco 1999]. Abbildung 2.1 zeigt stark vergrößert einen solchen blättchenförmigen Montmorillonit aus Wyoming. Montmorillonit ist nach seinem Fundort, der südfranzösischen Stadt Montmorillon, benannt.



**Abbildung 2.1:** Blättchenförmiger Montmorillonit, Wyoming [Jasmund u. Lagaly 1993]

Bentonit ist jedoch nicht nur in den USA oder Südfrankreich zu finden. Die Lagerstätten sind weltweit verbreitet. Unterschiedlich sind die mineralogischen Zusammensetzungen aufgrund der verschiedenen Genesen (griech. Entstehung, Entwicklung). Am häufigsten kommt die Genese der Verwitterung vulkanischer Asche und Tuffen vor, bei der in der Regel wässrige Lösungen die Umwandlung vulkanischer Gesteine in Bentonit verursacht haben. Eine andere Form ist die marine Genese. Hierbei ist der Bentonit durch Sedimentation (lat. Ablagerung) in Meeresbecken entstanden. Diese Bentonite sind sogenannte

natürliche Natriumbentonite (Na-Bentointe), wie sie beispielsweise in den USA vorkommen. Die deutschen und europäischen Bentonite sind dagegen meistens Erdalkalibentonite mit austauschfähigen Ca- oder Mg-Ionen, da sie im Süßwasser entstanden sind (sogenannte Calciumbentonite (Ca-Bentonite)). Die physikalischen Eigenschaften sowie die chemische und mineralogische Zusammensetzung und daraus resultierend die technische Verwertbarkeit unterscheiden sich je nach Art der Genese [Ibeco 1999].

Zur Optimierung seiner Eigenschaften kann der Rohbentonit sowohl mechanisch als auch chemisch aufbereitet werden. Diese Aufbereitung reicht von Klassierung (Siebanalyse), Trocknung und Aufmahlung bis zur Aktivierung mit Säuren, Alkalien und diversen Organika (sogenannte organophile Bentonite) [Ibeco 1998].

Bei der Aktivierung mit Alkalien wird dem feuchten Bentonit während des Verarbeitungsprozesses Soda (Natriumcarbonat) beigemischt. Die austauschfähigen Ca- und Mg-Ionen werden nun weitgehend durch Na-Ionen ersetzt. Dieser Ionenaustausch verändert die Bentoniteigenschaften, wie z.B. das Wasseraufnahmevermögen, den Quellvorgang etc., entscheidend. Über den Grad der Aktivierung können die anwendungstechnischen Eigenschaften, die bei jeder Anwendung variieren, erzielt werden.

Abbildung 2.2 zeigt einen Calcium- und einen Aktivbentonit. Der Farbunterschied beruht auf der Aktivierung des Calciumbentonits.



**Abbildung 2.2:** Verschiedene Bentonite: a) Calciumbentonit b) Aktivbentonit [Tonmehl 2002]

Weiterführende Informationen enthält [STEIN 2003].

## 2.1 Zusammensetzung und Struktur von Bentonit

Neben dem Hauptbestandteil Montmorillonit kann Bentonit noch Begleitminerale wie Quarz, Feldspat und Glimmer enthalten. Die einzelnen prozentualen Anteile schwanken je nach Bentonitsorte und Fundort. Annähernd kann man davon ausgehen, dass Bentonit zu 60-80 M.-% aus Montmorillonit besteht [Geil 1987].

Der Gitteraufbau von Montmorillonit zeigt, dass die kleinsten Bausteine Siliziumdioxid-Tetraeder (Abbildung 2.3) und Aluminiumoxid-Oktaeder (Abbildung 2.4) sind. Bei dem Siliziumdioxid-Tetraeder ist ein Siliziumatom von vier tetraedrisch angeordneten Sauerstoffatomen umgeben, bei dem Aluminiumoxid-Oktaeder ein Aluminiumatom von sechs

oktaedrisch angeordneten Sauerstoffatomen. Je nach Schichtenanzahl einer Elementarschicht unterscheidet man in Zwei-, Drei- und Vier-Schicht-Mineralien. Montmorillonit und damit auch der Bentonit gehören zur Gruppe der Drei-Schicht-Mineralien. Hierbei schließen zwei Silizium-Tetraederschichten eine Aluminium-Oktaederschicht symmetrisch ein und bilden so eine Kristall-Lamellen.

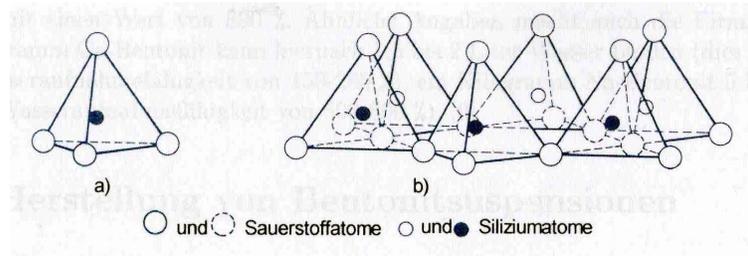


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung Silizium-Tetraeder []

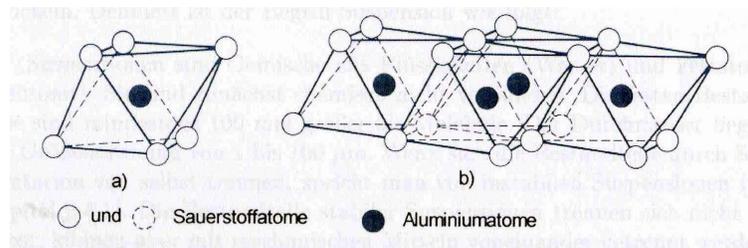


Abbildung 2.4: schematische Darstellung Aluminium-Oktaeder []

Im Kristallgitter des Montmorillonits sind einige Siliziumatome ( $Si^{4+}$ ) der Tetraederschicht durch Aluminiumatome ( $Al^{3+}$ ) und einige Aluminiumatome der Oktaederschicht durch Magnesiumatome ( $Mg^{2+}$ ) ersetzt, was insgesamt eine negative Überschussladung des Kristallgitters hervorruft. Durch diese negative Überschussladung hat der Kristall das Bestreben, Metallkationen (z.B.  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ) elektrostatisch anzuziehen [Jasmund u. Lagaly 1993, Geil 1987].

Ein einzelner Montmorillonitkristall besteht aus etwa 15 bis 20 Elementarschichten, d.h. negativ geladenen Silicatschichten, die durch Zwischenschichtkationen und Wasser getrennt sind. Der Abstand der Schichten ändert sich mit dem Wassergehalt [?]. Die Silicatschichten tragen auf den Flächen permanent negative Ladungen. Die Ladung der Kanten ist vom pH-Wert abhängig.

Charakteristisch sind die geringe Schichtstärke, die Biugsamkeit und die große Oberfläche des Kristalls. Letzteres ist besonders wichtig, da Adsorptionsvorgänge Oberflächenreaktionen sind und das Adsorptionsvermögen so im wesentlichen von der spezifischen Oberfläche des Montmorillonits beeinflusst wird. Die spezifische Oberfläche von Montmorillonit kann bis zu  $800 \text{ m}^2/\text{g}$  betragen [Bentonit 2001].

Die Wasseraufnahmefähigkeit verschiedener Bentonite wurde von [Schultze u. Muhs 1967] untersucht. Ihr Ergebnis ergab für einen Na-Bentonit einen Wert von 700 % und für einen Ca-Bentonit einen Wert von 300 %. Ähnliche Angaben macht auch die Firma [Ibeco 2001].

Ein Kilogramm Ca-Bentonit kann hiernach 1,5 bis 2 l Wasser binden (dies entspricht einer Wasseraufnahmefähigkeit von 150-200 %), ein Kilogramm Na-Bentonit 5 bis 6 l Wasser (Wasseraufnahmefähigkeit von 500-600 %) [Ibeco 1999].

## 2.2 Herstellung von Bentonitsuspensionen

[Kutzner 1991] definiert den Begriff Suspension wie folgt:

“Suspensionen sind Gemische aus Flüssigkeiten (Wasser) und Feststoffen (Bentonit). Sie sind zunächst chemisch nicht verbunden. Die festen Bestandteile sind mindestens 100 mal größer als Moleküle. Der Durchmesser liegt in der Größenordnung von 1 bis 100  $\mu\text{m}$ . Wenn sich die Bestandteile durch Sedimentation von selbst trennen, spricht man von instabilen Suspensionen. Die Bestandteile stabiler Suspensionen trennen sich nicht von selbst, können aber mit mechanischen Mitteln voneinander getrennt werden.“

Bei der Herstellung von Bentonitsuspensionen werden drei Vorgänge unterschieden:

- das Suspendieren
- das Dispergieren
- und das Quellen.

Unter **Suspendieren** (lateinisch: in der Schwebelassen) versteht man das Aufschlämmen der Bentonitteilchen im Wasser. Die Zusammenschlüsse der Elementarschichten im Kristallverbund werden hierbei nicht zerstört.

Beim **Dispergieren** (lateinisch: fein verteilen) wird der Kristallverbund durch die Einwirkung von Scherkräften in die Primärteilchen aufgeteilt. Zur optimalen Aufteilung der Kristalle und Ausbildung einer stabilen Suspension muss eine hohe mechanische Energie (Scherenergie) eingebracht werden. Diese hohe Scherenergie wird durch den Einsatz von hochtourigen Rührern oder speziellen Dispergieraggregaten realisiert. Werden für das Anmischen lediglich die gebräuchlichen Grundmischer verwendet, die den Inhalt des Mischbehälters mittels Kreiselpumpe umwälzen, sollte auf möglichst lange Mischzeiten, sowie ein möglichst hochtouriges Arbeiten der Kreiselpumpe geachtet werden. Zudem ist es wichtig, dass der Bentonit langsam und gleichmäßig in das Wasser gestreut wird, um eine Klümpchenbildung und einen dadurch bedingten Qualitätsverlust der Suspension zu vermeiden. Die Vorgänge des Suspendierens und des Dispergierens lassen sich zumeist nicht exakt trennen. Sie erfolgen üblicherweise in demselben Aggregat und gehen ineinander über.

Der letzte Schritt bei der Herstellung von Bentonitsuspensionen ist das **Quellen**. Dies ist ein zeitlicher Vorgang, bei dem Wasser in die Bentonitkristalle aufgenommen wird. Dadurch entfernen sich die Gitterschichten so weit voneinander, dass die Kristalle in einzelne Lamellen aufgeblättert werden [Moebis 1977]. Während dieses Quellvorganges ist

es nicht mehr nötig, die Suspension umzuwälzen oder zu bewegen. Bei Aktiv-Bentoniten werden annähernd optimale Eigenschaften nach einer Quellzeit von 1-6 Stunden erreicht. Die endgültige Dauer der Quellzeit hängt stark von der Intensität des Dispergierens sowie von der Art der Aufbereitung bzw. der Aktivierung des Bentonits ab. Wird beim Dispergieren eine hohe Scherenergie aufgewendet, kann ein weitgehendes Aufblättern der Primärkristalle erfolgen, wodurch die zur Erreichung des optimalen Endzustandes erforderliche Quellzeit verkürzt wird.

Allgemein gilt, je besser die Dispergierung ist, desto kürzer darf die Quellzeit sein. An dieser Stelle muss jedoch darauf verwiesen werden, dass es kein Dispergierungssystem gibt, welches eine Quellzeit völlig überflüssig macht. Allerdings ist es möglich, eine schlechte Dispergierung durch eine längere Quellzeit auszugleichen [Ibeco 1998].

Da das Suspendieren und Dispergieren sowie die Quellzeit die Eigenschaften der Bentonitsuspension stark beeinflussen, werden sie für den Eignungstest von Tonen als Stützflüssigkeit in der [DIN 4127 1986] genau vorgegeben. Demnach beträgt die Dispergierzeit bei angemessenem Dispergierwerkzeug 10 Minuten. Alle Messungen sind an ausgequollenen Suspensionen durchzuführen. Die Suspension gilt als ausgequollen, wenn sich ihre Fließgrenze in einem Zeitraum von sechs Stunden um nicht mehr als 10% verändert.

Neben der Art und Weise des Anmischens hat die Temperatur des verwendeten Anmachwassers großen Einfluss auf die Bentonitsuspension. Die Vorgänge des Dispergierens und des Quellens werden durch Verwendung von warmem Wasser wesentlich erleichtert. Am günstigsten wirkt sich hier eine Temperatur von 60°C aus [Moebis 1977]. Befinden sich Elektrolyte oder organische Stoffe im Anmachwasser oder hat dieses eine große Karbonathärte, werden dadurch bestimmte Suspensionseigenschaften herabgesetzt. Eine schlechte Wasserqualität hat negative Auswirkungen auf die Fließgrenze, die Marsh-Zeit und auf die Filtratwasserabgabe. Eine Gesamthärte bis 20° dH wird für das Anmachwasser zur Herstellung von Bentonitsuspensionen als unkritisch angesehen [Iko Minerals 2006, Savidis 2005].

## 2.3 Rheologische Eigenschaften von Bentonitsuspensionen

Die Eigenschaften von Bentonitsuspensionen, wie Quellverhalten, Thixotropie oder Fließverhalten, bilden ein komplexes Themengebiet und sind somit im einzelnen nicht klar voneinander trennbar. So lässt sich durch den Quellvorgang und die aus den einzelnen Teilchen entstehende Struktur erst die Thixotropie erklären und verstehen. Die Dauer der thixotropen Verfestigung beeinflusst die Fließgrenze und damit das Fließverhalten der Suspension.

Diese Zusammenhänge und Eigenschaften fallen in das Themengebiet der Rheologie. Die Rheologie ist die „Wissenschaft vom mechanischen Verhalten der flüssigen, pastenartigen und plastischen Stoffe bei ihrer Verformung (Fließen)“ [www.wissen.de].

### 2.3.1 Quellverhalten

Eine wesentliche Eigenschaft des Bentonits ist das Quellverhalten bei Kontakt mit Wasser. Bei der Hydratation (griech.: Eigenschaft von einigen Mineralien, Wasser zu binden) werden zwei Hauptarten der Wasseranlagerung unterschieden [Ibeco 1998]:

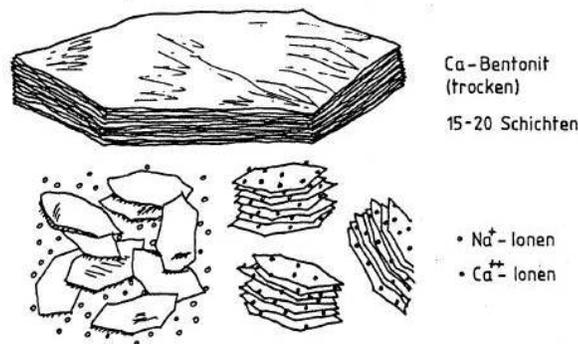
- **Innerkristalline oder intrakristalline Quellung**

Durch Adsorption von überschüssigem Wasser an den Zwischenschichtkationen und Tonmineraloberflächen kommt es zu einer Weitung der Elementarschichten. Dieser Vorgang ist reversibel.

- **Osmotische Quellung**

Durch Konzentrationsunterschiede der Kationen an der Tonmineraloberfläche und in der Porenlösung bilden sich diffuse Ionenschichten aus, die wiederum eine elektrostatische Abstoßung der Partikel bewirken.

Der Quellvorgang wird im Allgemeinen durch Eintritt von Wassermolekülen zwischen die Schichtlamellen hervorgerufen (innerkristalline Quellung). Dabei vergrößert sich der Abstand der Schichtlamellen und unter geeigneten Bedingungen kann es zu einer vollständigen Auflösung des Kristallverbundes kommen (Abbildung 2.5).



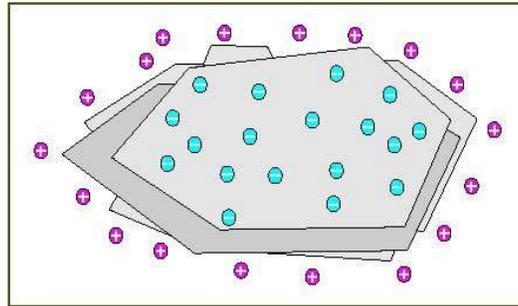
**Abbildung 2.5:** Quellvorgang eines Montmorillonitkristalls [Pulsfort u. Walz 2000]

Zwischen Natrium- und Calciumbentonit besteht aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der Zwischenschichtkationen ein großer Unterschied bezüglich ihres Quellverhaltens [Ibeco 1998].

Natriumionen (Na) neigen im adsorbierten Zustand eher zur Hydratation als Calciumionen (Ca) und ermöglichen so eine größere Wasseraufnahme und Quellung. Beim Natriumbentonit liegt das Wasseraufnahmevermögen bei 600 - 700 %, bei Calciumbentonit lediglich bei 200 - 300 % [Geil 1987].

Natriumionen sind zudem größer als Calcium- bzw. Magnesiumionen (Mg) und haben daher eine geringere Bindekraft. Durch Wasseraufnahme oder Wasserabgabe verändert sich der Schichtabstand der Kristalle bei Ca- oder Mg-gesättigten Montmorilloniten zwischen

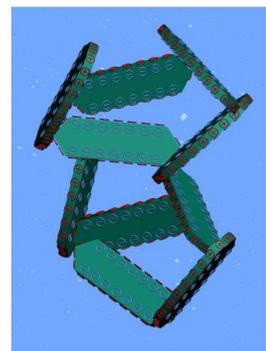
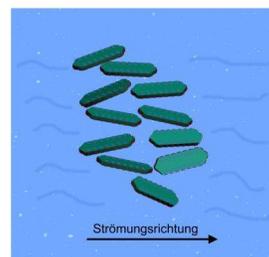
10 Å und 20 Å. Die einzelnen Silikatschichten bleiben auch nach ausreichender Wassergabe in Schichtstapeln geordnet. Bei Na-Zwischenschichtkationen hingegen vergrößert sich der Schichtabstand durch Aufquellen auf bis zu 160 Å. Bei weiterer Wasseraufnahme bzw. Aufweitung geht der Zusammenhalt der Schichtpakete verloren und es kommt zu einer vollständigen Auflösung des Kristallverbundes. Der Montmorillonitkristall teilt sich dabei in seine 15 bis 20 Einzellamellen auf (Abbildung 2.5) [Savidis 2005, Walz 2000].



**Abbildung 2.6:** Ladungsverteilung eines Montmorillonitkristalls

Während die Oberflächen der Kristalle negative Ladungen tragen, befinden sich auf den Kanten der Kristalle positive Ladungen (Abbildung 2.6). Durch diese unterschiedlichen Ladungen bilden sich nach Auflösung des Kristallverbundes in Einzellamellen im Wasser besondere Strukturen aus, indem sich immer die Kante eines Kristalls auf die Fläche eines Anderen lagert. Dies wird als Kartenhausstruktur bezeichnet (Abbildung 2.7) [Möbius 1977].

Physikalisch betrachtet haben die Flächen der Schichtlamellen eine negative Ladung, die Kanten sind positiv geladen. Die Teilchen bilden nun im Wasser ein großvolumiges Gerüst, in dem sich die Teilchen Kante auf Fläche stellen und somit ein Kartenhausgerüst bilden (Abbildung 2.7) [Hof 1952].



**Abbildung 2.7:** Kartenhausstruktur

### 2.3.2 Thixotropie

Die [DIN 1342-1 2003] definiert Thixotropie als ein *zeitabhängiges Fließverhalten, bei dem die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung vom Wert im Ruhezustand her gegen einen Endwert hin abnimmt und nach Aufhören der Beanspruchung wieder zunimmt*. Die Thixotropie ist bei Bentonitsuspensionen von großer Bedeutung. Im Ruhezustand erstarrt die Suspension zu einem Hydrogel, das sich durch mechanische Einwirkungen, wie z.B. Rühren oder Pumpen, in die flüssige Solphase zurückverwandelt [Geil 1987].

Dieses Verhalten lässt sich mit Hilfe des Kartenhausgerüsts erklären. Bei ausreichend intensiven Bewegungen der Suspension wird ein Großteil der elektrostatischen Verbindungen aufgelöst und die Kartenhausstruktur zerfällt (Sol). Im Gegensatz zu einem echten Kartenhaus wird diese Struktur allerdings nicht vollständig, sondern nur teilweise zerstört. Je nach Dauer und Größe der scherenden Kraft können unversehrte Elemente der Struktur übrig bleiben. Kommt die Suspension zur Ruhe bauen sich die zerrissenen Kationenbrücken aufgrund ihrer Ladungsverteilung allmählich wieder zu einem Gerüst auf (Gel). Diese Sol-Gel-Umwandlung ist vollkommen reversibel und kann beliebig oft wiederholt werden [Möbius 1977, Hofmann 1952].

### 2.3.3 Fließverhalten

Um das Fließverhalten von Bentonitsuspensionen zu beschreiben, sind die Begriffe **Fließgrenze** und **Viskosität** zu definieren.

#### Fließgrenze

*Als Fließgrenze  $\tau_F$  [ $N/m^2$ ] eines Stoffes wird seine Eigenschaft bezeichnet, Schubspannungen  $\tau$  bis zur maximalen Größe  $\tau_F$  aufnehmen zu können, ohne dass plastische Deformationen eintreten* [Walz 2000].

Für ideal plastische Stoffe (Flüssigkeiten) gilt:

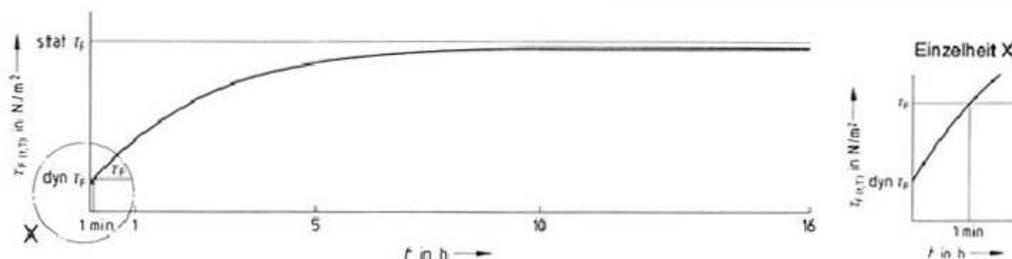
für  $\tau < \tau_F$  keine plastische Deformation

für  $\tau = \tau_F$  unbeschränkte plastische Deformation (Fließen)

Voraussetzung für das Vorhandensein einer Fließgrenze ist die Bildung einer Gerüststruktur (Kartenhaus). Die Gerüste widerstehen einwirkenden Scherkräften solange bis ein kritischer Wert der Scherkraft überschritten wird. Erst dann werden die Gerüststrukturen aufgerissen und das System beginnt zu fließen (vgl. Kapitel 2.3.2) [Jasmund u. Lagaly 1993].

Dementsprechend definiert die [DIN 4127 1986] die Fließgrenze  $\tau_F$  als die Scherspannung  $\tau$ , ab der Fließen eintritt (Bruchscherspannung). Sie ist bei thixotropen Flüssigkeiten, wie z.B. Bentonitsuspensionen, abhängig von der Temperatur und der Zeit der thixotropen Verfestigung. Als thixotrope Verfestigung wird das Ansteigen der Fließgrenze  $\tau_F$  mit zunehmender Ruhezeit bezeichnet.

Die Fließgrenze  $\tau_F$  besitzt direkt nach Abschluss einer Fließbewegung ( $t = 0$ ) ihren Minimalwert  $\text{dyn}\tau_F$  (dynamische Fließgrenze), und nähert sich mit andauernder Ruhephase ihrem Maximalwert  $\text{stat}\tau_F$  (statische Fließgrenze) asymptotisch an [DIN 4127 1986]. Die zeitliche Entwicklung der thixotropen Verfestigung ist exemplarisch in Abbildung 2.8 dargestellt. Der Verlauf und die Grenzwerte der Verfestigungskurven sind temperaturabhängig.



**Abbildung 2.8:** Zeitlicher Verlauf der thixotropen Verfestigung [DIN 4127 1986]

Die statische Fließgrenze  $\text{stat}\tau_F$  wird nach einer Ruhezeit von 16 Stunden gemessen. Der Wert ist nach dieser Zeit für Tonsuspensionen genügend genau angenähert [DIN 4127 1986].

Die Fließgrenze  $\tau_F$  einer Bentonitsuspension hängt von mehreren Faktoren ab. Hierzu zählen die Bentonitsorte und -konzentration, die Art der Aufbereitung, die Dispergier- und Quellzeit, sowie die Temperatur. Zu ihrer Bestimmung stehen verschiedene Messverfahren zur Verfügung. Diese werden in Kapitel 2.4.4 erläutert.

### Viskosität

Die Viskosität  $\eta$  ist ein Maß für die Zähigkeit von Flüssigkeiten. Diese Zähigkeit wird durch innere Reibung verursacht, die benachbarte Flüssigkeitsschichten aufeinander ausüben, weil ihre Moleküle sich gegenseitig anziehen. Je größer die Viskosität einer Flüssigkeit, desto stärker ist die Bindung zwischen ihren Molekülen und umso unbeweglicher sind sie. Dadurch verringert sich die Fließfähigkeit [www.wikioedia.de 2006].

Nach [DIN 1342-2 2003] wird die Viskosität als das Verhältnis zwischen Schubspannung  $t$  und Geschwindigkeitsgefälle  $D$  definiert:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (2.1)$$

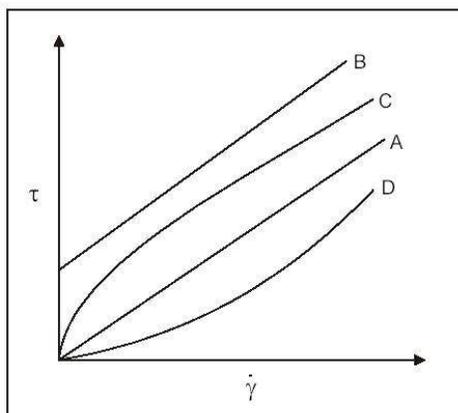
mit:

$\eta$  = Viskosität [ $Ns/m^2$ ]

$\tau$  = Schubspannung [ $N/m^2$ ]

$D$  = Geschwindigkeitsgefälle [ $s^{-1}$ ]

Das Fließverhalten von Flüssigkeiten lässt sich anhand von verschiedenen Fließkurventypen mit unterschiedlichen mathematischen Ansätzen beschreiben. Einige charakteristische Fließkurven sind in Abbildung 2.9 dargestellt.



**Abbildung 2.9:** Fließkurventypen: A: newtonsches Fließen; B: plastisches Fließen mit Fließgrenze; C: pseudoplastisches Fließen, D: dilatantes Fließen [Ziesmer 2002]

*Newtonsches Fließen* tritt bei Tonmineraldispersionen nur bei sehr geringen Konzentrationen auf. Zwischen Scherspannung  $\tau$  und Schergeschwindigkeit  $D$  besteht ein proportionaler Zusammenhang. Die Fließkurve ist eine Gerade durch den Koordinatenursprung mit einer konstanten Viskosität  $\eta$  als Steigung (Abbildung 2.9-A) [Jasmund u. Lagaly 1993].

*Plastisches Fließen* wird durch das Auftreten einer Fließgrenze gekennzeichnet. Das System verhält sich bei kleinen Schubspannungen wie ein Feststoff. Fließen tritt erst nach Überschreitung der Fließgrenze  $\tau_F$  ein. Auch hier ist das Fließverhalten linear und die Viskosität konstant (Abbildung 2.9-B) [Walz 2000, Ziesmer 2002].

Ihre Fließkurve kann vereinfacht durch das Bingham'sche Fließgesetz abgebildet werden:

$$\tau = \tau_F + \eta \cdot D \quad (2.2)$$

Beim *pseudoplastischen Fließen* ist das Verhältnis zwischen Scherspannung  $\tau$  und Schergeschwindigkeit  $D$  nicht proportional. In diesem Fall kann die Viskosität  $\eta$  nur in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsgefälle  $D$  angegeben werden. Sie wird hier punktuell über die Steigung der Fließkurve bestimmt. Diese Viskosität wird als differentielle Viskosität  $\eta'$  definiert. Nimmt die Viskosität  $\eta$  mit dem Schergefälle  $D$  ab, wird dieses Verhalten auch als strukturviskos bezeichnet (Abbildung 2.9-C) [Grewe 1965, Jasmund u. Lagaly 1993].

Strukturviskosität ist durch den Abbau struktureller Verbindungen mit steigender Scherbeanspruchung begründet. Nimmt die Viskosität dagegen mit steigender Schergeschwindigkeit zu, wird dieses Verhalten als *dilatant* gekennzeichnet (Abbildung 2.9-D).

In Abbildung 2.10 sind die wesentlichen Elemente des Fließverhaltens von Bentonitsuspensionen anhand einer typischen Fließkurve dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Bentonitsuspensionen keinem Fließkurventyp eindeutig zugeordnet werden können. Nach Erreichen der Fließgrenze nimmt die Viskosität zunächst mit steigender Schergeschwindigkeit ab und kann in diesem Bereich nur punktuell über die Steigung angegeben werden. Sobald die Gerüststruktur bei höheren Geschwindigkeiten vollkommen zerstört ist, verläuft die Kurve linear und die Viskosität ist über diesen Bereich nahezu konstant.

Für die Beschreibung des Verhaltens von Bentoniten wurden daher folgende Angaben festgelegt [Möbius 1977]:

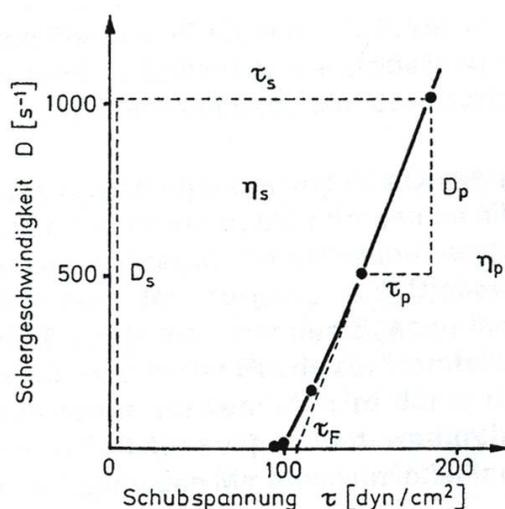


Abbildung 2.10: Fließkurve einer Bentonitsuspension [Möbius 1977]

Die scheinbare Viskosität wird aus der Schubspannung  $\tau$  bei einer Schergeschwindigkeit von  $D = 1000\text{s}^{-1}$  berechnet. Hierbei wird vernachlässigt, dass die Suspension eine Fließgrenze hat.

$$\eta_s = \frac{\tau_s}{D_s} \quad (2.3)$$

Zur Bestimmung der plastischen Viskosität wird nur der als linear betrachtete Teil der Fließkurve zwischen den Werten

$$D = 500\text{s}^{-1}$$

und

$$D = 1000\text{s}^{-1}$$

betrachtet.

$$\eta_p = \frac{\tau_p}{D_p} \quad (2.4)$$

Durch Verlängerung des linearen Teils der Kurve auf die Abszisse ergibt sich die Schubspannung  $\tau_B$ , die als Bingham-Fließgrenze bezeichnet wird [Möbius 1977, Jasmund u. Lagaly 1993]. Die plastische und die scheinbare Viskosität sowie die Bingham-Fließgrenze lassen sich mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters ermitteln. Die differentielle Viskosität  $\eta'$  kann mit dem Marsh-Trichter bestimmt werden.

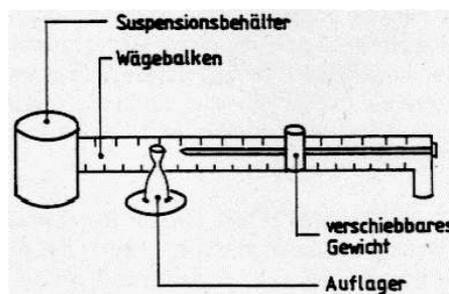
## 2.4 Bestimmung der Eigenschaften von Bentonitsuspensionen

Auf der Baustelle werden die relevanten Eigenschaften der Bentonitsuspensionen, d.h. **Dichte**, **Stabilität**, **Fließgrenze**, **Viskosität**, **Gelstärke** und **pH-Wert**, mit einfachen

Versuchen ermittelt, um bereits vor der Anwendung zu erkennen, ob die Suspension die erforderlichen Grundeigenschaften erreichen kann. Im Labor dagegen besteht die Möglichkeit, vergleichsweise aufwendige Untersuchungen an den Suspensionen durchzuführen.

### 2.4.1 Dichte

Die Dichte von Bentonitsuspensionen wird mit Hilfe einer Spülungswaage oder durch Wägung eines bekannten Suspensionsvolumens bestimmt. Eine Spülungswaage ist eine auf einer mittleren Schneide gelagerte Balkenwaage (Abbildung 2.11). An einem Ende des Waagebalkens befindet sich ein Suspensionsbehälter bekannten Volumens, der mit der zu prüfenden Bentonitsuspension gefüllt wird. An dem anderen Ende kann ein Tariergewicht solange hin- und hergeschoben werden, bis der Balken im Gleichgewicht ist. Die Dichte der Suspension kann jetzt an der Stellung des Tariergewichtes an einer Skala direkt abgelesen werden [16].



**Abbildung 2.11:** Schematische Darstellung einer Spülungswaage [15]

Eine weitere, durchaus gleichwertige Methode, ist die Wägung eines bekannten Volumens. Hierbei berechnet sich die Dichte einfach mit:

$$\rho_S = \frac{m_S}{V_S} \quad (2.5)$$

mit:

$\rho_S$  = Dichte der Suspension [ $kg/m^3$ ]

$m_S$  = Masse der Suspension [ $kg$ ]

$V_S$  = Volumen der Suspension [ $m^3$ ]

### 2.4.2 Stabilität

Die Stabilität einer Suspension wird nach [Walz 2000] definiert als *die Eigenschaft, sich im Laufe der Zeit nicht oder möglichst wenig zu entmischen*. Trennen sich die Bestandteile von selbst, spricht man von einer instabilen Suspension. Stabile Suspensionen hingegen entmischen nicht von selbst (Abbildung 2.12). Die Suspensionsbestandteile können aber mit mechanischen und/oder chemischen Mitteln voneinander getrennt werden [Stein 2003].

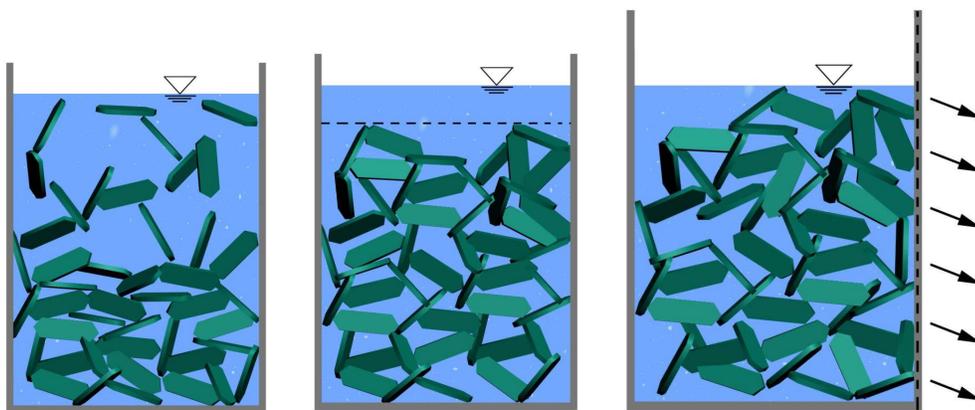
In den Erläuterungen der DIN 4126 [Kilchert u. Karstedt 1984] werden drei Arten des Entmischens unterschieden:



**Abbildung 2.12:** Stabile Suspension: Bentonitpartikel sind im Wasser gleichmäßig verteilt

- **Sedimentation** ist die Ablagerung oder das Absinken von Feststoffen in einer Flüssigkeit unter der Wirkung der Schwerkraft. Als Folge der Sedimentation nimmt die Dichte der Flüssigkeit im oberen Bereich ab und im unteren Bereich zu.
- **Konsolidation** ist die Zusammendrückung eines geschütteten oder aufgehäuften Materials (Kartenhauses) unter Eigengewicht oder inneren Kräften, wobei Wasser abgeschieden wird.
- **Filtration** ist die Trennung von festen und flüssigen Stoffen. Bei Bentonitsuspensionen ist es die Wasserabgabe durch eine poröse Fläche oder durch einen porösen Körper (Filter, z.B. Boden) infolge eines auf die Suspension wirkenden Druckes. Die Filtration tritt dann auf, wenn der suspendierte Feststoff (Bentonit) entweder nicht in die Poren des Filters eindringen kann oder die Suspension in den Poren des Filters stagniert [1].

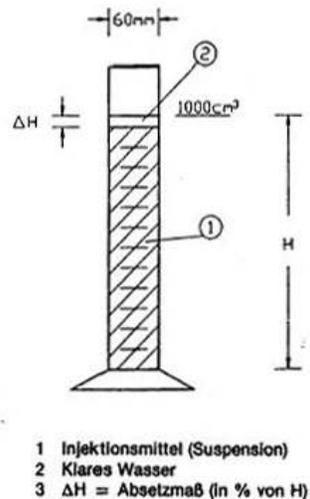
Diese drei Vorgänge sind in Abbildung 2.13 dargestellt.



**Abbildung 2.13:** Entmischungsarten einer Suspension: Sedimentation (links), Konsolidation (Mitte), Filtration (rechts)

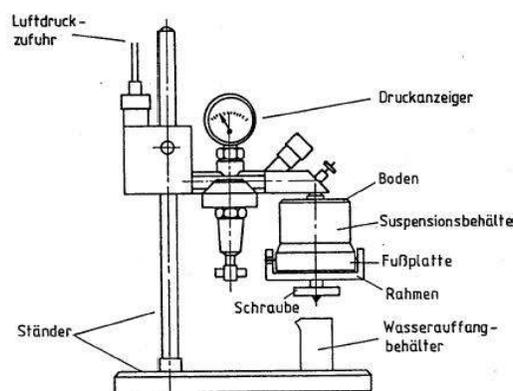
Sedimentation und Konsolidation können gut in einem Absetzversuch in einem Standzylinder (Abbildung 2.14) beobachtet werden. Nach dem Befüllen des Zylinders mit der zu

untersuchenden Suspension wird dieser ohne jegliche Bewegung oder Erschütterung stehen gelassen. Durch Markieren der Einfüllhöhe und Messung des Absetzmaßes  $\Delta H$  lassen sich so Rückschlüsse auf Sedimentation und Konsolidation schließen. Die Messwerte, wie z.B. die Dicke der oben abgesetzten Wasserschicht, sind allerdings von der Größe und der Form des Gefäßes abhängig und erlauben keine Rückschlüsse auf die Stabilität [Walz 2000].



**Abbildung 2.14:** Sedimentation im Standzylinder [Walz 2000]

Die Filtration (Filtratwasserabgabe) kann mit dem Filterpressversuch gemessen werden, der nach [DIN 4126-100 1996] genormt ist. Beim Filterpressversuch wird die Filtration an einer porösen Grenzschicht simuliert, deren Poren kleiner sind als die Partikelgröße der Suspension (Abbildung 2.15).



**Abbildung 2.15:** Schematische Darstellung einer Filterpresse [Walz 2000]

Die Versuchsergebnisse des Filterpressversuchs dienen als Grundlage für die Beurteilung der Stabilität der Suspension und liefern, für relative Vergleiche untereinander, Hinweise

auf Filtrat- bzw. Filterkuchenentwicklung. Bei der Durchführung wird ein definiertes Suspensionsvolumen mit einem Druck von  $7 \pm 0,35$  bar belastet und gibt dabei durch ein Filterpapier mit vorgegebener Porosität Wasser ab. Das Volumen des Filtratwassers, das nach 7,5 Minuten Filtrationszeit abgegeben wurde, wird als Filtratwasserabgabe  $f [cm^3]$  bezeichnet [DIN 4127 1986].

Eine Suspension mit  $f < 15cm^3$  ist ohne einen weiteren Nachweis stabil. Suspensionen mit  $f = 15cm^3$  können unter Umständen ebenfalls stabil sein. Die [DIN EN 1538] fordert für stützende Flüssigkeiten im frischen Zustand eine maximale Filtratwasserabgabe von  $f = 30ml$ .

Die Filtratwasserabgabe ist vom Tongehalt und von der Bentonitsorte abhängig. Auch während des Eindringens des Bentonits in den Boden wird Wasser aus der Suspension an den Boden abgegeben. Allerdings ist dieser Vorgang nicht mit den Filterpressversuchen messbar, da die Porosität des Filterpapiers im Normalfall nicht derjenigen des anstehenden Bodens entspricht [Walz 2000].

### 2.4.3 Fließgrenze

Für eine direkte Bestimmung der Fließgrenze  $\tau_F$  von Bentonitsuspensionen sind in der [DIN 4126-100 1996] zwei praxisgerechte Methoden aufgeführt: die Pendelgeräte nach Weiss, sowie die Kugelhharfe nach von Soos.

Eine alternative Möglichkeiten bietet zudem das Rotationsviskosimeter. Um die Fließgrenze  $\tau_F$  zu kennzeichnen, werden die Zeit  $t$  der thixotropen Verfestigung bis zur Messung sowie die Temperatur  $T$  während der Messung im Index gekennzeichnet. Wird bei der Angabe auf Indizes verzichtet, handelt es sich hierbei um die Fließgrenze nach einer Ruhezeit von einer Minute und bei einer Temperatur von  $20^\circ C$  [DIN 4127 1986].

#### Pendelgerät

Beim Pendelgerät wird eine an einem dünnen, nahezu gewichtslosen Faden befestigte Kugel in einen horizontal verschieblichen Behälter mit der zu prüfenden Bentonitsuspension eingehängt. Durchmesser und Gewichtskraft der Kugel müssen bekannt sein. Das Volumen des Suspensionsbehälters wird in Abhängigkeit des Kugeldurchmessers nach Abbildung 2.16 gewählt. Zudem wird zur Messung der Auslenkung des Pendels wahlweise eine Skala im Bogenmaß oder eine Skala zur Messung des  $\tan a$  benötigt. Vor der Untersuchung ist die Suspension mittels eines Quirls oder Schneeebesens zunächst eine Minute kräftig zu durchmischen, um eventuell vorhandene thixotrope Verfestigungen aufzuheben. Zwischen 8 s und 30 s vor Ende der vorgesehenen Ruhezeit beginnend, wird der Behälter so verschoben, dass am Ende der vorgesehenen thixotropen Verfestigungszeit gerade die Endstellung erreicht ist. Die Endstellung ist innerhalb der durch Abbildung 2.16 gegebenen Grenzen frei wählbar. Jedoch soll der Faden mindestens einen Weg von 150 mm an der Suspensionsoberfläche zurückgelegt haben. Nach einer weiteren Minute Wartezeit kann die Auslenkung des Pendels  $a$  bzw.  $\tan a$  abgelesen werden [[DIN 4126-100 1996].

Die Fließgrenze  $t_F$  berechnet sich nach:

$$\tau_{F(t,T)} = 0,15 \cdot d \cdot (\gamma - \gamma_F) \cdot \sin \alpha \quad (2.6)$$

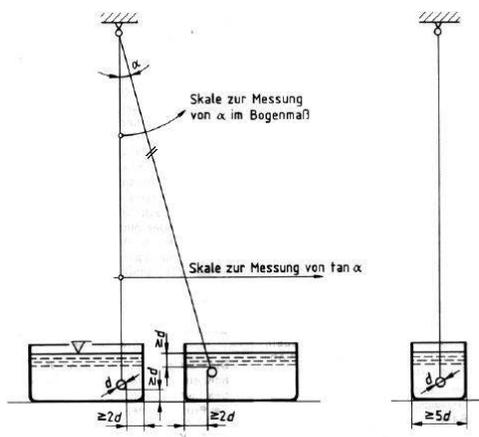
mit:

$\tau_{F(t,T)}$  Fließgrenze der Suspension [ $N/m^s$ ]

$d$  Durchmesser der Kugel [ $m$ ]

$\gamma$  Wichte der Kugel [ $kN/m^3$ ]

$\gamma_F$  Wichte der Bentonitsuspension [ $kN/m^3$ ]



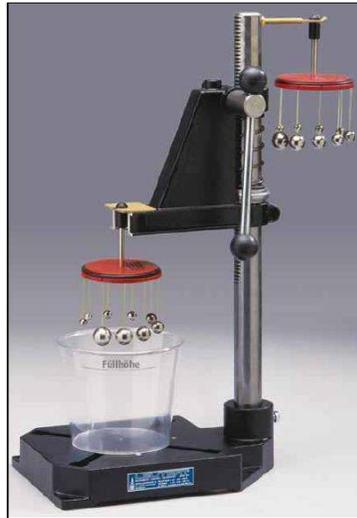
**Abbildung 2.16:** Schematische Darstellung eines Pendelgerätes [DIN 4126-100 1996]

Die Messung der Fließgrenze  $\tau_F$  mit diesem Gerät kann relativ zeitaufwendig werden. Zudem hängt der Messwert stark von dem Versuchsdurchführenden ab, was somit zu Schwierigkeiten in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse führen kann [Schulze, Brauns u. Schwalm 1991]. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde das Pendelgerät nicht eingesetzt.

### Kugelharfe

Die Kugelharfe nach von Soos (Abbildung 2.17) besteht aus 10 Glas- und Stahlkugeln unterschiedlichen Durchmessers, die mittels Nylonfäden an einer gemeinsamen Scheibe befestigt sind. Für die Messung wird die Scheibe so in eine Vorrichtung (z.B. Bohrständer) gehängt, dass sie langsam in lotrechter Richtung bewegt werden kann. Die zu prüfende Bentonitsuspension wird bis zu einer markierten Höhe in einen Probebehälter von einem Liter Volumen gefüllt und unter das Kugelharfengerät gestellt. Zum Abbau thixotroper Verfestigung wird, wie beim Versuch mit dem Pendelgerät, die Suspension zunächst vollständig umgerührt. Die Scheibe wird nun langsam so nach unten bewegt, dass die Kugeln die Oberfläche der Suspension nach der vorgegebenen Zeit der thixotropen Verfestigung erreichen.

Bei bekannter Dichte der Suspension ist jeder dieser Kugeln eine andere kritische Fließgrenze zugeordnet, bei der sie in der stützenden Flüssigkeit in Schwebelage bleiben. Kugeln mit einer kleineren kritischen Fließgrenze als die der vorhandenen Suspension schwimmen, Kugeln mit einer größeren kritischen Fließgrenze hingegen tauchen vollständig in die Suspension ein. Die Kugeln sind, sortiert nach wachsender kritischer Fließgrenze, durchnummeriert. Die Fließgrenze  $\tau_F$  der Bentonitsuspension liegt also zwischen der kritischen



**Abbildung 2.17:** Kugelharfe [Leutert 2007]

Fließgrenze der Kugel mit der größten Nummer, die noch schwimmt, und der kritischen Fließgrenze der Kugel mit der kleinsten Nummer, die eingetaucht ist. Die Fließgrenze  $\tau_F$  kann dann mit Hilfe der Dichte der Suspension und einer zum Kugelsatz gehörigen Tabelle bestimmt werden [DIN 4126-100 1996, DIN 4127 1986].

### **Rotationsviskosimeter**

Mit dem Rotationsviskosimeter ist es möglich, die Entwicklung der Schubspannung  $\tau$  in einer Flüssigkeit in Abhängigkeit vom Schergeschwindigkeitsgefälle  $D$  in sogenannten Fließkurven aufzuzeichnen. Aus diesen Fließkurven kann die gemessene Scherspannung zu jedem Schergefälle abgelesen werden. Die Fließgrenze einer Suspension entspricht der Schubspannung bei  $D = 0$  [Schulze, Brauns u. Schwalm 1991].



**Abbildung 2.18:** Rotationsviskosimeter [Phrikolat 2007]

Zur Ermittlung der Schubspannungen wird die Bentonitsuspension in einen feststehenden, zylindrischen Messbehälter gefüllt, in welchen ein Zylinder eingetaucht und zum Drehen gebracht wird (Abbildung 2.18). Zwischen dem drehbaren Innenzylinder und der Messbecherwand entsteht ein schmaler Ringspalt, in dem die Suspension einer definierten Fließbewegung unterworfen wird. Das Rotationsviskosimeter misst mit Hilfe einer Torsionsfeder das zum Drehen des in die Suspension getauchten Zylinders erforderliche Drehmoment. Hieraus können die an der Zylinderoberfläche wirkenden Schubspannungen berechnet werden [Walz 2000].

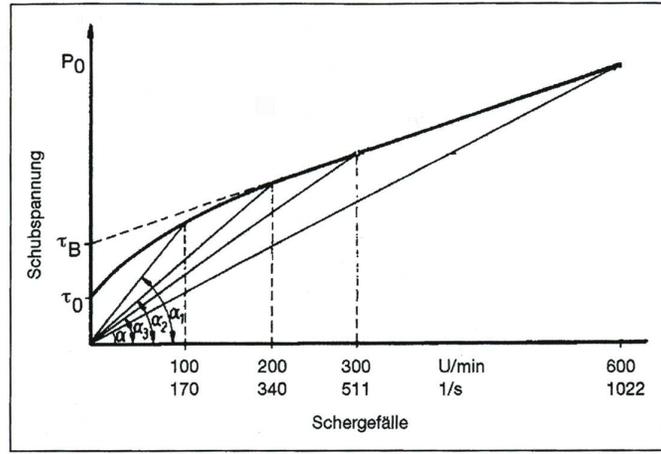


Abbildung 2.19: Fließkurve einer Bentonitsuspension [Elbe 2003]

Die Scherspannung  $\tau_D$  wird durch Interpolation zwischen Scherspannungen, die einem niedrigerem und einem höherem Geschwindigkeitsgefälle als  $D$  zugeordnet sind, und anschließender Reduktion nach folgender Gleichung ermittelt. Diese Gleichung gilt unter Annahme der Bingham'schen Fließfunktion im untersuchten Intervall. Die Formeln zur Berechnung der Schubspannung  $\tau_D$  sind in [DIN 4126-100 1996] aufgeführt:

$$\tau_D = k \cdot \tau' + D \cdot (1 - k) \frac{\tau_1 - \tau_2}{D_1 - D_2} \quad (2.7)$$

mit:

$\tau_D$  = Scherspannung [ $N/m^2$ ]

$k$  = Gerätekonstante nach Gleichung 2.8

$\tau'$  = nach Gleichung 2.9

$D$  = Geschwindigkeitsgefälle [ $s^{-1}$ ]

$\tau_1$  = Scherspannung bei  $D_1$  [ $N/m^2$ ]

$\tau_2$  = Scherspannung bei  $D_2$  [ $N/m^2$ ]

$D_1$  = Geschwindigkeitsgefälle  $> D$  [ $s^{-1}$ ]

$D_2$  = Geschwindigkeitsgefälle  $< D$  [ $s^{-1}$ ]

$$k = \frac{R^2 - r^2}{2 \cdot R^2 \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (2.8)$$

mit:

$R$  = Radius des äußeren Zylinders im Rotationsviskosimeter [m]

$r$  = Radius des inneren Zylinders [m]

$$\tau' = \frac{\tau_1 - \tau_2}{D_1 - D_2} \cdot (D_1 - D) \quad (2.9)$$

Für Bentonitsuspensionen ist das Rotationsviskosimeter allerdings nicht in der Lage die tatsächliche Fließgrenze, also den Punkt, an dem die Fließkurve die Abszisse berührt, anzugeben. Dieser Punkt ist schwer zu bestimmen, da die Kurve bei geringen Fließgeschwindigkeiten immer flacher wird und sich asymptotisch der Abszisse annähert (Abbildung 2.19).

Mit diesem Gerät werden die Schubspannungen für ein Schergefälle von 300  $U/min(rpm)$  und 600  $U/min(rpm)$  gemessen. Durch Extrapolation des linearen Teils der Fließkurve auf die Abszisse ergibt sich die sogenannte Bingham-Fließgrenze  $\tau_B$  [Möbius 1977]. Die Beschreibung der Versuchsdurchführung sowie die Formeln für die Berechnung sind in der Norm des American Petroleum Institute [API 13 B-1 1997] angegeben:

$$\tau_B = [300rpm] - ([600rpm] - [300rpm]) \quad (2.10)$$

Rotationsviskosimeter sind sehr empfindliche Messgeräte, die für den Betrieb auf Baustellen nicht geeignet sind. Zudem sind sie sehr teuer, erfordern eine gründliche Einweisung und viel Sorgfalt bei der Durchführung der Versuche. Ihr Einsatz beschränkt sich daher zumeist auf Laboratorien, wo sich diese Geräte durch eine hohe Genauigkeit und gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auszeichnen [Schulze, Brauns u. Schwalm 1991].

#### 2.4.4 Viskosität

Generell kann die Viskosität  $\eta$  rein viskoser (newtonscher) Flüssigkeiten, die keine Fließgrenze haben, wie bereits erläutert, mit dem Rotationsviskosimeter gemessen werden. Da Bentonitsuspension ein von newtonschen Flüssigkeiten abweichendes Fließverhalten aufweisen, kann die Viskosität  $\eta$  nur in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit bestimmt werden. Für Bentonitsuspensionen wurden daher zwei Angaben als Maß für die Viskosität festgelegt: die scheinbare und die plastische Viskosität.

Beide Werte werden anhand des Rotationsviskosimeters ermittelt. Die Versuchsdurchführung und die Formeln für die Berechnung sind in der [API 13 B-1 1997] angegeben. Es sind die Schubspannungen für ein Schergefälle von 300  $U/min(rpm)$  und 600  $U/min(rpm)$  zu bestimmen. Aus den notierten Werten berechnet sich die Viskosität wie folgt:

plastische Viskosität:

$$\eta_P = [600rpm] - [300rpm] \quad (2.11)$$

scheinbare Viskosität:

$$\eta_S = \frac{600rpm}{2} \quad (2.12)$$

Da das Rotationsviskosimeter ein sehr empfindliches Gerät ist, werden diese Messungen im Labor durchgeführt. Für die Überprüfung auf der Baustelle kann die differentielle Viskosität  $\eta'$  mit Hilfe des Marsh-Trichter-Versuches ermittelt werden.

### 2.4.5 Gelstärke

Die Gelstärke ist ebenfalls eine Bezeichnung für die Scherfestigkeit einer Bentonitsuspension. Ein Messgerät zur Bestimmung der Gelstärke ist das Shearometer. Alternativ kann die Ermittlung auch mit dem Rotationsviskosimeter erfolgen. Der Messung der Gelstärke und der Fließgrenzenmessung nach [DIN 4127 1986] liegen unterschiedliche Verfahren zugrunde. Während die Fließgrenze nach [DIN 4127 1986] mit Hilfe von Kugeln bestimmt wird, erfolgt die Messung der Gelstärke anhand von Zylindern. Die Messwerte aus den Verfahren unterscheiden sich voneinander. Die unterschiedlichen Versuchsgeräte liefern keinen einheitlichen Absolutwert für die Scherfestigkeit [Walz 2000, Ruppert 1980].

#### Shearometer

Beim Shearometer handelt es sich um einen mit einer Skala versehenen Becher, in den die Bentonitsuspension gefüllt wird. Für die Versuchsdurchführung wird ein genormter, oben und unten offener, 5 g schwerer Metallzylinder (Abbildung 2.20) längs in einer Führung in die Suspension eingetaucht. Der Zylinder kommt zum Stillstand, wenn das Integral der Fließgrenzschubspannung über die eingetauchte Zylinderoberfläche (innen und außen) gleich dem Gewicht des Zylinders ist. An der Skala kann nun die Eindringtiefe des Zylinders abgelesen werden. Diese entspricht direkt der Gelstärke  $t_{GS}$  der Suspension. In diesem Zusammenhang wird auch von der Shearometer-Gelstärke gesprochen [Möbius 1977, Walz 2000].

Der Zahlenwert der Shearometer-Gelstärke  $\tau_{GS}$  steht in einem direkten Zusammenhang zur Fließgrenze  $\tau_F$ . Dieser Zusammenhang wurde in experimentellen Untersuchungen von [Ruppert 1980] bestimmt und ist in Abbildung 2.21 dargestellt. Da beim Shearometer neben der Scherfestigkeit auch ein Viskositätsanteil gemessen wird, ist dieser funktionale Zusammenhang von der Bentonitsorte abhängig [Ruppert 1980].

Ein Nachteil des Shearometers liegt in dem nach unten begrenzten Messbereich. Die bei feinkörnigen Böden oft verwendeten dünnflüssigen Bentonitsuspensionen können mit diesem Gerät nicht gemessen werden. Daher ist das Shearometer für baupraktische Zwecke nur begrenzt verwendbar [Möbius 1977].

#### Rotationsviskosimeter

Die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Gelstärke mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters ist in der [API 13 B-1 1997] geregelt.



Abbildung 2.20: Shearometer

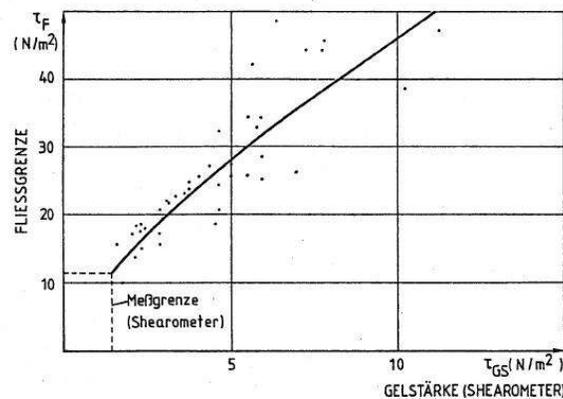


Abbildung 2.21: Zusammenhang zwischen Gelstärke (Shearometer) und Fließgrenze [Ruppert 1980]

Zunächst wird die zu untersuchende Flüssigkeit zum Abbau thixotroper Verfestigung 10 Sekunden bei höchster Geschwindigkeit durchgerührt. Gleich darauf wird das Viskosimeter ausgeschaltet, so dass sich die Suspension in Ruhe befindet. Nach einer Ruhezeit von 10 Sekunden wird es dann auf 3 Umdrehungen pro Minute (die kleinste einstellbare Drehzahl) hochgeschaltet und der maximale Ausschlag des Zeigers notiert. Dieser Anzeigewert wird als Maß für die Scherspannung betrachtet, bei welcher die gebildete Gelstruktur gebrochen wird. Dieser Vorgang wird mit einer Ruhezeit von 10 Minuten wiederholt. Bei Bentonitsuspensionen ist im Normalfall der später gemessene Wert wesentlich höher als der erste. Der Grund hierfür liegt in der Thixotropie. Der Unterschied dieser beiden Zahlenwerte wird demzufolge als Maß für die Thixotropie angesehen und auch als Thixotropiewert bezeichnet [Möbius 1977].

### 2.4.6 pH-Wert

Der pH-Wert ist ein indirektes Maß für die Anzahl der Wasserstoffionen, die sich in einem Liter Flüssigkeit befinden [Elbe 2003]. Er beeinflusst

- die Stabilität der Suspension,
- das Fließverhalten,
- die Gelstärkenentwicklung und
- das Wasserbindevermögen.

Die Messung des pH-Wertes einer Bentonitsuspension kann durch die Farbreaktion eines Indikatorstreifens erfolgen (Abbildung 2.22). Die vier Felder auf dem Messstreifen ändern beim Eintauchen in die zu untersuchende Flüssigkeit ihre Färbung. Durch Abgleich des Messstreifens mit einer Farbtabelle kann der ungefähre pH-Wert abgelesen werden. Für Bentonitsuspensionen sollten Indikatorstreifen mit einer Skalenabstufung für den Bereich von 0 bis 14 verwendet werden.

In der Schlitzwandtechnik muss nach [DIN EN 1538 2000] der pH-Wert von Bentonitsuspensionen zwischen 7 und 11 liegen. Bei Bohrspülungen liegt der ideale Bereich zwischen 8,5 und 12. Für das Anmachwasser sollte der pH-Wert stets 7 betragen [Elbe 2003].

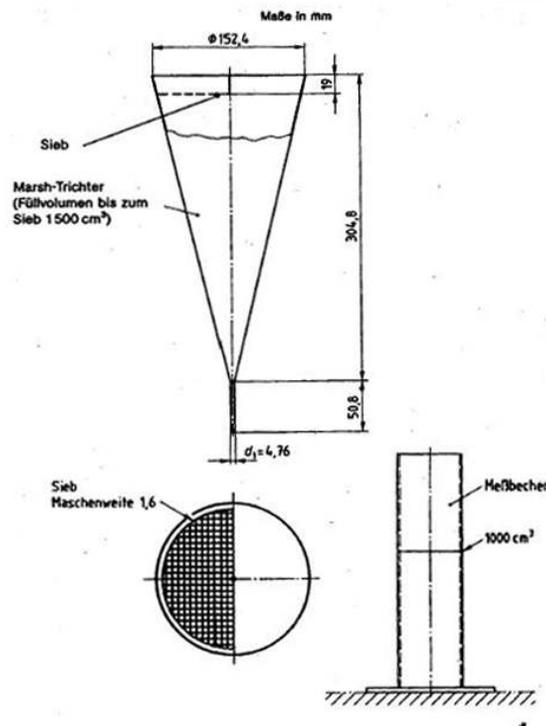


Abbildung 2.22: pH - Indikatorstärchen [Phrikolat 2007]

### 2.4.7 Eigenschaftsbestimmung mittels Marsh-Trichter

Auf Baustellen werden die Fließeigenschaften von Bentonitsuspensionen mit dem Marsh-Trichter beurteilt. Es wird die Auslaufzeit  $t_M$  gemessen, die  $1000 \text{ cm}^3$  der Suspension brauchen, um aus dem Marsh-Trichter auszulaufen. Dieser Wert ist eine Funktion der Dichte, Fließgrenze und der Viskosität und dient zur schnellen Überprüfung, ob sich die Fließeigenschaften relativ zu einem Ausgangswert verändert haben. Da es möglich ist, aus

den Auslaufzeiten verschiedener Volumina derselben Flüssigkeit Rückschlüsse auf dessen Fließfunktionen zu ziehen, eignet sich dieses Verfahren außerdem, um Aussagen über die dynamische Fließgrenze  $dyn\tau_F$  und die differentielle Viskosität  $\eta'$  zu treffen. Hierzu wird neben der Auslaufzeit  $t_M$  noch die Zeit  $t_{M1500}$  benötigt, die der Trichter bis zu seiner vollständigen Entleerung braucht [DIN 4126-100 1996, Walz 2000].

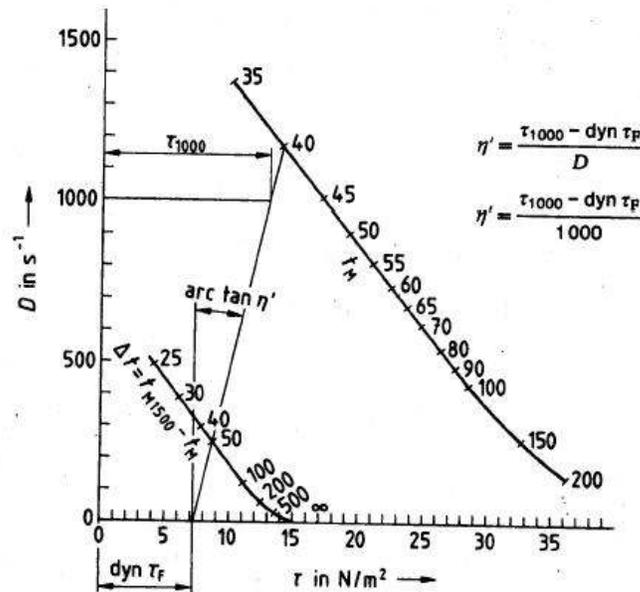


**Abbildung 2.23:** Schematische Darstellung des Marsh-Trichters [DIN 4126-100 1996]

Die Abmessungen des Trichters sind in der [DIN 4126-100 1996] genormt (Abbildung 2.23). Dieser Trichter ist bis zu einer Füllmarke mit  $1500 \text{ cm}^3$  der zu überprüfenden Flüssigkeit zu befüllen. Der Marsh-Trichter muss senkrecht stehen, sauber und trocken sein und unten mittels Fingerdruck verschlossen werden. Die Suspension muss vor dem Messen bis zur vollständigen Beseitigung der thixotropen Verfestigung kräftig umgewälzt und dann zügig durch das eingebaute Sieb gegossen werden, um sie von groben Steinchen zu befreien. Ohne Pause wird nun der Auslauf des Trichters wieder freigegeben und mit einer Stoppuhr gemessen, wie lange die Flüssigkeit braucht, um den Messbecher mit  $1000 \text{ cm}^3$  zu füllen. Diese Zeit ist die Marsh-Zeit  $t_M$ . Eine weitere Marsh-Zeit  $t_{M1500}$  wird in dem Moment gestoppt, in dem der Trichter leer läuft.

Mit diesen beiden Werten kann die dynamische Fließgrenze  $dyn\tau_F$  aus dem Diagramm in Abbildung 2.24 abgelesen und daraufhin die differentielle Viskosität  $\eta'$  berechnet werden. Sollte zu irgendeinem Zeitpunkt des Versuchs der kontinuierliche Ausfluss aus dem Trichter abreißen und die Suspension noch tropfenweise oder gar nicht mehr austreten, ist die Zeit sofort zu stoppen. Die gestoppte Zeit ist dann mit einem >-Zeichen zu versehen und das bis zu diesem Zeitpunkt bereits ausgelaufene Volumen in Klammern dahinter zu vermerken, z.B.  $> 83\text{s} (1360\text{cm}^3)$  [DIN 4126-100 1996]. Gemäß [DIN EN 1538 2000] sollte die

Marsh-Zeit einer stützenden Flüssigkeit im frischen Zustand zwischen  $t_M = 32\text{s}$  und  $t_M = 50\text{s}$  betragen. Der vergleichbare Wert von Wasser liegt bei  $t_M = 28\text{s}$ . Für Flüssigkeiten mit  $\text{dyn}\tau_F = 44\text{N/m}^2$  wird  $t_M = 8\text{s}$  [DIN 4126-100 1996].



**Abbildung 2.24:** Bestimmung der dynamischen Fließgrenze  $\text{dyn}\tau_F$  und der differentiellen Viskosität  $\eta'$  mit dem Marsh-Trichter [DIN 4126-100 1996]

Ein Nachteil des Marsh-Trichters ist, dass bei Bentonitsuspensionen die Einflüsse von Fließgrenze  $\tau_F$  und differentieller Viskosität  $\eta'$  auf die Auslaufzeit nicht klar voneinander getrennt werden können. Eine Fließgrenze  $\tau_F$  kann daher mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung ist der Marsh-Trichter vorwiegend für schnelle Routinemessungen und die Suspensionsüberwachung auf Baustellen geeignet [DIN 4126-100 1996; Schulze, Brauns u. Schwalm 1991].

# Kapitel 3

## Grundlagen der Polymere

### 3.1 Definition und Entstehung

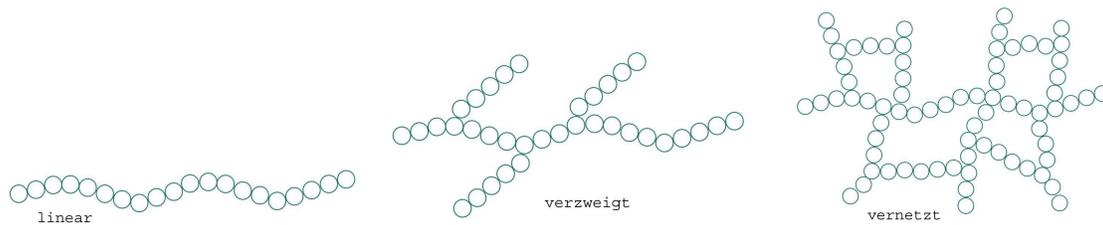
Das Wort *Polymer* leitet sich aus dem altgriechischen ab und setzt sich zusammen aus *Poly* = *viel* und *meros* = *Teil*.

Im Sinne des Chemikaliengesetzes ist ein Polymer ein Stoff, dessen Moleküle aus verketteten, gleichen Untereinheiten (Monomer = eine Einheit oder Grundbaustein) zusammengesetzt ist (vergleiche ChemG 3.3a). Daher gibt es auch Moleküle, wie zum Beispiel Dimere, Trimere oder Tetramere, welche dementsprechend aus zwei, drei bzw. vier Untereinheiten zusammengesetzt sind. Eine weitere Form von Polymeren bilden Oligomere, die aus zwei bis etwa zehn Monomeren zusammengesetzt sind. Das Wort leitet sich aus dem Griechischen *Oligo* wie *einige* her. Daher sind Di-, Tri- und Tetramere alle auch Oligomere.

Ein Polymer ist ein Gebilde aus gleichen oder gleichartigen Grundbausteinen (Monomere), welche über verschiedene Reaktionen miteinander verknüpft werden können. Deshalb wurde und wird immer noch der Name Makromolekül verwendet, der im Grunde nur eine andere Bezeichnung für den Begriff Polymer ist.

Die grundlegende Eigenschaft von Polymeren ist ihr großes Molekulargewicht, welches sie von anderen Substanzen unterscheidet. Die weiteren Eigenschaften des jeweiligen Polymers hängen von der chemischen Zusammensetzung und von der molekularen Größe des Moleküls ab.

Der Prozess der Polymerisation beschreibt die Bildung von Polymeren aus den einzelnen Grundbausteinen (Monomeren). Dabei können Polymere in unterschiedlichen architektonischen Formen vorkommen. In Abbildung 3.1 sind in vereinfachter Form drei Arten von Polymeren dargestellt. Polymere sind Verknüpfungen von Grundbausteinen (hier dargestellt durch Kreise), die durch die Art der Verbindung verschiedene Formen aufweisen können. Sie können zum einen linear (Abbildung 3.1 links) angeordnet oder durch herabhängende Arme verzweigt (Abbildung 3.1 Mitte) sein. Schließlich können Untereinheiten auch miteinander vernetzt (Abbildung 3.1 rechts) vorliegen.



**Abbildung 3.1:** Polymerformen: links: linear, Mitte: verzweigt, rechts: vernetzt

Auf chemischer Ebene werde Polymere nach ihrer Zusammensetzung klassifiziert und in zwei Gruppen unterteilt:

- Homopolymere
- Heteropolymere

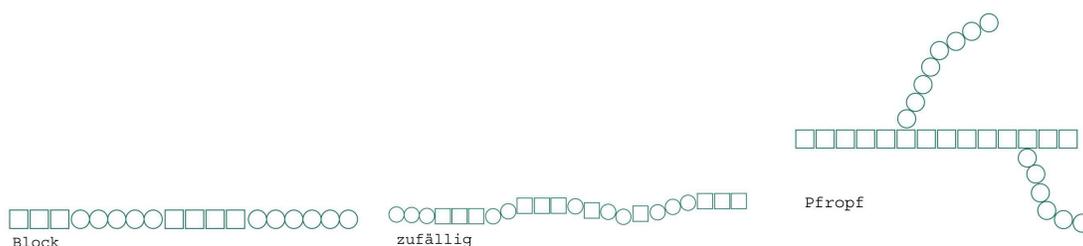
Homopolymere bestehen aus einer Art von Grundbausteinen; Heteropolymere aus verschiedenen Arten. Handelt es sich um verschiedene Grundbausteine - also nicht um gleichartige Monomere - aus denen ein Molekül zusammengesetzt ist, so werden diese auch als Hetero- oder Copolymer bezeichnet. Copolymere sind synthetisch hergestellte Heteropolymere. Hierbei wird das Molekül aus einer Mischung von Monomeren synthetisiert.

Heteropolymere werden nach der Art der Untereinheitenzusammenstellung differenziert und unterschieden in:

- isotaktische,
- ataktische und
- syndiotaktische Polymere.

Isotaktische Polymere besitzen eine geordnete, gleichlaufende Reihenfolge der Untereinheiten (z.B. eine Untereinheit R-R-R-R-). Bei ataktischen Polymeren ist die Reihenfolge der Untereinheiten (R bzw. S) wahllos (R-S-R-R-S-R-S-S-) und bei syndiotaktischen Polymeren liegt eine abwechselnde Reihenfolge vor (-R-S-R-S-).

Bei der Zusammenlagerung von Polymeren können verschiedene Arten von Untereinheitenfolgen auftreten. Im ersten Fall können die Untereinheiten als Blöcke von unterschiedlicher Länge im Polymer auftreten (Abbildung 3.2 links). Desweiteren können die Untereinheiten zufällig angeordnet sein (Abbildung 3.2 Mitte), so dass sowohl in der Hauptkette als auch in den Verzweigungen dieselben oder verschiedenartige Monomeruntereinheiten auftreten. In einem weiteren Fall kann ein sogenanntes Pfropf-Copolymer gebildet werden (Abbildung 3.2 rechts). Dieses besteht aus einem Homo- oder ein Heteropolymer Rückgrat mit einem Homo- oder Heteropolymer aus unterschiedlicher Zusammensetzung, das an verschiedenen Stellen zufällig angehängt ist.



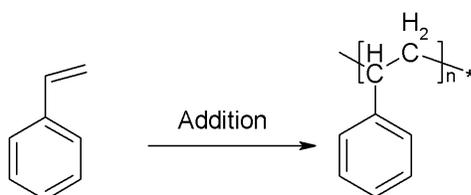
**Abbildung 3.2:** Heteropolymerformen: links: Block, Mitte: zufällig, rechts: Pfropf

Der Mechanismus der Polymerisation wird klassischer Weise in zwei Arten unterschieden, die Polykondensation und die Polyaddition (Carothers, W.H., 1929). Bei der Polykondensation kommt es zur Eliminierung eines kleinen Moleküls, wie Wasser oder eines Alkohols. Die Polykondensation beschreibt die Kondensation zwischen Verbindungen mit mindestens zwei reaktionsfähigen Gruppen, wie z.B. Carboxyl-, Amino- und Hydroxylgruppen. Hierbei entstehen kettenförmige oder vernetzte Makromoleküle, die Reste der Moleküle der Ausgangsstoffe abwechselnd enthalten. Eine typische Reaktion ist die Bildung eines Polyesters (Abbildung 3.3).



**Abbildung 3.3:** Polykondensation

Die Polyaddition hingegen ist eine chemische Reaktion, bei der hochpolymere Stoffe aus kleinen Molekülen aufgebaut werden. Dabei treten reaktionsfähige Gruppen der Moleküle zusammen, im Gegensatz zur Polykondensation aber ohne Abspaltung anderer Stoffe. Von der Polymerisation unterscheidet sich die Polyaddition durch den komplizierten Reaktionsmechanismus. Bei einer Additionsreaktion erfolgt die Polymerisation ohne die Eliminierung eines Moleküls, wie im Beispiel von Styren in Abbildung 3.4 gezeigt:



**Abbildung 3.4:** Polyaddition

Die Definition der Mechanismen der Polymerisation als Addition oder Kondensation kann zum Teil recht ungenau werden, vor allem, wenn es sich um die Bildung eines natürlichen

Polymere handelt. Ein weiteres Problem, das bei der Definition über den Mechanismus der Polymerisation entstehen kann, tritt auf, wenn die Reaktion formell betrachtet eine Additionsreaktion ist, das Produkt aber strukturell einem kondensierten Polymer gleicht. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3.5 [SZWARC 1968]:

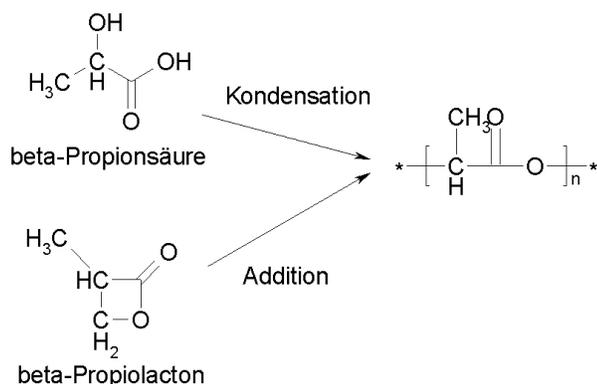


Abbildung 3.5: Polyaddition und Polykondensation

Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, besteht darin, Polymere nach der Rückreaktion zu definieren, die notwendig ist, um die Polymerisation umzukehren (Depolymerisation) oder nach den Monomeruntereinheiten zu charakterisieren, in die sie sich spalten lassen [FLORY 1953]. Eine ausführliche Übersicht bietet [BOLKER 1971].

## 3.2 Polymerarten

In der Natur kommen Polymere in nahezu unbegrenzter Menge vor. Zu den **natürlichen Polymeren** zählen die Polysaccharide, wie z.B. Stärke, Cellulose oder Proteine. **Synthetisch** werden Polymere durch Polymerisation, d.h. durch Polykondensation oder Polyaddition, erzeugt. Unter synthetische Polymere fallen Stoffe wie Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyamid (PA).

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Polymere sind im wesentlichen durch die atomare Zusammensetzung der Monomere, den Polymerisationsgrad und die Struktur der Kettenmoleküle bestimmt. Der Polymerisationsgrad berechnet sich aus der Anzahl der Monomere eines Makromoleküls. Langkettige Makromoleküle besitzen somit einen höheren Polymerisationsgrad als kurzkettige. Mit steigendem Polymerisationsgrad nimmt das Wasserbindevermögen des Polymers zu.

Zur gezielten Beeinflussung von Suspensionen können sowohl **chemisch aktive** als auch **chemisch nicht aktive** Additive hinzugefügt werden. Chemisch aktive Additive werden der Suspension mit dem Ziel beigegeben, das Fließ-, Eindring- und Stabilitätsverhalten zu verändern. Demgegenüber stehen die chemisch nicht aktiven, inerten Feststoffe, die der Suspension mit dem Ziel beigegeben werden, vorzugsweise die Dichte und das Verstopfungsverhalten zu verändern.

### 3.3 Polymere als chemisch aktive Additive

Chemisch aktive Additive einer Suspension lassen sich zur genaueren Beschreibung in drei funktionelle Gruppen unterteilen:

- Viskositätsregulierer (Viscosifier)
- Filtratreduzierer (Filtrate Reducer)
- Verflüssiger (Thinner)

Wie im Folgenden erläutert, ist eine diskrete Abgrenzung der einzelnen Eigenschaften nicht in allen Fällen gewährleistet, da diese häufig miteinander verbunden sind. So ist zum Beispiel die Viskositätsregulierung durch die Bildung eines Gels gekennzeichnet, die aber zumeist auch gleichzeitig den Verlust von Filtratwasser in den umliegenden Boden verhindert. Zudem haben viele Polymere je nach Einsatzmenge unterschiedliche Funktionen, da sie je nach Konzentration teilweise flokkulierend oder gelbildend wirken können.

#### 3.3.1 Viskositätsregulierer

Viskositätsregulierer werden Suspensionen mit dem Ziel hinzugefügt, eine Gelstruktur aufzubauen und somit die Viskosität zu erhöhen. Ein Polymergel ist ein in einem flüssigen Medium gequollenes polymeres Netzwerk. Die genauen Eigenschaften dieses Gels sind dabei abhängig von den Wechselwirkungen zwischen dem Netzwerk und der umliegenden Flüssigkeit. Ein Beispiel hierfür bilden Hydrogele, die aus einem hydrophilen (wasserliebendem) Polymer mit Wasser als Quellmedium bestehen. Das polymere Netzwerk und die Wassermoleküle besitzen eine Affinität, durch die das Gel stabilisiert wird. Diese Affinität wird zum einen durch die Hydratationsenergie hervorgerufen, die es erlaubt, dass sich die Wassermoleküle anlagern. Zum anderen spielt die Polymerentropie eine entscheidende Rolle, die zur Entfaltung des Polymers führt.

Durch das Entfalten des zunächst zusammengelagerten Polymerstranges können sich die Wassermoleküle anlagern. Ein Beispiel für solche Gelbildner sind die **natürlichen und modifizierten organischen Verdicker**, wie zum Beispiel Polysaccharide. Sie formen durch die Ausbildung von Wasserstoffbrücken recht stabile Hydrogele. Eine andere Art von Gelbildnern sind **assoziative Verdicker**, die nicht von sich aus ein Netzwerk bilden sondern durch die Anlagerung von in der Flüssigkeit vorliegender Teilchen. Diese Stoffe haben sowohl hydrophile als auch hydrophobe Eigenschaften. Hierunter fallen zum Beispiel Polyacrylamide und Zelluloseether sowie hydrophob modifizierte Polyacrylate.

Viskositätsregulierer bestehen aus

- natürlichen,
- modifizierten organischen oder
- synthetischen Makromolekülen.

Die natürlichen Viskositätsregulierer lassen sich weiter unterteilen in

- organische (kohlenstoffhaltige) und
- anorganische (nicht kohlenstoffhaltige) Moleküle.

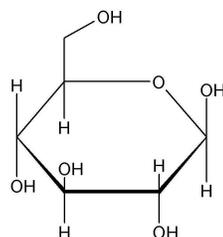
Unter natürliche organische Viskositätsregulierer fallen zum Beispiel Polysaccharide, lange Zuckerketten also, wie Stärke (vgl. Kapitel 3.3.1.1, Xanthan Gum (vgl. Kapitel 3.3.1.2) und Guar Gum (vgl. Kapitel 3.3.1.3). Natürliche anorganische Verdicker sind zum Beispiel Silikate, wie das Bentonit.

Modifizierte Viskositätsregulierer sind natürliche Stoffe, die über chemische Reaktionen verändert wurden, um abgeänderte chemische oder physikalische Eigenschaften zu erhalten. Hierunter fallen zum Beispiel verschiedene Zellulosen, die durch eine Polymerreaktion modifiziert wurden, zum Beispiel Methylzellulose (MEC), Hydroxymethylzellulose (HEC) oder Carboxymethylzellulose (CMC) (vgl. Kapitel 3.3.1.4).

Synthetische Viskositätsregulierer sind Stoffe, wie Polyacrylamid, Polyvenylalkohol oder Polyethylenglycol (vgl. Kapitel 3.3.1.5) .

### 3.3.1.1 Stärke

Stärke ist ein Polysaccharid, oder auch Kohlenhydrat genannt, dass vorwiegend in Pflanzen zu finden ist. Polysaccharide werden durch mehrfach aneinander geketteten Untereinheiten gebildet. Im Fall der Stärke bestehen die Untereinheiten aus Glukose (Abbildung 3.6).

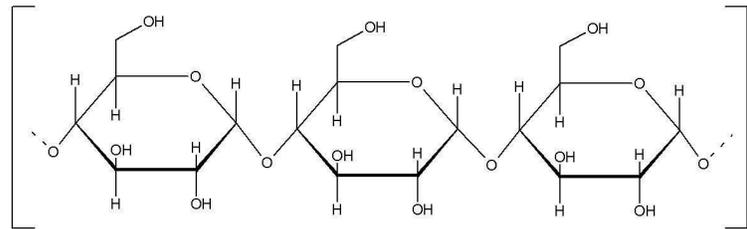


**Abbildung 3.6:** Glukosemolekül in der Ringformation

Glukose ist die Grundeinheit der Stärke. Sie besteht aus einem 6-Ring mit fünf Kohlenstoffatomen an den Ecken und einem Sauerstoffatom. Die Seitenketten bestehen aus Hydroxydgruppen und einer Methylhydroxydgruppe. Diese Glukoseuntereinheiten sind miteinander verknüpft und bilden so das Polymernetzwerk aus. Dabei kann es zu unterschiedlichen Verbindungen zwischen der Glukoseuntereinheiten kommen, die von den verschiedenen Kohlenstoffatomen (C-Atom) aufgebaut werden.

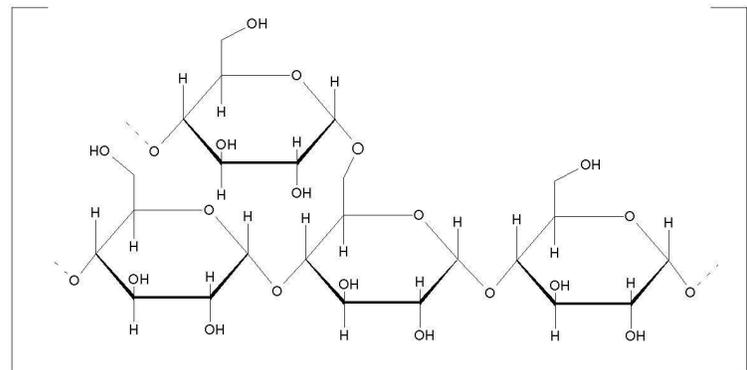
Bei Amylopektin (Abbildung ) zum Beispiel sind die Ketten über die an den Enden befindlichen Kohlenstoffatome oder zeitweilig auch über das rausragende C-Atom verknüpft; dadurch kann es zu einer weit verzweigten Struktur kommen. Anders ist dies bei Amylose (Abbildung 3.7), die Verbindung ist ausschließlich über die an den Enden liegenden

C-Atome aufgebaut, so dass ein lineares Polymermolekül entsteht. Durch Verknüpfung der verschiedenen langkettigen Polymermoleküle (Amylopektin und Amylose) kann dann Stärke gebildet werden.



**Abbildung 3.7:** Amylose als Bestandteil der Stärke

Wie in Abbildung 3.7 zu sehen, besteht die Amylose aus Glukosemolekülen, die linear über 1-4-C-Bindungen verkettet sind. Amylose ist in kaltem Wasser schlecht löslich. Durch Erwärmen kommt es zur Quellung und zur Ausbildung einer Art Stärkekleister. Unter Rühren wird die Viskosität des Kleisters erhöht, während es zu einer Gelbildung kommt, wenn nicht gerührt wird.



**Abbildung 3.8:** Amylopektin als Bestandteil der Stärke

Amylopektin ist ein weiterer Bestandteil von Stärke. Er zeichnet sich ebenso wie die Amylose durch Glukose als Grundeinheit aus, die auch über 1-4-C-Bindungen lange Ketten bildet. Zudem kommt es aber durch zusätzliche 1-6-C-Bindungen an allen 15-30 Glukosemolekülen zu Verzweigungen zwischen den linearen Ketten, wodurch sich eine Art Netzwerk bildet. Amylopektin ist in heißem Wasser gut löslich und bildet eine klare, hochviskose Lösung. Stärke ist, wie bereits erwähnt, eine Mischform aus den beschriebenen Glukosepolymeren. Dabei besteht die Zusammensetzung je nach Stärkeform aus 30-40% Amylose und zum Großteil aus Amylopektin.

In Suspensionen wird Stärke eingesetzt, um Filtration und damit Wasserverluste zu verhindern. Dabei ist stets zu beachten, dass Stärke als natürlich vorkommendes Polymer immer dem Abbau durch eine Vielzahl von Microorganismen, wie z.B. Bakterien, ausgesetzt ist, wenn das Bentonit nicht durch Salze einen hohen pH-Wert von etwa 12 besitzt

oder durch die Zugabe von Bioziden (zum Beispiel Paraformaldehyd) dem Abbau durch Mikroorganismen vorgebeugt wird.

Zudem ist Stärke durch Hitze und Agitation degradierbar. Wie auch viele andere organische Polymere wird Stärke durch die Anwesenheit von Calcium co-präzipitiert.

### 3.3.1.2 Xanthan Gum

Xanthan ist ein Polysaccharid, das aus *Xanthomonas campestris* sowie einigen verwandten Mikroorganismenarten gebildet wird (Abbildung 3.9). Xanthan besteht aus D-Glucose, D-Mannose und D-Galacturonsäure im molaren Verhältnis 2,8:2:2.

Das Polysaccharid zeichnet sich durch eine gute Löslichkeit in Wasser aus und bildet dabei eine Lösung mit hoher Viskosität, die über pseudoplastische Eigenschaften verfügt. Zudem ist die Viskosität von Xanthan und Gelen mit Xanthan-Zusätzen weitgehend temperaturunabhängig.

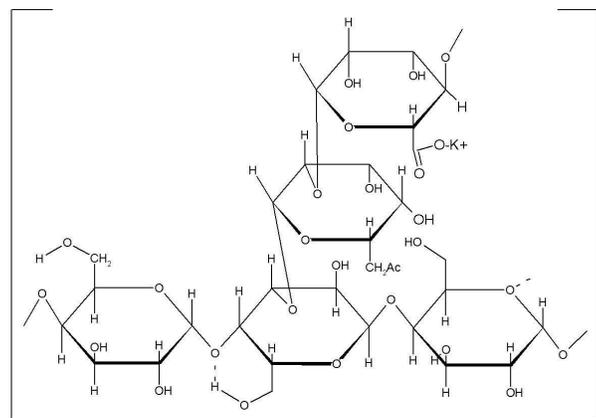


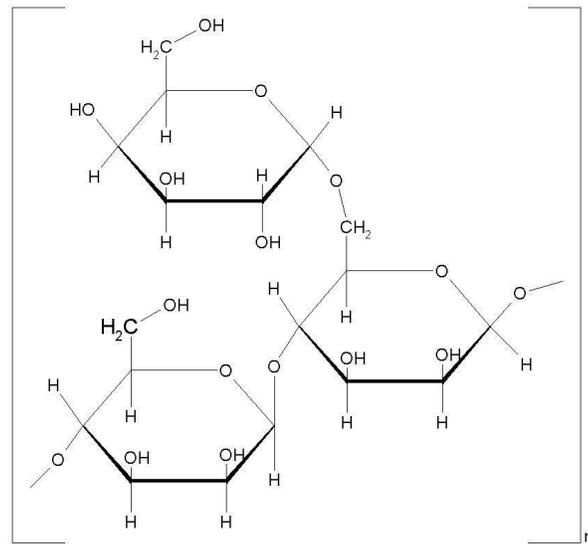
Abbildung 3.9: Struktur von Xanthan Gum

Den Hauptanwendungsbereich in der Suspension findet Xanthan Gum als suspendierendes Additiv. Hierfür genügen bereits geringe Konzentrationen des Biopolymers. Obwohl es nicht als Filtratreduzierer wirkt, kann es zusammen mit filtratreduzierenden Substanzen wie CMC und Bentoniten eingesetzt werden.

### 3.3.1.3 Guar Gum

Guar Gum ist ein natürlicher Viskositätsregulierer auf Polysaccharid-Basis. Es wird aus den Samen von *Cyamopsis tetragonolba* (Leguminose) gewonnen und besteht aus dem Polysaccharid Guar (Abbildung 3.10). Dieses setzt sich wiederum aus 1,4-verknüpften  $\beta$ -D-Mannopyranosylresten zusammen, die an etwa jeder zweiten Untereinheit über 1,6-Verbindungen  $\alpha$ -D-Galaktopyranose gebunden haben.

Die Zugabe von Guar Gum in Suspensionen bewirkt die Bildung einer hoch viskosen Lösung. Dabei wird Guar Gum auch eingesetzt, um die Filtrationsrate zu reduzieren und die Bohrlochstabilität zu erhöhen.



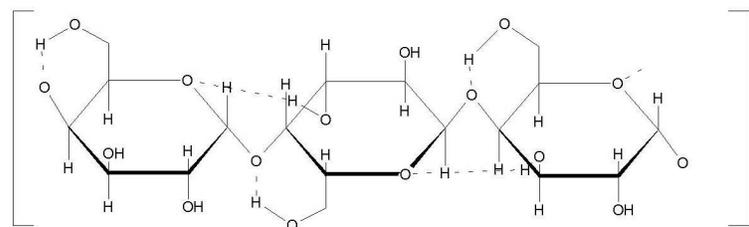
**Abbildung 3.10:** Struktur des Guarans als Bestandteil von Guar Gum

Das Biopolymer ist hitzelabil und degradiert bei Temperaturen oberhalb von 65°C. Eine Erhöhung der Temperatur führt demnach zu einer Reduzierung der Viskosität. Wie auch Stärke wird Guar Gum von Mikroorganismen abgebaut, wenn kein Schutz durch einen hohen pH-Wert oder Biozid-Zusatz gewährleistet ist.

Geringe Konzentrationen von Guar Gum bewirken eine Flokkulation von Bohrklein. Borat Ionen vernetzen das hydratisierte Guar Gum und führen so zu extrem viskosen Suspensionen bei bereits geringen Konzentrationen des Polymers.

### 3.3.1.4 Modifizierte Zellulosen (MEC, HEC, CMC)

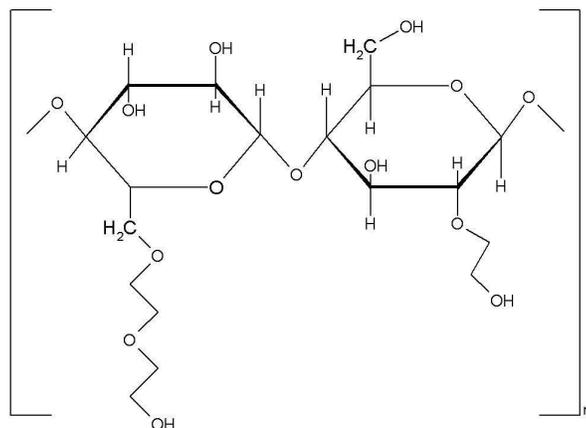
Zellulosen bestehen aus  $\beta$ -Glukopyranose-Untereinheiten, die, wie bei der Stärke, über 1-4-Bindungen verknüpft sind und somit eine Kettenstruktur aufbauen. Diese Ketten sind teilweise gefaltet, was zu intramolekularer Stabilisierung durch Wasserstoffbrückenbildung zwischen O(4) und O(6) sowie zwischen O(3) und O(5) führt (Abbildung 3.11).



**Abbildung 3.11:** Aufbau der Zellulose

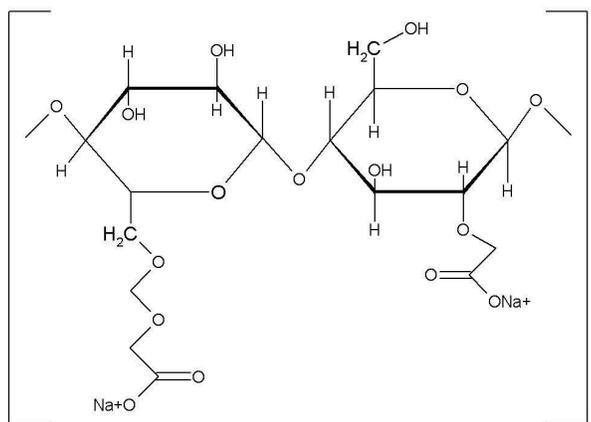
Durch die intramolekularen Wasserstoffbrücken (gestrichelte Linien in Abbildung 3.11) erhält die Zellulose eine sehr geordnete und stabile Struktur. Sie ist daher nicht in Wasser

löslich und besitzt auch nur ein geringes Quellvermögen. Durch chemische Reaktionen (zum Beispiel durch Alkylierungen) kann die Zellulose in eine Reihe von Derivate umgewandelt werden. Darunter fallen die Hydroxyethylzellulose (HEC siehe Abbildung 3.12) oder Carboxymethylzellulose (CMC siehe Abbildung 3.13), die sich durch unterschiedliche Seitenketten auszeichnen.



**Abbildung 3.12:** Strukturformel von Hydroxyethylzellulose (HEC)

Die Hydroxyethylzellulose (HEC) ähnelt der Carboxymethylzellulose (CMC) im strukturellen Aufbau, ist aber nicht-ionisch und daher besonders effektiv im Einsatz als Viskositätsregulierer und Filtratreduzierer bei salzhaltigen Lösungen. Die Reaktion von Hydroxyl-Gruppen des Zellulose-Polymers mit Ethylenoxid erzeugt Hydroxyethyl-Gruppen. Einige davon können weiter mit Ethylenoxid reagieren. Die Viskosität von HEC-Lösungen steigt mit dem Molekulargewicht des Polymers. Magnesiumoxid stabilisiert die verdickenden Eigenschaften von HEC.



**Abbildung 3.13:** Strukturformel von Natrium-Carboxymethylzellulose mit einer Substitution

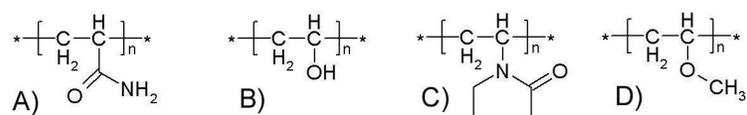
Natrium-Carboxymethylzellulose ist ein anionisches Polymer, das von den Tonpartikeln adsorbiert wird. Bei niedrigen Konzentrationen wirkt CMC als Filtrationsreduzierer, besonders bei den hochmolekularen Carboxymethylzellulosen.

CMC-Suspensionen sind scherreduzierend, d.h. sie haben eine hohe Viskosität bei niedriger Scherrate. Diese Viskosität sinkt mit steigender Temperatur.

Mit steigender Salzkonzentration sinkt die filtratreduzierende und viskositätsaufbauende Eigenschaft von CMC. Manche Calcium-Kontaminationen in Tonen können durch die Zugabe von CMC unterbunden werden. Wie bereits bei Stärke beschrieben, wird auch CMC bei Anwesenheit von Calcium und Magnesium co-präzipitiert.

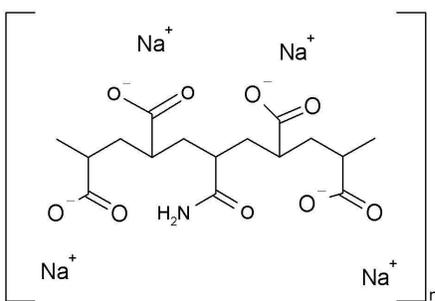
### 3.3.1.5 Synthetische Polymere

Polyacrylamid kommt in verschiedenen Molekulargewichten vor. Zudem gibt es verschiedene Substitutionstypen von Acrylamid Polymeren (Abbildung 3.14 und 3.15).



**Abbildung 3.14:** Beispiele für synthetische polyacrylamid Polymeren: A) Polyacrylamid B) Polyvinylalkohol C) Polyvinylpyrrolidon D) Polyvinylmethylether

Die Eigenschaften von synthetischen Polymeren in der Bohrspülung wird nicht nur durch ihre chemische Zusammensetzung, die Struktur und das Molekulargewicht der Polymere bestimmt sondern auch durch die Zusammensetzung und Temperatur des Systems, zu welchem sie gegeben werden. So kann dasselbe Polymer zum einen als Flokkulant wirken, wenn es in niedriger Konzentration auftritt, zum anderen aber den Filtrationsverlust reduzieren, wenn es in größerer Menge eingesetzt wird.



**Abbildung 3.15:** Natriumacrylamid

Diese große Variabilität beim Einsatz der Polymere bringt allerdings gleichzeitig eine umfangreiche Testphase der Einflüsse auf die Suspension mit sich. Natrium Polyacrylate können so zum Beispiel als Filtrationsreduzierer eingesetzt werden, diese Eigenschaft wird aber auch immer durch die Sensitivität gegenüber Calciumionen begrenzt.

### 3.3.2 Filtratreduzierer

Filtratreduzierung von Suspensionen bedeutet eine Verminderung der in das Gebirge abfiltrierenden Flüssigkeitsmenge, die Filtratverluste, durch die Ausbildung eines möglichst dünnen, dichten, zähen und elastisch abdichtenden Filterkuchens. Filtratreduzierer auf der Basis von Polymeren bestehen aus Makromolekülen, die sich infolge der großen Anzahl an negativen elektrischen Ladungen ( $OH^-$ ,  $O^-$ ,  $COOH^-$  – Gruppen) und deren großer Affinität zu Wasser mit einer fest haftenden dicken Hydrathülle umgeben. Die Moleküle werden intensiv an Tonpartikeln adsorbiert, so dass sie diese wiederum mit einer fest haftenden, stark wasserhaltigen, dicken Schutzhülle überziehen. Dadurch verkleinern sich die Zwischenräume zwischen den Tonpartikeln bei der Filterkuchenbildung und die Durchlässigkeit des Filterkuchens sowie die Filtratmenge nehmen ab.

Die Durchlässigkeit des Filterkuchens wird darüber hinaus durch den Einbau frei vorliegender Polymerpartikel vermindert, die infolge ihrer Beweglichkeit und Plastizität noch vorhandene Poren verstopfen können. Die prinzipielle Funktion der Filtratreduzierer ist somit ein mechanisch-physikalisches Verstopfen der Poren des Filterkuchens. Der Filtratverlust nimmt bei konstanten Bedingungen von Druck, Temperatur usw. mit der Konzentration exponentiell ab, d.h. ein Filtrat von Null ist auch mit extrem hohen Konzentrationen nicht erreichbar.

Zu den Filtratreduzieren zählen folgende Polymere:

- Stärke (vgl. Kapitel 3.3.1.1)
- Carboxymethylzellulose (CMC) (vgl. Kapitel 3.3.1.4)
- Polyanionische Zellulose (vgl. Kapitel 3.3.1.4)

Wie bereits erwähnt, lassen sich die Eigenschaften bzw. Wirkungsweisen von Viskositätsregulieren und Filtratreduzieren nicht exakt voneinander trennen, so dass an dieser Stelle eine Mehrfachnennung erfolgt.

### 3.3.3 Verflüssiger

Verflüssiger werden Suspensionen mit dem Ziel zugefügt, die Viskosität herabzusetzen, d.h. der Gelbildung entgegen zu wirken und somit die Fließeigenschaften zu verbessern. Dies ist vor allem dann erforderlich, wenn die Bentonitsuspension durch die Aufnahme von Feinstfeststoffen aus dem Bohrklein oder durch Laugenzuflüsse aus dem Grundwasser beginnt einzudicken.

Die einfachste Methode zur Senkung der Viskosität der Spülung stellt die Zugabe von Wasser dar. Wenn die erhöhte Viskosität nicht durch Wasserzugabe gesenkt werden soll oder kann, werden Verflüssiger zugegeben. Verflüssiger senken die Viskosität einer Suspension durch Abbau des Gelgerüsts ohne die Spülung zu verdünnen. Dabei wird spürbar die Fließgrenze gesenkt.

Verflüssiger dissoziieren (zerfallen) in Lösungen in relativ stark geladene große Ionen bzw. kleinere Kolloid-Ionen, die wiederum an den positiv geladenen Bruchkanten der Tonplättchen adsorbiert werden und diesen eine negative Ladung erteilen. Dadurch werden die Anziehungskräfte zwischen den Tonpartikeln verringert oder auch gänzlich beseitigt. Die Bentonitsuspension wird verflüssigt, die Viskosität sinkt [STEIN 2003]. Die Zugabe von Verflüssigern erfordert eine ständige Kontrolle der Bentonitsuspension. Sie müssen, um ihre optimale Wirkung zu erzielen, präventiv eingesetzt werden, bevor die Spülung eingedickt ist.

Zusätzlich können Verflüssiger die Filtratwasserabgabe reduzieren und die Filterkuchenbildung verringern, Salzeffekten entgegenwirken und den Einfluss von Wasser auf die Formation minimieren. Polymere, die als Verflüssiger eingesetzt werden können, sind z.B. Tannine, Polyphosphate, Lignite und Lignosulfonate.

Da Verflüssiger im Rahmen des Forschungsprojektes keine Bedeutung hatten, werden sie nicht weiter diskutiert.

## 3.4 Polymere als chemisch nicht aktive Additive

Chemisch nicht aktive Additive werden auch als reaktionsträge Stoffe bezeichnet. Sie beteiligen sich nicht oder nur teilweise an den chemischen Vorgängen in der Suspension und werden nach ihrer Herkunft sowie Art der Nutzung unterschieden in:

- Stopfmittel (Lost Circulation Material)
- Beschwerungsstoffe (Weighting Material).

### 3.4.1 Stopfmittel

Stopfmittel werden zur Bekämpfung von Spülungsverlusten eingesetzt, um durch ihre Menge, Größe und Form der Partikel Porenräume, Risse und Klüfte zu verschließen. Eine wesentliche Rolle spielen der Durchmesser des Stopfmittels und die Korngrößenverteilung. Z.B. Klüftigkeiten erfordern zum Verstopfen ein Material, das in seinem Durchmesser mindestens  $1/3$  der Klufbreite entspricht.

Stopfmittel sollten möglichst faserförmig sein, im Wasser etwas quellen, elastisch deformierbar sein und eine geeignete Korngrößenverteilung besitzen. Bewährt haben sich vor allem Materialien, wie z.B. Sägemehl, Sägespäne, Zellophanschnitzel, Glimmerschuppen und grobes Tonpulver. Bei Stopfmitteln aus nicht quellenden körnigen Materialien sind ein hoher Ungleichförmigkeitsgrad, rauhe Oberflächen und ein breites Körnungsband besonders günstig. Geeignete Materialien hierfür sind z.B. Quarzmehl, Granite oder Kalksteinpulver.

Abhängig von der Ursache für den Suspensionsverlust gibt es verschiedene Abhilfemaßnahmen, wie z. B. die Reduktion des Druckes durch die zirkulierende Suspension oder durch Öffnungen, durch die die Suspension entweichen kann. Diese Öffnungen müssen

gestopft werden durch Schlämme, die bei Stillstand starr werden, oder durch Stopfung mittels Füllstoffen, so dass eine normale Bohrung erfolgen kann. Eine Vielzahl von Substanzen kommt für die Wiederherstellung der Zirkulation in Frage. Oftmals werden auch Mischungen aus zwei oder mehr Substanzen eingesetzt, so dass verschiedene Zusammensetzungen für spezifische Anwendungen bestehen.

Man unterscheidet die Materialien allgemein nach ihrer physikalischen Beschaffenheit als

- Flocken,
- Granular und
- Fasern.

Untersuchungen haben gezeigt, dass besonders eine Mischung aus verschiedenen Eigenschaften, wie Größe, Beschaffenheit und Stärke, zu einer erfolgreichen Abdichtung führen.

### 3.4.2 Beschwerungsstoffe

Beschwerungsstoffe werden zur Erhöhung der Dichte und damit des statischen Druckes von Spülungen, insbesondere beim Auftreten von artesisch gespanntem Grundwasser, eingesetzt. Für ihre Auswahl sind im wesentlichen folgende Punkte entscheidend:

- Dichte des Stoffes
- Korngrößenverteilung
- Verunreinigungen des Stoffes

Beim Einsatz von Beschwerungsstoffen ist zu beachten, dass sie zum einen die Ursache eines erhöhten Verschleißes sein können und zum anderen zerkleinert werden. Dadurch kann das Korngrößenmaximum in der Suspension zu einem kleineren Wert mit dem Ergebnis verschoben werden, dass die Viskosität zunimmt, da freies Wasser an der Teilchenoberfläche gebunden wird. Durch die Aufnahme von Bohrklein beschweren sich Bentonitsuspensionen selbst bis etwa  $1250 \text{ kg/m}^3$  bis  $1300 \text{ kg/m}^3$ . Für höhere Dichten werden z.B. Kreide, Baryt und Eisenoxid eingesetzt.

Beschwerungsstoffe hatten ebenso wie die Verflüssiger für das Forschungsprojekt keine Bedeutung.

# Kapitel 4

## Bestimmung der Suspensionseigenschaften

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die Eigenschaften Dichte, Fließgrenze, Gelstärke, Viskosität und Thixotropie durch die Messung spezifischer Kennwerte nach DIN-Versuchen bestimmt. Die Untersuchungen wurden systematisch durchgeführt, um die Auswirkungen von Veränderungen innerhalb der Rezeptur auf die spezifischen Eigenschaften der Suspension aufzuzeigen. Die systematische Bestimmung der Suspensionseigenschaften beinhaltete die Untersuchung von

- reinen Bentonitprodukten und
- Bentonitprodukten, die durch die Zugabe von Polymeren modifiziert wurden.

Tabelle 4.1: Bentonitprodukte

Produkt	Hersteller	Kurzbeschreibung
Tunnelgel plus	Baroid	Polymermodifiziert
Super Gel X	Cetco	Natrium-Bentonit (Wyoming), polymermodifiziert
Hydraul EZ	Cetco	Natrium-Bentonit, polymermodifiziert
Calcium-Bentonit	Ibeco	Reiner Calcium-Bentonit
Natrium-Bentonit	Ibeco	Reiner Natrium-Bentonit
HT-X	Ibeco	Aktivierter Calcium-Bentonit, polymermodifiziert
B1	Ibeco	Natrium-Bentonit
B2	Ibeco	Natrium-Bentonit
W	Phrikolat	Natrium-Bentonit (Wyoming)
Wplus	Phrikolat	Basis W, polymermodifiziert
Wyoming Benonit	Phrikolat	Natrium-Bentonit (Wyoming)
Bentonil XR	Süd-Chemie	Polymermodifizierter Bentonit
Bentonil CF	Süd-Chemie	Aktiv-Bentonit
Tixoton C2	Süd-Chemie	Aktivierter, polymermodifizierter Calcium-Bentonit
Tixoton C7s	Süd-Chemie	Polymermodifizierter Bentonit

In beiden Anwendungsfällen wurden die Konzentrationen sowohl von Bentonit als auch des jeweils eingesetzten Polymers variiert und unterschiedlich miteinander kombiniert. Eine Übersicht der Bentonit- und Polymerprodukte zeigen die Tabellen 4.1 und 4.2.

Tabelle 4.2: Polymerprodukte

Produkt	Hersteller	Kurzbeschreibung
CMC PAC Stärke Xanthan Gum Guar Gum		Carboxymethylcellulose, Viskositätsregulierer Polyanionische Cellulose, Viskositätsregulierer natürliches Polysaccharid, Viskositätsregulierer Viskositätsregulierer Viskositätsregulierer
No-Sag Quick Trol N-Seal Diamond Seal	Baroid Baroid Baroid Baroid	Biopolymer, Viskositätsregulierer (Gelstärke) Natürliche Cellulose, Filtratreduzierer Mineralische Fasern, Stopfmittel Synthetisches Polymer, Stopfmittel
Rel PAC Suspend IT	Cetco Cetco	Natürliche Cellulose, Viskositätsregulierer, Filtratreduzierer Biopolymer, Viskositätsregulierer (Gelstärke)
Alcomer 507 Alcomer 1771	Ciba Ciba	Anionisches Acrylamid-Polymer, Filtratreduzierer Synthetisches anionisches Polymer auf Acrylamid-Basis, Viskositätsregulierer, Filtratreduzierer
F11 Visco 2 VI34 Visco M	Condat Condat Condat Condat	Flüssigpolymer, Filtratreduzierer Polymer, Viskositätsregulierer Anionisches Copolymer auf Acrylamid-Basis, Viskositätsregulierer Polymer, kann Bentonit ersetzen, Viskositätsregulierer
Polydrill Biovis Bioflow Polyvis II	Degussa/Basf Degussa/Basf Degussa/Basf Degussa/Basf	Organisches Polymer, Viskositätsregulierer, Filtratreduzierer Polysaccharid, Viskositätsregulierer Heterocyclisches Polysaccharid, Viskositätsregulierer Metallhydroxid, Viskositätsregulierer
Modipol 600 Filter Control Modiflux 230 Modivis 800/900	Phrikolat Phrikolat Phrikolat Phrikolat	Anionisches Polymer auf Cellulosebasis, Viskositätsregulierer, Filtratreduzierer Organisches Polymer, Filtratreduzierer Viskositätsregulierer (Gelstärke) Wasserlösliches Biopolymer, Viskositätsregulierer
SC Mud P SC Vis	Süd-Chemie Süd-Chemie	Anionisches Polymer, Viskositätsregulierer Viskositätsregulierer, Filtratreduzierer
Antisol 30000	Wolf Cellulosics	Polyanionisches Polymer PAC, Viskositätsregulierer

Bei der Modifizierung von Bentonitsuspensionen mit Polymeren wurde darauf geachtet, dass nur die Produkte einer Firma miteinander kombiniert wurden, da die Bentonit- und Polymerprodukte von z.B. Baroid, Cetco, Phrikolat und Süd-Chemie innerhalb der jeweiligen Angebotspalette aufeinander abgestimmt sind.

Die Polymerprodukte von Degussa/Basf, Ciba Specialities und Wolf Cellulosics, zu denen es kein firmeneigenes Bentonitprodukt gibt, wurden mit dem Natrium-Bentonit B2 von

Ibeco in einer Konzentration von 5 % kombiniert.

Die Polymere wurden i.A. in der vom jeweiligen Hersteller empfohlenen geringsten und höchsten Dosierung eingesetzt. Bei ausgewählten Versuchsreihen wurde eine dritte, mittlere Dosierung zusätzlich getestet.

Die Produktdatenblätter der Bentonite und Polymere sind im Anhang B zu finden.

## 4.1 Versuchsprogramm zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften

Die vorgestellten Produkte wurden in unterschiedlichen Konzentrationen und Rezepturen hergestellt, d.h. sowohl die Bentonitkonzentration als auch die Zugabemenge des jeweiligen Polymers variiert. Eine Aufstellung der Rezepturen reiner Bentonitsuspensionen zeigt Abbildung 4.1, die Rezepturen der mit Polymeren modifizierten Bentonitsuspensionen zeigt Abbildung 4.2. In der Spalte der Kurzbeschreibung erfolgt bei den Bentonite eine Einordnung nach der Bentonitart, bei den Polymeren wird zusätzlich die Wirkungsweise als chemisch aktives (vgl. Kapitel 3.3) und chemisch nicht aktives Additiv (vgl. Kapitel 3.4) benannt.

<b>Versuchsprogramm - Suspensionseigenschaften Bentonite</b>	
<b>Produkt:</b>	<b>untersuchte Konzentrationen [kg/1000l]</b>
Natriumbentonit (Na)	60; 80; 100; 120
Calciumbentonit (Ca)	80; 100; 120; 140; 160
Wyoming Bentonit	80; 100; 120; 140
<b>Baroid</b>	
Tunnel Gel Plus	25; 30; 35; 40
<b>Cetco</b>	
Super Gel X	25; 30; 35; 40
Hydraul EZ	25; 30; 35; 40
<b>Ibeco</b>	
B1	40; 60; 80; 100
B2	40; 50; 60; 80; 100
HTX	30; 40; 60; 80; 100
HTX-Spezial	30; 35; 40; 45
<b>Phrikolat</b>	
W	30; 40
W Plus	35; 40
<b>Süd Chemie</b>	
Bentonil XR	30; 35; 40
Bentonil CF	50; 60; 80
Tixoton C2	40; 45; 50
Tixoton C7S	35; 40

**Abbildung 4.1:** Versuchsprogramm Suspensionseigenschaften: Bentonitsuspensionen

Im Anhang C sind die ausführlichen Dokumentationen der untersuchten Suspensionseigenschaften zusammengestellt.

<b>Versuchsprogramm - Suspensionseigenschaften Polymere</b>			
	<b>Produkt:</b>	<b>Kombination mit:</b>	<b>untersuchte Konzentrationen</b>
<b>Polymere</b>			
	CMC	B2 (5 %)	0,25%; 0,5%
		B2 (8 %)	0,2%; 0,5%; 1%
	PAC	B2 (5 %)	0,075%; 0,15%; 0,3%
	Guar Gum	B2 (5 %)	0,25%; 0,5%; 0,75%; 1%
	Xanthan Gum	B2 (5 %)	0,25%; 0,5%; 1%
	Stärke	B2 (5 %)	0,5%
<b>Baroid</b>			
	No Sag	Tunnel Gel Plus (2,5 %)	0,08%; 0,16%
		Tunnel Gel Plus (3 %)	0,05%
	Quik Trol	Tunnel Gel Plus (2,5 %)	0,08%; 0,12%
	EZ Mud Gold	Tunnel Gel Plus (2,5 %)	0,125%; 0,25%
		Tunnel Gel Plus (3 %)	0,05%; 0,1%
<b>Cetco</b>			
	Rel PAC	Super Gel X (2,5 %)	0,08%; 0,24%
	Suspend IT	Super Gel X (2,5 %)	0,08%; 0,24%
<b>Ciba</b>			
	Alcomer 507	B2 (5 %)	0,25%; 0,5%
	Alcomer 1771	B2 (5 %)	0,05%; 0,1%; 0,2%
<b>Condat</b>			
	Visco 2	B2 (5 %)	0,1%; 0,2%; 0,3%
	VI 34	B2 (5 %)	0,1%; 0,25%
	F 11	B2 (5 %)	1%; 2%; 3%
	Visco M	-	0,25%; 0,4%; 0,5%
		B2 (5 %)	0,1%
<b>Degussa/BASF</b>			
	Polydrill	B2 (5 %)	0,3%; 1%; 2%
	Biovis	B2 (5 %)	0,15%; 0,75%; 1,5%
	Bioflow	B2 (5 %)	0,15%; 0,75%; 1,5%
	Polyvis II	B2 (5 %)	0,2%; 0,4%; 0,6%
<b>Phrikolat</b>			
	Modipol 600	W (3 %)	0,075%; 0,15%
	Filter Control	W (3 %)	0,2%; 0,4%
	Modiflux 230	W (3 %)	0,5%
	Modivis 800	W (3 %)	0,20%
<b>Süd Chemie</b>			
	SC Mud HP	Bentonil XR (3 %)	0,1%; 0,2%
		Tixoton C2 (4 %)	0,1%; 0,2%
	SC Vis HVP	Bentonil XR (3 %)	0,1%; 0,2%
		Tixoton C2 (4 %)	0,1%; 0,2%
<b>Wolf Cellulosics</b>			
	Antisal 30000	B2 (5 %)	0,1%; 0,2%; 0,5%

Abbildung 4.2: Versuchsprogramm Suspensionseigenschaften: Bentonitsuspensionen modifiziert mit Polymeren

## 4.2 Herstellung der Bentonitsuspensionen

Der Herstellungsprozess der Bentonitsuspensionen erfolgte gemäß den in Kapitel 2.2 formulierten Anforderungen. Um das Ziel einer guten Dispergierung zu erreichen, wurde für das Anmischen ein Ultra-Turrax UTC TMP 115/ 2 KT Hochleistungsdispergiergerät der Firma IKA verwendet (Abbildung 4.3).



**Abbildung 4.3:** Dispergiergerät Ultra-Turrax

Die Dispergierzeit betrug jeweils 10 Minuten. Nach insgesamt 48 Stunden Quellzeit wurden die Suspensionseigenschaften für alle Rezepturen bestimmt.

Die Polymere wurden den jeweiligen Bentonitsuspensionen nach 24 Stunden Quellzeit hinzugegeben. Das Einrühren der teils pulverförmigen und teils flüssigen Polymere erfolgte nicht mit dem Dispergiergerät Ultra-Turrax, sondern mittels Mischaufsatz auf einer handelsüblichen Bohrmaschine. Insbesondere bei langkettigen Polymeren hätte das Dispergiergerät die Molekülketten aufgrund der sehr hohen Scherenergie zerstört, so dass die Polymere ihre Wirkung verloren hätten. Der Mischvorgang erfolgt solange, bis alle Polymereteilchen gleichmäßig in der Suspension verteilt waren. 24 Stunden nach Einmischen der Polymere wurden die Suspensionseigenschaften bestimmt.

Als Anmachwasser diente Bochumer Leitungswasser mit einer Temperatur von ungefähr 19°C, einem pH-Wert von 7 und einem Härtegrad von 8,3°dH.

## 4.3 Ermittlung der Suspensionseigenschaften

Die Ermittlung der Suspensionseigenschaften beinhaltet die Bestimmung der Dichte, Stabilität, Fließgrenze, Viskosität und Gelstärke. Die Untersuchungen erfolgten mittels Kugelharfe, Marsh-Trichter, Rotationsviskosimeter und Shearometer, sowie mit einem Messzylinder zur Bestimmung der Dichte. Die theoretischen Grundlagen zu den jeweiligen Versuchsgeräten sind Kapitel 2.4 des Berichtes zu entnehmen.

### 4.3.1 Bestimmung der Dichte

Die Bestimmung der Dichte erfolgt durch Wägung. Der in Abbildung 4.4 dargestellte Messzylinder wird blasenfrei mit der zu prüfenden Flüssigkeit befüllt. Die Flüssigkeit ist mit einem kleinen Überstand aufzugießen. Der Deckel wird plan aufgeschoben und der Überstand fließt ab. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich keine Luft im Messzylinder eingeschlossen ist. Nach gründlicher Reinigung und Trocknung wird das Gewicht des Zylinders samt Inhalt gewogen.



Abbildung 4.4: Messzylinder zur Bestimmung der Dichte

Die Dichte der Suspension berechnet sich wie folgt:

$$Dichte_{Suspension} = \frac{Masse_{Gesamt} - Masse_{leer}}{Volumen_{Zylinder}} \quad (4.1)$$

mit:

$$Masse_{leer} = Masse_{Zylinder+Deckel} = 402,16g$$

$$Volumen_{Zylinder} = 387,04 \text{ ml}$$

### 4.3.2 Bestimmung der Filtratverluste (Stabilität)

Der Filtratverlust wird mit Hilfe einer Filterpresse nach [DIN 4126-100 1996] ermittelt (Abbildung 4.5). Auf den Boden des Zylinders der Filterpresse wird ein Filterpapier DIN 53135-2b gelegt, welches durch ein Sieb gestützt wird. Anschließend wird der Zylinder mit 2 Litern (bis ca. 10 mm unter dem oberen Rand) der zu untersuchenden Suspension befüllt und der verschlossene Zylinder mit 7 bar Druckluft beaufschlagt. Das ausgedrückte Filtratwasser wird durch ein Ablassrohr unterhalb des Filterpapiers abgegeben und in einem Messbecher gesammelt. Nach 7,5 Minuten Druckbeaufschlagung ist der Versuch beendet und die Filtratwasserabgabe wird durch Wiegen des Messbechers bestimmt.



Abbildung 4.5: Filterpresse

### 4.3.3 Bestimmung der Fließgrenze

Die Bestimmung der Fließgrenze einer Suspension erfolgt jeweils durch drei verschiedene Verfahren und zwar anhand der Kugelharfe, dem Rotationsviskosimeter und dem Marsh-Trichter (vgl. Kapitel 2.4.3).

Wie bereits in Kapitel 2.4 erläutert, ist zu beachten, dass alle drei Methoden aus Gründen eines unterschiedlichen Geräteprinzips eine andere Fließgrenze bestimmen und daher keine einheitlichen Werte liefern.

Mit der **Kugelharfe** nach [DIN 4126-100 1996] wird die Fließgrenze  $\tau_F$  ermittelt. Bei den vorliegenden Versuchsreihen kommen hierbei zwei verschiedene Kugelsätze zur Anwendung, die sich durch ihren Einsatzbereich unterscheiden. Diese werden nachfolgend als leichter und als schwerer Kugelsatz bezeichnet. Für jeden dieser Kugelsätze gibt es eine eigene Tabelle zur Bestimmung der Fließgrenze  $\tau_F$ , deren Werte von der Tabelle aus [DIN 4126-100 1996] abweichen. Die spezifischen Tabellen der verwendeten Kugelsätze befinden sich in Anhang D.

Die Messung mit der Kugelharfe erfolgt für jede Suspension zunächst mit dem leichten Kugelsatz. Die Nummer der kleinsten Kugel, die vollständig in die Suspension eingetaucht ist, wird notiert. Für diese Kugel ergibt sich in Abhängigkeit der Dichte der Suspension, anhand der entsprechenden Tabelle, der Wert für Fließgrenze  $\tau_F$ . Sollte der Fall eintreten, dass keine der Kugeln in die Suspension eintauchen und alle Kugeln auf der Oberfläche liegen bleiben, werden die Kugeln ausgetauscht und die Messung mit dem schweren Kugelsatz wiederholt.

Mit Hilfe des **Rotationsviskosimeters** wird die Bingham-Fließgrenze  $\tau_B$  ermittelt. Gemäß der [API 13 B-1 1997] werden hierfür die Scherspannungen bei einer Geschwindigkeit von 600 rpm (U/min) und 300 rpm (U/min) gemessen. Die Bingham-Fließgrenze

berechnet sich aus den abgelesenen Werten wie folgt:

$$\text{Fließgrenze } \tau_B = [300rpm] - ([600rpm] - [300rpm]) \quad (4.2)$$

Das Ergebnis hat die amerikanische Einheit  $lbs/100ft^2$ . Die Umrechnung in  $N/m^2$  erfolgt mit dem Faktor 0,479. Die Skala des verwendeten Viskosimeters zeigt nur einen Wertebereich bis einschließlich 300 an. Wird dieser Wert bei der Messung überschritten, kann kein Ergebnis für die Bingham-Fließgrenze  $\tau_B$  angegeben werden.

Aus den Ergebnissen des **Marsh-Trichter**-Versuchs wird die dynamische Fließgrenze  $dyn\tau_F$  ermittelt (Abbildung 4.6). Mit einer Stoppuhr werden die Marsh-Zeiten  $\tau_M$  und  $\tau_{M1500}$  der jeweiligen Suspension gemessen. Daran anschließend erfolgt die Bestimmung der dynamischen Fließgrenze  $dyn\tau_F$  mit Hilfe eines Diagramms, analog zu dem Beispiel in der [DIN 4126-100 1996].

Für Werte oberhalb einer Grenze von  $\tau_M = 3$  min liefert das Auswertungsdiagramm für die Bestimmung der dynamischen Fließgrenze  $dyn\tau_F$  keine Ergebnisse mehr. Dies gilt ebenfalls für die nachfolgend beschriebene Bestimmung der differentiellen Viskosität.

Die graphischen Auswertungen zu diesen Versuchen befinden sich in Anhang D.



**Abbildung 4.6:** Bestimmung der Marsh-Zeiten mit dem Marsh-Trichter

#### 4.3.4 Bestimmung der Viskosität

Die Viskosität der Bentonitsuspension wird mit dem **Rotationsviskosimeter** und dem **Marsh-Trichter** ermittelt (vgl. Kapitel 2.4.4). Die unterschiedlichen Messverfahren liefern Werte für die scheinbare, die plastische und die differentielle Viskosität. Alle drei basieren auf einer unterschiedlichen Definition der Viskosität und liefern daher keinen einheitlichen Wert.

Die plastische und die scheinbare Viskosität ergeben sich aus der Messung mit dem **Rotationsviskosimeter**. Hierfür werden die bereits für die Berechnung der Bingham-Fließgrenze  $t_B$  verwendeten Scherfestigkeiten bei 300 rpm (U/min) und 600 rpm (U/min) benötigt. Die plastische  $\eta_P$  und die scheinbare Viskosität  $\eta_S$  ergeben sich zu [API 13 B-1 1997]:

$$\eta_P = [600rpm] - [300rpm] \quad (4.3)$$

$$\eta_S = \frac{600rpm}{2} \quad (4.4)$$

Die Ergebnisse dieser Berechnungen haben die amerikanische Einheit  $cP$ . Eine Umrechnung in die Einheit  $Ns/m_2$  erfolgt mit dem Faktor 0,001. Die Bestimmung der differentiellen Viskosität erfolgt graphisch anhand der Auslaufzeiten  $t_M$  und  $t_{M1500}$  aus dem **Marsh-Trichter-Versuch** (vgl. Kapitel 4.3.3). Diese graphischen Auswertungen befinden sich in Anhang C.

### 4.3.5 Bestimmung der Gelstärke

Die Gelstärke wird mit Hilfe des **Rotationsviskosimeters** sowie des **Shearometers** (Abbildung 4.7) bestimmt. Die Beschreibung der Versuchsdurchführung kann Kapitel 2.4.5 entnommen werden.



**Abbildung 4.7:** Shearometer

Mit beiden Versuchsgeräten wird jeweils die Anfangsgelstärke nach 10 Sekunden und die Gelstärke nach einer Ruhezeit von 10 Minuten gemessen. Die Differenz dieser beiden Werte ergibt den sogenannten Thixotropiewert. Die Versuchsergebnisse werden gerätebedingt in der amerikanischen Einheit  $lbs/100ft^2$  ausgegeben. Die Umrechnung in  $N/m^2$  erfolgt

mit dem Faktor 0,479. Um die Werte aus den verschiedenen Versuchsverfahren begrifflich auseinander halten zu können, werden für die Auswertung die Bezeichnungen gemäß Abbildung 4.8 gewählt.

Versuchsgerät	Zeitpunkt der Messung	Bezeichnung
Shearometer	nach 10 Sekunden	Anfangsgelstärke $\tau_{GS}$
Shearometer	nach 10 Minuten	Gelstärke $\tau_{GS}$
Rotationsviskosimeter	nach 10 Sekunden	Gelstärke $\tau_{10''}$
Rotationsviskosimeter	nach 10 Minuten	Gelstärke $\tau_{10}$

Abbildung 4.8: Bezeichnung der Gelstärken aus unterschiedlichen Messverfahren

## 4.4 Ergebnisse der ermittelten Suspensionseigenschaften

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Bestimmung der Suspensionskennwerte für die reinen und polymermodifizierten Bentonitsuspensionen in tabellarischer Form dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Ergebnisse enthält Anhang C.

### 4.4.1 Eigenschaften der reinen Bentonitsuspensionen

#### 4.4.1.1 Calcium-Bentonit IBECO

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war ein reiner Calcium-Bentonit von Ibeco (Abbildung 4.9). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 8 %, 10 %, 12 %, 14 % und 16 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.2 Natrium-Bentonit IBECO

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war ein reiner Natrium-Bentonit von Ibeco (Abbildung 4.10). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 6 %, 8 %, 10 % und 12 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.3 HT-X Ibeco

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit HT-X (Abbildung 4.11). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 3 %, 4 %, 6 %, 8 % und 10 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### **4.4.1.4 B1 Ibeco**

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit B1 (Abbildung 4.12). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 4 %, 6 %, 8 % und 10 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### **4.4.1.5 B2 Ibeco**

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit B2 (Abbildung 4.13). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 4 %, 5 %, 6 %, 8 % und 10 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### **4.4.1.6 W Phrikolat**

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit W von Phrikolat (Abbildung 4.14). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 3 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### **4.4.1.7 W plus Phrikolat**

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit W plus von Phrikolat (Abbildung 4.15). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 3,5 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### **4.4.1.8 Wyoming Benonit Phrikolat**

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit W von Phrikolat (Abbildung 4.16). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 8 %, 10 %, 12 % und 14 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### **4.4.1.9 Tunnelgel plus Baroid**

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Tunnelgel Plus von Baroid (Abbildung 4.17). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 2,5 %, 3 %, 3,5 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.10 Bentonil XR Süd-Chemie

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Bentonil XR von Süd-Chemie (Abbildung 4.18). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 3 %, 3,5 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.11 Bentonil CF Süd-Chemie

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Bentonil CF von Süd-Chemie (Abbildung 4.19). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 5 %, 6 % und 8 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.12 Tixoton C2 Süd-Chemie

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Tixoton C2 von Süd-Chemie (Abbildung 4.20). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 4 %, 4,5 % und 5 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.13 Tixoton C7S Süd-Chemie

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Tixoton C7S von Süd-Chemie (Abbildung 4.21). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 3,5 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.14 Super Gel X Cetco

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Super Gel X von Cetco (Abbildung 4.22). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 2,5 %, 3 %, 3,5 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

#### 4.4.1.15 Hydraul EZ Cetco

Ausgangsprodukt dieser Versuchsserie war der Bentonit Hydraul EZ von Cetco (Abbildung 4.23). Die Suspensionen wurden mit einem Bentonitgehalt von 2,5 %, 3 %, 3,5 % und 4 % hergestellt. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Suspensionseigenschaften erfolgte jeweils nach einer Quellzeit von 48 Stunden.

Ca						
	Bentonit:	Ca				
	Konzentration:	8%	10%	12%	14%	16%
<b>Dichte</b>						
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,045	1,054	1,063	1,072	1,081
<b>Fließgrenze</b>						
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	Wert ausserhalb der Diagrammskala	0,5	$t_m > 3$ min	$t_m > 3$ min
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	15,76 - 22,48	48,30 - 57,96	68,25 - 76,57
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	0,958	2,395	5,269	11,486	24,908
<b>Gelstärke</b>						
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	2,587	11,017	16,765
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	3,018	12,933	27,782
Thixotropiewert	Shearometer			0,431	1,916	11,017
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	0,240	1,916	5,748	13,412	24,908
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,395	5,748	13,412	21,076	35,925
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	2,155	3,832	7,664	7,664	11,017
<b>Viskosität</b>						
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	Wert ausserhalb der Diagrammskala	18,9	$t_m > 3$ min	$t_m > 3$ min
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	8,5	14,5	25	39
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	4	6	9	13	13
<b>Stabilität</b>						
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	3,9	2,3	1,2	0	0

Abbildung 4.9: Messergebnisse Calcium-Bentonit von Ibeco

Na					
	Bentonit:	Na			
	Konzentration:	6%	8%	10%	12%
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,032	1,043	1,054	1,065
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	2,8	4,0	$t_m > 3$ min	$t_m > 3$ min
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	12,02 - 15,58	37,36 - 48,66	68,47 - 76,81
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,395	8,622	18,202	33,051
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	1,581	9,580	14,370
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,922	11,496	21,555
Thixotropiewert	Shearometer		1,341	1,916	7,185
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	0,240	2,874	11,496	22,034
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,79	12,933	25,866	38,799
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	4,55	10,059	14,37	16,765
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	8,6	24,3	$t_m > 3$ min	$t_m > 3$ min
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	10,5	23	49	84,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	8	14	30	50
<b>Stabilität</b>					
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	5	1,9	0,9	0

Abbildung 4.10: Messergebnisse Natrium-Bentonit von Ibeco

HTX						
	Bentonit:	HTX				
	Konzentration:	3%	4%	6%	8%	10%
<b>Dichte</b>						
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,016	1,021	1,030	1,039	1,048
<b>Fließgrenze</b>						
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	1,5	7,0	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelhharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	30,61 - 37,3	68,89 - 74,48	>199,19
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	3,832	14,370	34,009	71,371
<b>Gelstärke</b>						
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,395	9,580	20,118	Zylinder sinkt nicht ein
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,635	10,778	27,782	Zylinder sinkt nicht ein
Thixotropiewert	Shearometer		0,240	1,198	7,664	
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	4,311	14,370	35,572	64,665
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	8,143	23,471	45,505	80,472
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,958	3,832	9,101	9,933	15,807
<b>Viskosität</b>						
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	6,5	14,4	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	6	9	23	44,5	104,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	3	5	8	10	30
<b>Stabilität</b>						
Filterverlust [ml]	Filterpresse	19,5	5,1	1,4	0	0

Abbildung 4.11: Messergebnisse Bentonit HT-X von Ibeco

B1					
	Bentonit:	B1			
	Konzentration:	4%	6%	8%	10%
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,022	1,032	1,044	1,056
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,0	6,2	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelhharfe	12,21 - 15,83	37,30 - 48,8	68,64 - 77,01	118,09 - 137,75
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,790	14,370	25,866	42,152
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,251	11,376	15,328	26,345
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,299	13,173	18,681	31,135
Thixotropiewert	Shearometer	0,048	1,797	3,353	4,79
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	13,412	25,866	37,362
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	9,101	18,681	40,715	57,959
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	3,353	5,269	14,849	20,597
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	7,4	13	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	19	32	49
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	4	4	5	5
<b>Stabilität</b>					
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	8,7	7,3	1,2	0

Abbildung 4.12: Messergebnisse Bentonit B1 von Ibeco

<b>B2</b>								
		<b>Bentonit:</b>		<b>B2</b>				
		<b>Konzentration:</b>		<b>4%</b>	<b>5%</b>	<b>6%</b>	<b>8%</b>	<b>10%</b>
<b>Dichte</b>								
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,020	1,026	1,032	1,044	1,056		
<b>Fließgrenze</b>								
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	1,6	2,9	Wert ausserhalb der Diagrammskala	$t_m > 3 \text{ min}$		
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	15,70 - 22,40	48,50 - 58,20	68,85 - 76,87		
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,916	3,832	6,706	14,370	22,992		
<b>Gelstärke</b>								
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	1,437	2,97	10,538	16,765		
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	1,964	3,018	11,975	26,345		
Thixotropiewert	Shearometer		0,527	0,048	1,437	9,58		
Gelstärke $t_{10''}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,437	2,874	5,748	16,286	28,740		
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	10,538	16,286	26,345	42,152		
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	5,269	7,664	10,538	10,059	13,412		
<b>Viskosität</b>								
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	6,9	10,1	Wert ausserhalb der Diagrammskala	$t_m > 3 \text{ min}$		
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	6	9	12	22	31		
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	4	5	5	7	7		
<b>Stabilität</b>								
Filteratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	11,8	4,2	4,1	2,4	0,9		

Abbildung 4.13: Messergebnisse Bentonit B2 von Ibeco

<b>W</b>					
		<b>Bentonit:</b>		<b>W</b>	
		<b>Konzentration:</b>		<b>3%</b>	<b>4%</b>
		<b>Polymer:</b>		<b>ohne Polymer</b>	<b>ohne Polymer</b>
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas			1,014	1,020
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter			3,0	7,1
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe			7,92 - 12,28	15,84 - 22,59
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter			6,227	16,286
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer			1,437	4,215
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer			1,437	4,551
Thixotropiewert	Shearometer			0	0,336
Gelstärke $t_{10''}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter			3,832	10,059
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter			3,832	10,538
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter			0,000	0,479
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter			14,8	38,3
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter			19,5	34
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter			13	17
<b>Stabilität</b>					
Filteratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse			12,2	5,2

Abbildung 4.14: Messergebnisse Bentonit W von Phrikolat

W Plus			
	Bentonit:	W Plus	
	Konzentration:	3,5%	4%
	Polymer:	ohne Polymer	ohne Polymer
<b>Dichte</b>			
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,018	1,020
<b>Fließgrenze</b>			
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	6,2	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	22,63 - 30,88	37,37 - 48,68
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	20,597	27,782
<b>Gelstärke</b>			
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	7,185	9,580
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	7,185	10,538
Thixotropiewert	Shearometer	0	0,958
Gelstärke $t_{10^2}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	13,891	21,076
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	13,891	21,076
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	0,000
<b>Viskosität</b>			
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	62,7	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	37,5	45
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	16	16
<b>Stabilität</b>			
Filtratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	0,4	0,0

Abbildung 4.15: Messergebnisse Bentonit W plus von Phrikolat

Wyoming Bentonite					
	Bentonit:	Wyoming Bentonite			
	Konzentration:	8%	10%	12%	14%
	Polymer:	ohne Polymer	ohne Polymer	ohne Polymer	ohne Polymer
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,043	1,054	1,065	1,076
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	2,2	6,8	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	11,92 - 15,45	30,66 - 37,32	58,40 - 68,87
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,227	14,37	24,908	43,11
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	1,868	4,79	7,664
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	3,736	7,904	11,256
Thixotropiewert	Shearometer		1,868	3,114	3,592
Gelstärke $t_{10^2}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	0,958	3,832	6,227	13,881
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	16,765	21,076	30,177
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	5,748	12,933	14,849	16,296
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	21,6	61,7	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	21,5	46	67	91
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	15	31	41	46
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	3,3	0	0	0

Abbildung 4.16: Messergebnisse Wyoming-Bentonit von Phrikolat

Tunnelgel Plus					
	Bentonit:	Tunnelgel Plus			
	Konzentration:	2,5%	3%	3,5%	4%
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,018	1,019	1,022
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	4,5	8,0	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	6,12 - 7,93	7,91 - 12,27	15,86 - 22,63	22,58 - 30,82
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	10,538	12,933	19,639
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,060	3,305	6,706
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,778	4,694	8,622
Thixotropiewert	Shearometer		0,7	1,389	1,916
Gelstärke $t_{10'}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,437	3,832	5,748	10,059
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	9,580	13,412	17,244
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	4,311	5,748	7,664	7,185
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	13,9	26	30	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	17	26	30,5	44,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	10	15	17	24
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	6,1	4	0,8	0

Abbildung 4.17: Messergebnisse Bentonit Tunnelgel Plus von Baroid

Bentonil XR					
	Bentonit:	Bentonil XR			
	Konzentration:	3%	3,5%	4%	
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,016	1,018	1,020	
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	2,8	3,9	Auslaufen stagniert	
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	12,24 - 15,86	15,85 - 22,61	
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	9,580	13,891	19,160	
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,724	2,587	4,120	
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,772	2,635	4,551	
Thixotropiewert	Shearometer	0,048	0,048	0,431	
Gelstärke $t_{10'}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	8,143	9,101	
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	11,017	12,933	
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	2,874	2,874	3,832	
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	19,7	32	Auslaufen stagniert	
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	24	32,5	44	
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	14	18	24	
<b>Stabilität</b>					
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	11,3	10,6	10,4	

Abbildung 4.18: Messergebnisse Bentonit Bentonil XR von Süd-Chemie

<b>Bentonil CF</b>				
	<b>Bentonit:</b>	<b>Bentonil CF</b>		
	<b>Konzentration:</b>	<b>5%</b>	<b>6%</b>	<b>8%</b>
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,028	1,032	1,041
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	0,8	5,0	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	12,16 - 15,76	22,41 - 30,59	68,67 - 75,37
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	7,185	11,975	26,345
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,395	7,664	15,328
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	3,114	11,496	26,345
Thixotropiewert	Shearometer	0,719	3,832	11,017
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	11,975	27,782
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	9,58	18,681	40,715
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	3,832	6,706	12,933
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	19	27,7	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	16,5	23,5	40,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	11	13
<b>Stabilität</b>				
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	3,5	1,0	0,0

Abbildung 4.19: Messergebnisse Bentonit Bentonil CF von Süd-Chemie

<b>Tixoton C2</b>				
	<b>Bentonit:</b>	<b>Tixoton C2</b>		
	<b>Konzentration:</b>	<b>4%</b>	<b>4,5%</b>	<b>5%</b>
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,022	1,025	1,028
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	4,2	5,9	<b>Auslaufen stagniert</b>
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,88 - 12,21	12,18 - 15,78	15,75 - 22,46
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	11,975	17,244	22,992
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,635	3,114	3,257
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	3,114	3,353	4,551
Thixotropiewert	Shearometer	0,479	0,239	1,294
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	4,970	5,748
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	4,970	5,748
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	0,000	0,000
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	15,4	18,7	<b>Auslaufen stagniert</b>
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	20,5	26	34
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	8	8	10
<b>Stabilität</b>				
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	5,9	4,4	4,3

Abbildung 4.20: Messergebnisse Bentonit Tixoton C2 von Süd-Chemie

<b>Tixoton C7S</b>			
	Bentonit:	Tixoton C7S	
	Konzentration:	3,5%	4%
<b>Dichte</b>			
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,018	1,019
<b>Fließgrenze</b>			
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	4,9	Auslaufen stagniert
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	12,25 - 15,87	15,86 - 22,63
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	9,101
<b>Gelstärke</b>			
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,156	4,072
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,874	5,269
Thixotropiewert	Shearometer	0,718	1,197
Gelstärke $t_{10''}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	7,664
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	13,412	16,286
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	8,622
<b>Viskosität</b>			
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	27,8	Auslaufen stagniert
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	20	29,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	13	20
<b>Stabilität</b>			
Filtratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	1,3	0

Abbildung 4.21: Messergebnisse Bentonit Tixoton C7S von Süd-Chemie

<b>Super Gel X</b>					
	Bentonit:	Super Gel X			
	Konzentration:	2,5%	3%	3,5%	4%
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,016	1,018	1,020
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	4,5	Auslaufen der Suspension stagniert	Auslaufen der Suspension stagniert
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	12,29 - 15,93	12,27 - 15,90	22,64 - 30,90	22,61 - 30,86
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	9,101	16,286	21,076
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,108	3,976	5,030
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,533	2,156	4,072	5,269
Thixotropiewert	Shearometer		0,048	0,096	0,239
Gelstärke $t_{10''}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	5,748	7,648	12,933
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	7,185	9,560	13,891
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,479	1,437	1,912	0,958
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	12,2	15,8	Auslaufen der Suspension stagniert	Auslaufen der Suspension stagniert
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	15	19,5	29	34
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	10	12	12
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	12,8	11,9	10,8	4,2

Abbildung 4.22: Messergebnisse Bentonit Super Gel X von Cetco

<b>Hydraul EZ</b>					
	<b>Bentonit:</b>	<b>Hydraul EZ</b>			
	<b>Konzentration:</b>	<b>2,5%</b>	<b>3%</b>	<b>3,5%</b>	<b>4%</b>
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,016	1,019	1,021
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	4,3	Auslaufen der Suspension stagniert	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	12,29 - 15,93	15,90 - 22,68	22,63 - 30,88	37,36 - 48,67
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	11,017	19,160	27,782	38,320
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,012	3,736	7,664	11,975
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,156	4,263	7,664	11,496
Thixotropiewert	Shearometer	0,144	0,527	0	-0,479
Gelstärke $t_{\gamma_0}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	7,664	10,059	15,328
Gelstärke $t_{\gamma_0}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	7,664	11,496	17,244
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0	0	1,437	1,916
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	25	Auslaufen der Suspension stagniert	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	31,5	47	64	79
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	20	27	35	39
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,6	1,9	0,2	0

Abbildung 4.23: Messergebnisse Bentonit Hydraul EZ von Cetco

## 4.4.2 Eigenschaften der durch Zugabe von Polymeren modifizierten Bentonitsuspensionen

Die ermittelten Eigenschaften von Bentonitsuspensionen, die durch die Zugabe von Polymeren modifiziert wurden, enthalten die im folgenden dargestellten Diagramme. Als Bezugsgröße und Vergleichsmaßstab ist jeweils in der dritten Spalte die reine Bentonitsuspension mit ihren spezifischen Kennwerten angegeben.

### 4.4.2.1 Reine Polymere in Kombination mit der Basissuspension B2

Bei den reinen Polymeren handelt es sich um:

- Carboxymethylcellulose CMC
- Polyanionische Cellulose PAC
- Stärke
- Xanthan Gum
- Guar Gum

Diese wurden jeweils mit einer 5 % B2-Suspension kombiniert.

<b>B2 + CMC</b>				
	<b>Bentonit:</b>	<b>B2</b>		
	<b>Konzentration:</b>	<b>5%</b>		
	<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit CMC 0,25 %</b>	<b>mit CMC 0,5 %</b>
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,020	1,020
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze <b>dyn <math>t_F</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	$t_m > 3$ min	$t_m > 3$ min
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	68,90 - 77,30	68,89 - 77,29
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	30,177	62,749
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Zylinder nicht eingesunken	Zylinder nicht eingesunken
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	Zylinder nicht eingesunken	Zylinder nicht eingesunken
Thixotropiewert	Shearometer	0,527		
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	15,807	39,278
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	31,135	64,665
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	15,328	25,387
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	$t_m > 3$ min	$t_m > 3$ min
Scheinbare Viskosität <b>nS</b> [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	53,5	117,5
Plastische Viskosität <b>nP</b> [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	22	52
<b>Stabilität</b>				
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	0	0

Abbildung 4.24: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und CMC

<b>B2 + PAC</b>						
		<b>Bentonit:</b>	<b>B2</b>			
		<b>Konzentration:</b>	<b>5%</b>			
		<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit PAC 0,075 %</b>	<b>mit PAC 0,15 %</b>	<b>mit PAC 0,3 %</b>
<b>Dichte</b>						
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,027	1,027	
<b>Fließgrenze</b>						
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich	
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	37,34 - 48,64	48,63 - 58,36	58,36 - 68,82	
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	11,017	19,16	34,009	
<b>Gelstärke</b>						
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	5,269	8,383	10,059	
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	6,706	8,622	11,496	
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	1,437	0,239	1,437	
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	8,143	12,454	17,244	
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	18,202	22,992	30,656	
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	10,059	10,538	13,412	
<b>Viskosität</b>						
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich	
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	19,5	32	55,5	
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	8	12	20	
<b>Stabilität</b>						
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	0	0	0	

Abbildung 4.25: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und PAC

<b>B2 + Stärke</b>				
		<b>Bentonit:</b>	<b>B2</b>	
		<b>Konzentration:</b>	<b>5%</b>	
		<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit Stärke 0,5 %</b>
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,028
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	0,0	0,0
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	3,832	3,832
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Thixotropiewert	Shearometer	0,527		
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	2,874	2,874
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	10,538	10,538
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	7,664	7,664
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	8,5	8,5
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	9	9
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	5	5
<b>Stabilität</b>				
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	4,2	4,2	3,9

Abbildung 4.26: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Stärke

<b>B2 + Xanthan Gum</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Xanthan Gum 0,25 %	mit Xanthan Gum 0,5 %	mit Xanthan Gum 1,0 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,024	1,024
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	7,0	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	12,18 - 15,78	22,56 - 30,79	48,65 - 58,38
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	14,37	22,992	38,320
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	4,551	6,706	12,933
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	5,269	7,664	13,412
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0,718	0,958	0,479
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	6,076	10,538	19,160
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	11,496	15,328	23,950
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	5,42	4,79	4,79
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	32,8	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	24	36	62
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	9	12	22
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	3,8	2,2	0

Abbildung 4.27: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Xanthan Gum

<b>B2 + Guar Gum</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Guar Gum 0,25 %	mit Guar Gum 0,5 %	mit Guar Gum 0,75 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,024	1,024
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	15,78 - 22,51	30,77 - 37,35	68,85 - 77,24
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	12,454	29,698	44,547
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	4,551	21,555	Zylinder nicht eingesunken
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	8,622	23,95	Zylinder nicht eingesunken
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	4,071	2,395	
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	6,706	13,412	17,723
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	14,37	19,639	24,429
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	7,664	6,227	6,706
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich	Versuch nicht möglich
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	23	51	81,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	10	20	35
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	0	0	0

Abbildung 4.28: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Guar Gum

4.4.2.2 Phrikolat Produkte

Bei den Phrikolat Polymeren handelt es sich um:

- Modipol 600
- Filter Control
- Modiflux 230
- Modivis 800/900

Diese wurden jeweils einer 3 % W-Suspension zugegeben. Der Bentonit W wurde als Basismaterial ausgewählt, da es sich um einen reinen Natrium-Bentonit handelt.

<b>W + Modipol 600</b>				
	<b>Bentonit:</b>	<b>W</b>		
	<b>Konzentration:</b>	<b>3%</b>		
	<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit Modipol 600 0,075 %</b>	<b>mit Modipol 600 0,15 %</b>
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,014	1,016	1,017
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze <b>dyn t<sub>F</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	4,0	3,2
Fließgrenze <b>t<sub>F</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,92 - 12,28	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)
Bingham-Fließgrenze <b>t<sub>B</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,227	11,017	12,454
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke <b>t<sub>GS</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Gelstärke <b>t<sub>GS</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Thixotropiewert	Shearometer	0		
Gelstärke <b>t<sub>10''</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	3,832	3,832
Gelstärke <b>t<sub>10</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	6,227	6,227
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	2,395	2,395
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität <b>n'</b> [mPas]	Marsh-Trichter	14,8	19,9	31,7
Scheinbare Viskosität <b>nS</b> [mPas]	Rotationsviskosimeter	19,5	27,5	33
Plastische Viskosität <b>nP</b> [mPas]	Rotationsviskosimeter	13	16	20
<b>Stabilität</b>				
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	12,2	26,3	11,4

Abbildung 4.29: Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Modipol 600

<b>W + Filter Control</b>				
	Bentonit:	<b>W</b>		
	Konzentration:	<b>3%</b>		
	Polymer:	ohne Polymer	mit Filter Control 0,2 %	mit Filter Control 0,4 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,014	1,017	1,018
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	3,4	2,9
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,92 - 12,28	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,227	9,101	8,143
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	1,772	1,916
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	1,772	1,916
Thixotropiewert	Shearometer	0	0	0
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	4,79	4,311
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	4,79	4,311
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0	0	0
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	14,8	17	20,6
Scheinbare Viskosität $nS$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	19,5	22,5	24,5
Plastische Viskosität $nP$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	13	13	16
<b>Stabilität</b>				
Filteratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	12,2	9,9	5,2

Abbildung 4.30: Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Filter Control

<b>W + Modiflux 230</b>			
	Bentonit:	<b>W</b>	
	Konzentration:	<b>3%</b>	
	Polymer:	ohne Polymer	mit Modiflux 230 0,5%
<b>Dichte</b>			
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,014	1,018
<b>Fließgrenze</b>			
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	3,8
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,92 - 12,28	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,227	9,101
<b>Gelstärke</b>			
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	1,820
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	1,820
Thixotropiewert	Shearometer	0	0
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	4,790
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	5,269
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	0,479
<b>Viskosität</b>			
Differentielle Viskosität $n'$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	14,8	16,1
Scheinbare Viskosität $nS$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	19,5	22,5
Plastische Viskosität $nP$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	13	13
<b>Stabilität</b>			
Filteratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	12,2	10,4

Abbildung 4.31: Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Modiflux 230

<b>W + Modivis 800</b>			
	<b>Bentonit:</b>	<b>W</b>	
	<b>Konzentration:</b>	<b>3%</b>	
	<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit Modivis 800 0,2 %</b>
<b>Dichte</b>			
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,014	1,016
<b>Fließgrenze</b>			
dynamische Fließgrenze <b>dyn <math>t_f</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	5,2
Fließgrenze <b><math>t_f</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,92 - 12,28	12,27 - 15,90
Bingham-Fließgrenze <b><math>t_B</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,227	11,496
<b>Gelstärke</b>			
Anfangsgelstärke <b><math>t_{GS}</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	2,730
Gelstärke <b><math>t_{GS}</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	3,353
Thixotropiewert	Shearometer	0	0,623
Gelstärke <b><math>t_{10'}</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	4,311
Gelstärke <b><math>t_{10}</math></b> [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	5,748
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	1,437
<b>Viskosität</b>			
Differentielle Viskosität <b><math>n'</math></b> [Ns/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	14,8	37
Scheinbare Viskosität <b><math>n_S</math></b> [Ns/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	19,5	27
Plastische Viskosität <b><math>n_P</math></b> [Ns/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	13	15
<b>Stabilität</b>			
Filtratwasserabgabe <b>f</b> [ml]	Filterpresse	12,2	2,6

Abbildung 4.32: Messergebnisse Bentonit W Phrikolat 3 Prozent und Modivis 800/900

### 4.4.2.3 Condat Polymere

Bei den Condat Polymeren handelt es sich um:

- F 11
- Visco 2
- VI 34
- Visco M

Diese wurden jeweils einer 5 % B2-Suspension zugegeben. Visco M wurde darüber hinaus als reine Polymerlösung getestet.

<b>B2 + F11</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit F11 1 %	mit F11 2 %	mit F11 3 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,026	1,026
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	Wert ausserhalb der Diagrammskala	Wert ausserhalb der Diagrammskala	Wert ausserhalb der Diagrammskala
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)			
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	3,832	3,832	3,832
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Thixotropiewert	Shearometer	0,527			
Gelstärke $t_{10^0}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	2,395	2,395	2,395
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	9,58	9,58	9,58
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	7,185	7,185	7,185
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n^*$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	Wert ausserhalb der Diagrammskala	Wert ausserhalb der Diagrammskala	Wert ausserhalb der Diagrammskala
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	10	10	10
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	6	6	6
<b>Stabilität</b>					
Filtratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	4,2	2,9	1,3	0,5

Abbildung 4.33: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und F11

<b>B2 + Visco 2</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Visco 2 0,1 %	mit Visco 2 0,2 %	mit Visco 2 0,3 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,027	1,027	1,027
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	58,36 - 68,82	68,82 - 77,21	87,53 - 98,29
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen
Thixotropiewert	Shearometer	0,527			
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664			
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar
<b>Stabilität</b>					
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	4,2	0	0	0

Abbildung 4.34: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Visco 2

<b>B2 + VI34</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit VI34 0,1 %	mit VI34 0,25 %	
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,024	1,024	
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$	
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	68,64 - 77,23	138,40 - 159,58	
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen	
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen	
Thixotropiewert	Shearometer	0,527			
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664			
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$	
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	Wert nicht messbar	Wert nicht messbar	
<b>Stabilität</b>					
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	4,2	0	0	

Abbildung 4.35: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und VI34

<b>Visco M</b>				
	Produkt:	Visco M (Polymerflüssigkeit)		
	Konzentration:	0,25%	0,4%	0,5%
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	0,996	0,977	0,997
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	2,0	4,1
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	6,19 - 8,02
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,395	11,496	14,370
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Thixotropiewert	Shearometer			
Gelstärke $t_{10^{-1}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,437	1,916	2,874
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,437	1,916	2,874
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0	0	0
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	Wert ausserhalb der Diagrammskala	12,9	23,3
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	7,5	21	30
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	9	15
<b>Stabilität</b>				
Filtratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen	Wert nicht gemessen

Abbildung 4.36: Messergebnisse Visco M als reine Polymerlösung

<b>B2 + Visco M</b>			
	Bentonit:	B2	
	Konzentration:	5%	
	Polymer:	ohne Polymer	mit Visco M 0,1 %
<b>Dichte</b>			
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,023
<b>Fließgrenze</b>			
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	4,2
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	15,82 - 22,56
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	27,782
<b>Gelstärke</b>			
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	Wert nicht gemessen
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	Wert nicht gemessen
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	
Gelstärke $t_{10^{-1}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	3,832
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	11,017
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	7,185
<b>Viskosität</b>			
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	16,6
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	14,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	6
<b>Stabilität</b>			
Filtratwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	4,2	2,8

Abbildung 4.37: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Visco M

#### 4.4.2.4 Baroid Produkte

Bei den Baroid Polymeren handelt es sich um:

- No-Sag
- Quick Trol
- N-Seal
- Diamond Seal

Diese wurden jeweils einer 2,5 % Tunnelgel plus-Suspension zugegeben. Da es sich bei N-Seal und Diamond Seal um mechanisch wirkende Stopfmittel handelt, die z.T. quellen, konnten die Suspensionseigenschaften nicht bestimmt werden.

<b>Tunnelgel Plus + No Sag</b>				
	<b>Bentonit:</b>	<b>Tunnelgel Plus</b>		
	<b>Konzentration:</b>	<b>2,5%</b>		
	<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit No Sag 0,08 %</b>	<b>mit No Sag 0,16 %</b>
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,013	1,013
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } \tau_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	3,5	3,5
Fließgrenze $\tau_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	6,12 - 7,93	7,93 - 12,29	7,93 - 12,29
Bingham-Fließgrenze $\tau_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	9,580	12,933
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $\tau_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	2,203
Gelstärke $\tau_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	2,491
Thixotropiewert	Shearometer			0,288
Gelstärke $\tau_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,437	2,874	4,311
Gelstärke $\tau_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	6,706	7,864
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	4,311	3,832	3,353
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	13,9	22,9	31,2
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	17	26	31,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	10	16	18
<b>Stabilität</b>				
Filterverlust [m]	Filterpresse	6,1	6,2	6

Abbildung 4.38: Messergebnisse Bentonit Baroid Tunnelgel plus 2,5 Prozent und No-Sag

Tunnelgel Plus + Quik Trol				
	Bentonit:	Tunnelgel Plus		
	Konzentration:	2,5%		
	Polymer:	ohne Polymer	mit Quik Trol 0,06 %	mit Quik Trol 0,12 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,013	1,014
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $dyn\ t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	1,0	5
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	6,12 - 7,93	7,93 - 12,29	7,92 - 12,28
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	10,538	13,412
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	8,143
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein	10,059
Thixotropiewert	Shearometer			1,916
Gelstärke $t_{10^{-2}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,437	1,916	2,395
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	6,227	6,706
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	4,311	4,311	4,311
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	13,9	27,1	30
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	17	28	34
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	10	17	20
<b>Stabilität</b>				
Filterverlust [ml]	Filterpresse	6,1	7,5	3,3

Abbildung 4.39: Messergebnisse Bentonit Baroid Tunnelgel plus 2,5 Prozent und Quik Trol

#### 4.4.2.5 Cetco Produkte

Bei den Cetco Polymeren handelt es sich um:

- Rel PAC
- Suspend IT

Diese wurden jeweils einer 2,5 % Super Gel X-Suspension zugegeben.

Super Gel X + Rel PAC				
	Bentonit:	Super Gel X		
	Konzentration:	2,5%		
	Polymer:	ohne Polymer	mit Rel PAC 0,06 %	mit Rel PAC 0,24 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,014	1,014
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	5,8	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	12,29 - 15,93	12,28 - 15,92	12,28 - 15,92
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	12,933	29,219
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,826	2,874
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,533	3,450	4,790
Thixotropiewert	Shearometer		0,624	1,916
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	5,289	10,059
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	7,664	16,286
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,479	2,395	6,227
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	12,2	30,4	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	15	32,5	65,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	19	35
<b>Stabilität</b>				
Filterverlust [ml]	Filterpresse	12,8	5,5	3,7

Abbildung 4.40: Messergebnisse Bentonit Cetco Super Gel X 2,5 Prozent und Rel PAC

Super Gel X + Suspend It				
	Bentonit:	Super Gel X		
	Konzentration:	2,5%		
	Polymer:	ohne Polymer	mit Suspend It 0,06 %	mit Suspend It 0,24 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,013	1,014	1,014
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	3,0	5,0	7,0
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	12,29 - 15,93	12,28 - 15,92	15,92 - 22,71
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	5,748	11,017	18,765
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	Zylinder sinkt vollständig ein	2,778	3,888
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,533	3,209	4,934
Thixotropiewert	Shearometer		0,431	1,246
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	3,832	6,227
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	8,706	9,101
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,479	2,874	2,874
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	12,2	24,6	45,7
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	15	25,5	36,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	14	19
<b>Stabilität</b>				
Filterverlust [ml]	Filterpresse	12,8	8,6	4,9

Abbildung 4.41: Messergebnisse Bentonit Cetco Super Gel X 2,5 Prozent und Suspend IT

#### 4.4.2.6 Ciba Specialities Polymere

Bei den Ciba Polymeren handelt es sich um:

- Alcomer 507
- Alcomer 1771

Diese wurden jeweils einer 5 % B2-Suspension zugegeben.

<b>B2 + Alcomer 507</b>				
	Bentonit:	<b>B2</b>		
	Konzentration:	<b>5%</b>		
	Polymer:	ohne Polymer	mit Alcomer 507 0,25 %	mit Alcomer 507 0,5 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,025
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	15,78 - 22,51	15,78 - 22,51
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	27,782	32,093
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	3,593	3,736
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	3,593	3,736
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0	0
Gelstärke $t_{10'}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	8,227	7,185
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	10,059	7,185
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	3,832	0
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	69	84,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	40	51
<b>Stabilität</b>				
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	4,2	0	0

Abbildung 4.42: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Alcomer 507

<b>B2 + Alcomer 1771</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Alcomer 1771 0,05 %	mit Alcomer 1771 0,1 %	mit Alcomer 1771 0,2 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,025	1,023
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\tau_{dyn}$ $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	4,8	<i>Auslaufen stagniert</i>	$t_m > 3$ min
Fließgrenze $\tau_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	15,77 - 22,50	15,79 - 22,53	15,82 - 22,56
Bingham-Fließgrenze $\tau_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	9,101	16,286	24,908
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $\tau_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	2,874	4,551	4,79
Gelstärke $\tau_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	3,593	5,269	5,748
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0,719	0,718	0,958
Gelstärke $\tau_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	6,706	7,185	8,143
Gelstärke $\tau_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	11,496	11,496	13,412
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	4,790	4,311	5,269
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	8,9	36,4	<i>Auslaufen stagniert</i>	$t_m > 3$ min
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	45,5	56	67
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	36	39	41
<b>Stabilität</b>					
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	4,2	41,7	27,5	8,3

Abbildung 4.43: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Alcomer 1771

## 4.4.2.7 Degussa/Basf Polymere

Bei den Degussa/Basf Polymeren handelt es sich um:

- Polydrill
- Biovis
- Bioflow
- Polyvis II

Diese wurden jeweils einer 5 % B2-Suspension zugegeben.

<b>B2 + Polydrill</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Polydrill 0,3 %	mit Polydrill 1,0 %	mit Polydrill 2,0 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,027	1,030	1,036
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	2,0	2,4	2,9
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	12,17 - 15,77	7,83 - 12,14	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	4,78	3,353	3,353
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	3,257	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	2,778	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	-0,479		
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	5,269	1,916	1,437
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	11,496	6,227	5,748
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	6,227	4,311	4,311
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	9,3	9,9	10,9
Scheinbare Viskosität $n_S$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	11	11,5	13,5
Plastische Viskosität $n_P$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	6	8	10
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	5,66	1,3	0,0

Abbildung 4.44: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Polydrill

<b>B2 + Biovis</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Biovis 0,15 %	mit Biovis 0,75 %	mit Biovis 1,5 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,026	1,026
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,8	3,6	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	6,06 - 7,85	68,82 - 77,21	108,36 - 118,62
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	5,269	30,177	Wert ausserhalb des Messbereichs
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	1,82	Wert nicht ablesbar	Wert nicht ablesbar
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	2,156	Wert nicht ablesbar	Wert nicht ablesbar
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0,336		
Gelstärke $t_{10^{\cdot}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	2,874	10,059	13,891
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	10,538	17,244	21,076
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	7,664	7,185	7,185
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	8,8	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	10,5	106,5	Wert ausserhalb des Messbereichs
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	5	75	Wert ausserhalb des Messbereichs
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	3,07	0,0	0,0

Abbildung 4.45: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Biovis

<b>B2 + Bioflow</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Bioflow 0,15 %	mit Bioflow 0,75 %	mit Bioflow 1,5 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,026	1,026	1,026
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,8	4,5	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	12,17 - 15,77	37,33 - 48,64	68,84 - 77,23
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	11,017	29,698	53,648
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	3,593	8,383	19,160
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	4,551	10,538	23,950
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0,958	2,155	4,79
Gelstärke $t_{10^{\cdot}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	5,269	15,328	34,967
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	11,975	22,513	35,925
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	6,706	7,185	0,958
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	25,8	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	20,5	44	89
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	9	13	33
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	2,88	0,0	0,0

Abbildung 4.46: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Bioflow

<b>B2 + Polyvis II</b>					
	<b>Bentonit:</b>	<b>B2</b>			
	<b>Konzentration:</b>	<b>5%</b>			
	<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit Polyvis II 0,2 %</b>	<b>mit Polyvis II 0,4 %</b>	<b>mit Polyvis II 0,6 %</b>
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,028	1,030	1,031
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	3,2	3,3	3,5
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	22,48 - 30,68	22,45 - 30,64	22,43 - 30,61
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	6,706	8,622	10,059
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	2,156	2,491	2,874
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	2,395	2,587	3,593
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0,239	0,096	0,719
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	8,143	9,58	11,975
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	15,807	16,765	17,723
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	7,664	7,185	5,748
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	12,7	16,7	20,8
Scheinbare Viskosität $n_S$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	13	15	19,5
Plastische Viskosität $n_P$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	6	6	9
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	7,7	9,8	12,6

Abbildung 4.47: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Polyvis II

#### 4.4.2.8 Süd-Chemie Produkte

Bei den Süd-Chemie Polymeren handelt es sich um:

- SC Mud P
- SC Vis

Diese wurden jeweils einer 3 % Bentonil XR-Suspension sowie einer 4 % Tixoton C2-Suspension zugegeben.

<b>Bentonil XR + SC Mud P</b>					
		<b>Bentonit:</b>	<b>Bentonil XR</b>		
		<b>Konzentration:</b>	<b>3%</b>		
		<b>Polymer:</b>	<b>ohne Polymer</b>	<b>mit SC Mud P 0,1 %</b>	<b>mit SC Mud P 0,2 %</b>
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas		1,018	1,018	1,018
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter		2,8	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe		alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	7,91 - 12,27	7,91 - 12,27
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter		9,580	18,881	21,555
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer		1,724	2,156	2,635
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer		1,772	2,156	3,114
Thixotropiewert	Shearometer		0,048	0	0,479
Gelstärke $t_{10''}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter		3,832	3,353	5,748
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter		6,706	4,79	7,185
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter		2,874	1,437	1,437
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter		19,7	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter		24	45,5	51,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter		14	26	29
<b>Stabilität</b>					
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse		11,3	$\infty$	$\infty$

Abbildung 4.48: Messergebnisse Bentonit Bentonil XR 3 Prozent und SC Mud P

Bentonil XR + SC VIS HVP				
	Bentonit:	Bentonil XR		
	Konzentration:	3%		
	Polymer:	ohne Polymer	mit SC VIS HVP 0,1 %	mit SC VIS HVP 0,2 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,016	1,016	1,016
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	2,8	4,2	6,0
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	6,11 - 7,91	6,10 - 7,91
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	9,580	14,849	21,076
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,724	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,772	Zylinder sinkt vollständig ein	Zylinder sinkt vollständig ein
Thixotropiewert	Shearometer	0,048		
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	2,874	2,874
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	6,706	4,311	4,311
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	2,874	1,437	1,437
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	19,7	32,0	52,7
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	24	36,5	48
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	14	21	26
<b>Stabilität</b>				
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	11,3	29,9	18,7

Abbildung 4.49: Messergebnisse Bentonit Bentonil XR 3 Prozent und SC Vis

Tixoton C2 + SC Mud P				
	Bentonit:	Tixoton C2		
	Konzentration:	4%		
	Polymer:	ohne Polymer	mit SC Mud P 0,1 %	mit SC Mud P 0,2 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,022	1,020	1,016
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	4,2	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,88 - 12,21	6,09 - 7,89	6,11 - 7,91
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	11,975	3,832	3,832
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,635	1,82	3,593
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	3,114	2,682	5,269
Thixotropiewert	Shearometer	0,479	0,862	1,676
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	2,874	5,748
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	11,496	17,723
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	8,622	11,975
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	15,4	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	20,5	36	36
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	8	32	32
<b>Stabilität</b>				
Filterwasserabgabe $f$ [ml]	Filterpresse	5,9	38,2	224

Abbildung 4.50: Messergebnisse Bentonit Tixoton C2 4 Prozent und SC Mud P

Tixoton C2 + SC VIS HVP				
	Bentonit:	Tixoton C2		
	Konzentration:	4%		
	Polymer:	ohne Polymer	mit SC VIS HVP 0,1 %	mit SC VIS HVP 0,2 %
<b>Dichte</b>				
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,022	1,022	1,021
<b>Fließgrenze</b>				
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	4,2	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	7,88 - 12,21	15,84 - 22,59	37,36 - 48,67
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	11,975	16,286	29,698
<b>Gelstärke</b>				
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	2,635	8,622	5,269
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	3,114	9,101	7,185
Thixotropiewert	Shearometer	0,479	0,479	1,916
Gelstärke $t_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	13,891	20,118
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	22,034	32,093
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	0,000	8,143	11,975
<b>Viskosität</b>				
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	15,4	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	20,5	33	68
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	8	16	37
<b>Stabilität</b>				
Filtratwasserabgabe f [ml]	Filterpresse	5,9	0	0

Abbildung 4.51: Messergebnisse Bentonit Tixoton C2 4 Prozent und SC Vis

### 4.4.2.9 Wolf Cellulosics Polymere

Bei dem Polymer von Wolf Cellulosics handelt es sich um:

- Antisol 30.000

Dieses wurden einer 5 % B2-Suspension zugegeben.

<b>B2 + Antisol 30000</b>					
	Bentonit:	<b>B2</b>			
	Konzentration:	<b>5%</b>			
	Polymer:	ohne Polymer	mit Antisol 30000 0,1 %	mit Antisol 30000 0,2 %	mit Antisol 30000 0,5 %
<b>Dichte</b>					
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,026	1,027	1,028	1,029
<b>Fließgrenze</b>					
dynamische Fließgrenze $\text{dyn } t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Marsh-Trichter	1,6	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	alle Kugeln eingesunken (leichter Kugelsatz)	37,33 - 48,63	60,79 - 68,82	68,80 - 77,18
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	3,832	13,412	23,471	59,396
<b>Gelstärke</b>					
Anfangsgelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,437	5,988	8,622	13,412
Gelstärke $t_{GS}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Shearometer	1,964	6,227	8,622	19,160
Thixotropiewert	Shearometer	0,527	0,239	0	5,748
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	2,874	6,706	11,017	30,656
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	10,538	20,597	24,429	51,732
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	7,664	13,891	13,412	21,076
<b>Viskosität</b>					
Differentielle Viskosität $n'$ [mPas]	Marsh-Trichter	6,9	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$	$t_m > 3 \text{ min}$
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9	23	40,5	106
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	9	16	44
<b>Stabilität</b>					
Filterverlust [ml]	Filterpresse	4,2	0,0	0,0	kein Versuch möglich

Abbildung 4.52: Messergebnisse Bentonit B2 Ibeco 5 Prozent und Antisol 30.000

# Kapitel 5

## Grundlagen der Ringspaltinjektion

Stütz- und Gleitmittel in der Form von Bentonitsuspensionen werden beim Rohrvortrieb durch Einpressen in den durch den Überschneidung erzeugten Ringspalt eingesetzt. In der Funktion als Gleitmittel dient die eingesetzte Suspension zur Verminderung der Mantelreibung am Umfang des Rohrstranges und der Vortriebsmaschine; als Stützmittel dient sie zur Stützung des Ringspalts [STEIN 2003].

Verfahrenstechnisch gesehen handelt es sich bei der Ringspaltstützung um ein Einpressen im Sinne von [DIN 4093 1987]. Darunter versteht man das *das Einbringen von Einpressgut (Anmerkung: pumpbarer Stoff zum Füllen von Hohlräumen; auch Injektionsmittel genannt) unter Druck in Hohlräume des Untergrundes* über Injektionsstutzen.

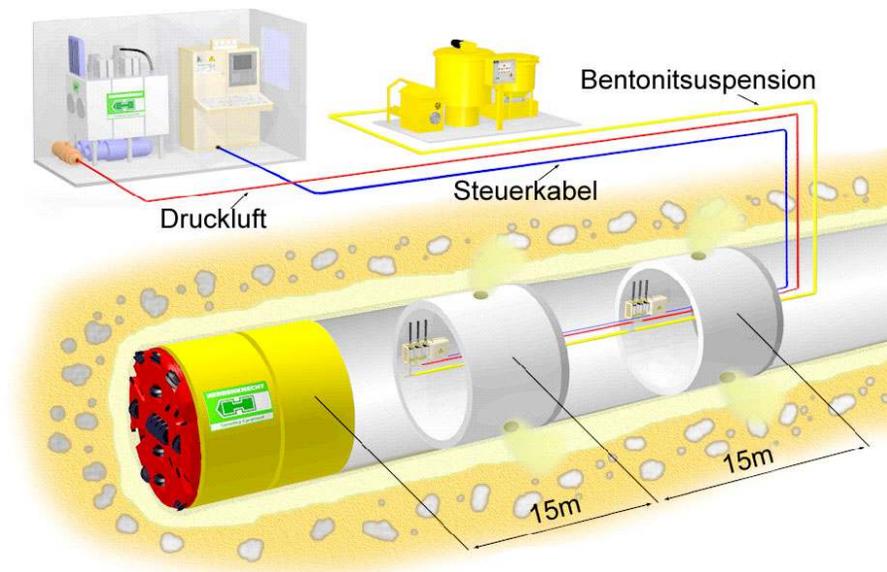
Beim Einpressen, nachfolgend auch Injektion genannt, soll möglichst ein durchgehender Schmierfilm erzeugt werden, in dem im Idealfall der Rohrstrang schwebt. Dies setzt nach [STEIN 2003] voraus, dass

- der Ringspalt genügend groß ist (im Lockergestein mindestens 20 mm, im Fels sogar bis 30 mm) und als Hohlraum während der Vortriebsarbeiten über die gesamte Vortriebslänge erhalten bleibt,
- das Injektionsmittel in der jeweiligen Vortriebsphase die Eigenschaft einer Flüssigkeit behält, nicht über die Bohrlochwandung in den anstehenden Baugrund entweicht bzw. abwandernde Injektionsmittelmengen immer wieder ausgeglichen werden.

Bezüglich der Injektionstechnik beim Rohrvortrieb unterscheidet man nach [STEIN 2003]:

- Einpressen im Bohrkopfbereich
- Einpressen über Injektionsstutzen im nichtbegehbaren Rohrstrang
- Einpressen über Injektionsstutzen von Hand im begehbaren Rohrstrang
- automatisches Einpressen über Injektionsstutzen im Rohrstrang (Abbildung 5.1)

Bei der Injektion von Bentonitsuspensionen in den Ringspalt ist auf eine möglichst gleichmäßige Beaufschlagung der gesamten Rohrmantelfläche zu achten. Einpressdrücke, Viskosität und Verbrauchsmengen sind laufend zu überprüfen und so zu wählen, dass Schäden an der Leitung und benachbarten Bauwerken vermieden werden.



**Abbildung 5.1:** Automatisches Schmierersystem des Herstellers Herrenknecht [Herrenknecht AG 2003]

Bei Langstrecken- und Kurvenvortrieben stellt das automatische Einpressen der Bentonitsuspension zur kontinuierlichen und sicheren Schmierung des Rohrstranges den Stand der Technik dar. In diesem Anwendungsfall wird die Schmierung zeit-, volumen- oder druckabhängig automatisch durch gezieltes Ansteuern der einzelnen Schmierstationen und Injektionsstutzen durchgeführt. Die Injektionsbedingungen werden in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers, der Vortriebslänge sowie der geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen vom Maschinenführer am PC des Steuerstandes vorgenommen und können jederzeit geändert werden. Gebräuchliche Werte in der Praxis sind z.B. maximal 5 bar Injektionsdruck oder 20 Sekunden Injektionsdauer pro Injektionsstutzen [STEIN 2003].

Um die im Kapitel 1 formulierten Injektionsziele hinsichtlich einer **erhöhten Standfestigkeit des aufgefahrenen Hohlraumes (Ringspalt)** und der **Verringerung der Bodendurchlässigkeit** gegenüber dem eingesetzten Injektionsmittel zu erreichen, sind zum einen der anstehende Boden hinsichtlich seiner Injizierbarkeit (Kapitel 5.1) zu bewerten und die möglichen Stützmechanismen der injizierten Bentonitsuspension (Kapitel 5.2) zu differenzieren.

An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass sich die Forschungsarbeiten auf die Injektion von Bentonitsuspensionen in nichtbindiges Lockergestein konzentrieren.

## 5.1 Injizierbarkeit von nichtbindigem Lockergestein

Um eine Aussage treffen zu können, ob der Untergrund injizierbar ist bzw. welches Injektionsmittel für die Injektion verwendet wird, müssen die Kenngrößen des anstehenden Bodens bekannt sein. Kriterien für die Injizierbarkeit von nichtbindigem Lockergestein sind in erster Linie die Durchlässigkeit und Kornverteilung sowie die Porengeometrie. Es ist anzumerken, dass diese Kriterien alle in einem engen Zusammenhang stehen und demnach nicht exakt von einander getrennt betrachtet werden können.

### 5.1.1 Beurteilung der Injizierbarkeit nach der Kornverteilung

Ein Merkmal für die Beurteilung der Einpressfähigkeit von Lockergesteinen ist die Kornverteilungskurve. Die Abhängigkeit zwischen der Korngrößenverteilung und der Korngröße innerhalb des verwendeten Injektionsgutes führt zu den in Abbildung 5.2 dargestellten Einsatzgrenzen [Schmidt u. Seitz 1998].

	Verfestigung	temporär	Abdichtung	
			Suspensionen	permanent Kunststoffe
Lockergestein	$\sigma_u = 1-5$	$k_f = 5 \cdot 10^{-6}$	$k_f = 3 \cdot 10^{-7}$	$k_f = 1 \cdot 10^{-7}$
Fels	$\sigma_u = 1500$	5 Lu	0,5 Lu	0,1 Lu

$\sigma_u$  = einaxiale Druckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>]

$k_f$  = Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Lu = Transmissivität in Lugeon [ $\frac{l}{m \cdot min}$  bei 10 bar]

**Abbildung 5.2:** Einsatzgrenzen der Injektionsmittel in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung [Perbix u. Teichert 1995]

Gemäß Abbildung 5.2 sind Suspensionen auf der Basis von Bentonit und/oder Zement in Sandböden nicht mehr anwendbar [Schmidt u. Seitz 1998].

Für ein Gelingen der Injektion müssen die größten Körner der Suspension die feinsten Porenkanäle im Einpressbereich passieren können. Aus dieser Überlegung ergibt sich nach [Kutzner 1991], in Anlehnung an die Filtergesetze, folgendes Kriterium. Eine Injektion ist möglich, wenn gilt:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \geq 40 \quad (5.1)$$

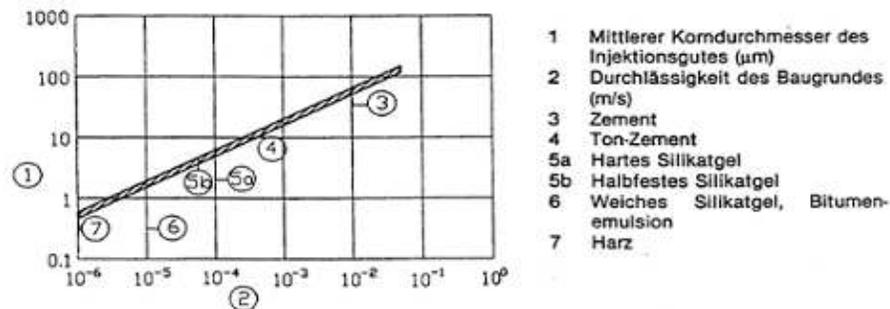
mit:

$D_{15}$  = Korndurchmesser des Lockergesteins bei 15 % Siebdurchgang

$d_{85}$  = Korndurchmesser innerhalb der Suspension bei 85 % Siebdurchgang

### 5.1.2 Beurteilung der Injizierbarkeit nach der Durchlässigkeit

Eine bedeutende Kenngröße für die Beurteilung des Untergrundes hinsichtlich der Injektion ist die Durchlässigkeit des Bodens gegenüber Wasser. Nach den Ausführungen von [Cambefort 1969] besteht zwischen der Durchlässigkeit des Baugrundes und der mittleren Korngröße des Injektionsmediums ein enger Zusammenhang. Das in Abbildung 5.3 dargestellte Diagramm gibt einen ersten Anhalt für die Injizierfähigkeit von Lockergesteinen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die verwendeten Suspensionen nicht sedimentieren oder ausflocken.



**Abbildung 5.3:** Eindringfähigkeit von Injektionsgut in Lockergestein nach der Durchlässigkeit des Bodens und der Korngröße des Injektionsmittels [Cambefort 1969]

Die Anwendbarkeit eines solchen Diagramms erfährt jedoch durch nachfolgende Überlegungen eine gewisse Einschränkung [Kutzner 1991]:

- Die Durchlässigkeit des zu injizierenden Bodens gegenüber Wasser ist nicht identisch mit derjenigen gegenüber Injektionsmitteln mit zeitabhängiger Viskosität und/oder vorhandener Fließgrenze.
- Der Begriff des *mittleren Korndurchmessers des Injektionsgutes* ist für Silikatgele und Harze nicht schlüssig, da sie in diesem Sinne keine Korngröße haben.

Die [DIN 4093 1987] macht Angaben zu den Einsatzmöglichkeiten verschiedener Injektionsmittel in Abhängigkeit von der Bodenart bzw. des Durchlässigkeitsbeiwertes.

### 5.1.3 Beurteilung der Injizierbarkeit nach der Porengeometrie

Für eine Injektion in nichtbindiges Lockergestein sind das Porenvolumen sowie die Porengeometrie von großer Bedeutung. Die Größe des Porenvolumens hängt direkt von der Körnungverteilung und der Kornform ab. Wie die Körnung stellt auch die Porengrößenverteilung ein Kontinuum dar, das in konventionell festgelegte Bereiche eingeteilt werden kann. Die aus der Bodenkunde stammende Unterteilung in unterschiedliche Porengrößenbereiche ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Dabei wird bei der Einteilung von kugelförmig idealisierten Porendurchmessern  $d_p$  ausgegangen [Semprich u. Stadler 2001, Scheffer u. Schachtschnabel 2002].

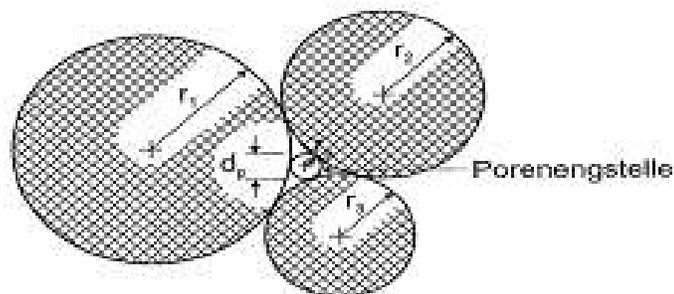
Porengrößenbereich	Porendurchmesser $d_p$ [mm]
Grobporen	$>0,01$
Mittelporen	$0,0002-0,01$
Feinporen	$<0,0002$

**Abbildung 5.4:** Porengrößenbereiche [Semrich u. Stadler 2001]

Für einen idealisierten Boden, der aus gleich großen und kugelförmigen Körnern besteht, lässt sich in Abhängigkeit der Anordnung der Körner untereinander der Porenanteil und die Geometrie des Porenvolumens mathematisch exakt beschreiben. In diesem Fall entspricht das Haufwerk einem Einkornboden, der im Kornverteilungsdiagramm eine senkrechte Gerade ergeben würde. Ein Boden dieser Form kommt allerdings in der Natur nicht vor.

Natürliche Böden sind aus unterschiedlich großen und verschiedenförmigen Körnern zusammengesetzt und haben daher eine unregelmäßige Porengeometrie. Porenvolumen, -größe und -verteilung lassen sich demzufolge mathematisch nicht mehr in geschlossener Form beschreiben [Semrich u. Stadler 2001].

Anhand eines von [Silveira 1965] und [Schulze 1992, Schulze 1993] entwickelten Modells, ist es dennoch möglich eine Aussage über die Größe der Poren und deren Verteilung und somit über die Injizierbarkeit eines Bodens zu treffen. Für diese Modellvorstellung wurde der Begriff der Porenengstelle eingeführt. Hierbei handelt es sich um den Zwischenraum, der durch drei sich berührende, unterschiedlich oder gleich große, kugelförmig angenommene Körner gebildet wird (Abbildung 5.5).



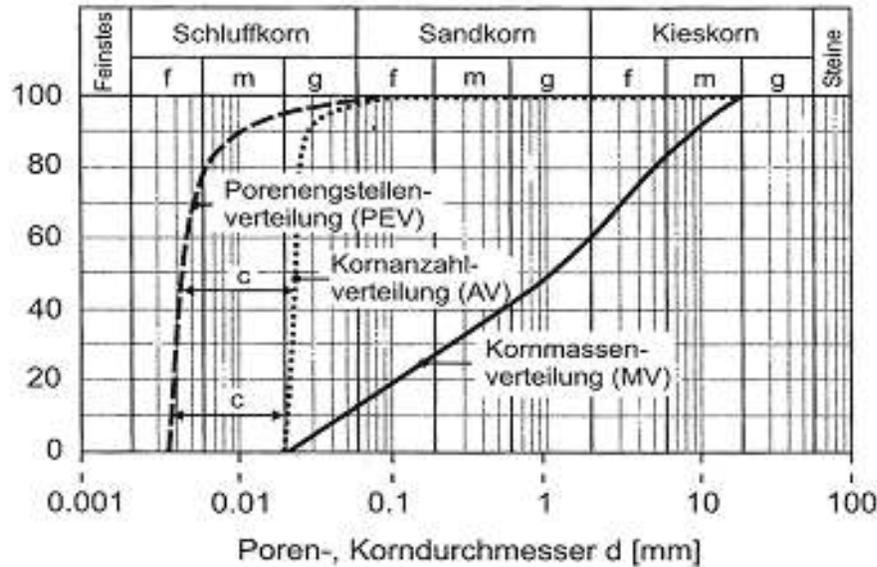
**Abbildung 5.5:** Ebener Schnitt durch eine Porenengstelle [Schulze 1993]

Die Porenengstelle wird zu einem, von den drei sich berührenden Körnern einbeschriebenen Kreis mit dem Radius  $r_P$  idealisiert. Der Durchmesser  $d_P$  dieser idealisierten Porenengstelle beträgt demnach:

$$d_P = 2 \cdot r_P [m] \quad (5.2)$$

Die unterschiedlichen Größen der Porenengstellen und deren Verteilung innerhalb eines natürlich vorkommenden Bodens lassen sich anhand der Körnungslinie (Abbildung 5.6 -

MV) ermitteln. Hierfür wird zunächst die Kornanzahlverteilungskurve berechnet und im gleichen Diagramm dargestellt (Abbildung 5.6 - AV).



**Abbildung 5.6:** Ermittlung der Porenengstellenverteilung aus der Körnungskurve [Schulze 1993]

Weiter wird die Kornanzahlverteilungskurve in  $i$  Klassen (mindestens fünf) mit einem jeweils repräsentativen Korndurchmesser  $d_i$  unterteilt. Anschließend werden alle möglichen Kombinationen von drei sich berührenden Körnern unterschiedlichen Durchmessers  $d_i$  zusammengestellt und diesen anhand der Kornanzahlverteilungskurve eine Auftretenswahrscheinlichkeit  $p$  zugeordnet.

Durch Aufaddieren dieser Auftretenswahrscheinlichkeiten, bei gleichzeitigem Ordnen nach der Größe des zugehörigen Porenengstellendurchmessers  $d_P$ , lässt sich im Kornverteilungsdiagramm eine so genannte Porenengstellenverteilungskurve abbilden (Abbildung 5.6 - PEV). Diese Kurve gibt an, wieviel Prozent der Porenengstellen einen kleineren oder größeren Porendurchmesser als der betrachtete Porenengstellendurchmesser  $d_P$  aufweisen [Semprich u. Stadler 2001]. Nach Untersuchungen von Schulze [51] besteht zwischen Kornanzahl- und Porenengstellenverteilung folgender Zusammenhang:

$$d_P = \frac{1}{c} \cdot d[m] \quad (5.3)$$

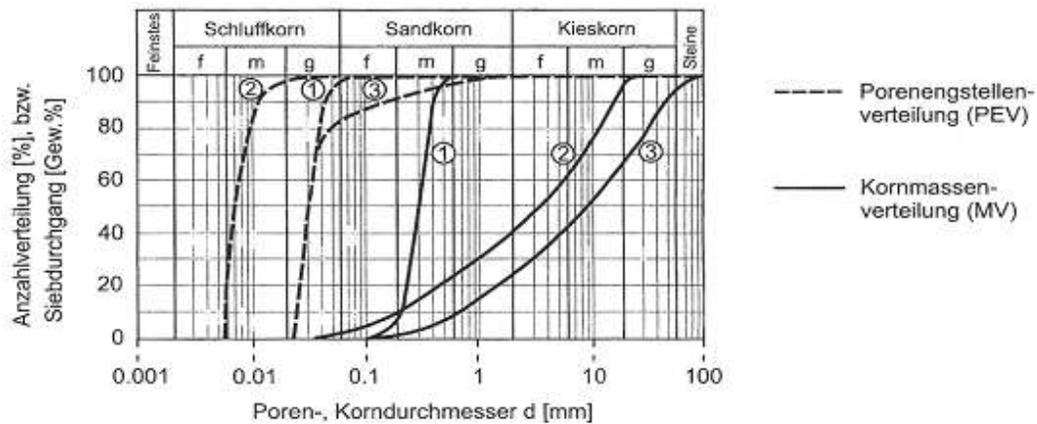
mit:

$c = 5,5$  für ungleichförmige Böden

$c = 6,5$  für gleichförmige Böden

Im oberen Bereich der Kurven gibt es eine Abweichung zu Gleichung 5.1.3. Diese ist für die Beurteilung der Injizierbarkeit eines nichtbindigen Lockergesteins jedoch nicht von Bedeutung [Schulze 1993].

In Abbildung 5.7 sind beispielhaft die Porenengstellenverteilungskurven für drei unterschiedliche Böden abgebildet. Der Boden, für den sich die kleinsten Porenengstellen ergeben, ist am schwersten injizierbar.



**Abbildung 5.7:** Porenengstellenverteilungen verschiedener Böden [Schulze 1993]

Damit eine Injektion durchgeführt werden kann, das heißt, dass das Injektionsgut in die Poren des Bodens eindringt, muss die Körnungslinie der im Einpressmittel verwendeten Feststoffe im Diagramm links von der Porenengstellenverteilungskurve liegen. Diese Aussage beruht jedoch auf der Annahme einer dichtesten Lagerung des Bodens. In der Natur können die vorkommenden Lagerungsdichten allerdings zwischen locker und dicht schwanken, so dass häufig auch Einpressmittel mit einer gröberen Kornverteilung als oben angegeben für eine Injektion geeignet sein können [Semprich u. Stadler 2001].

## 5.2 Stützmechanismen von Bentonitsuspensionen im nichtbindigen Lockergestein

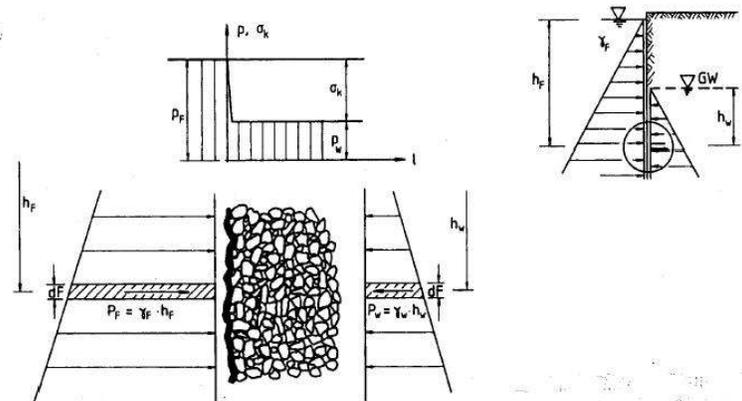
Für die stabilisierenden bzw. stützende Wirkung der Bentonitsuspension im nicht standfesten Boden bestehend aus nichtbindigem Lockergestein ist neben der Fließgrenze  $\tau_F$ , Stabilität und Dichte vor allem das Eindringverhalten der Suspension in den abzustützensden Boden von Bedeutung. In Abhängigkeit des spezifischen Eindringverhaltens kann nach [Kilchert u. Karstedt 1984] der aufzubringende Stützdruck auf das umliegende Korngerüst des Bodens durch drei unterschiedliche Mechanismen übertragen werden:

- Stützdruckübertragung bei vollständiger Filterkuchenbildung
- Stützdruckübertragung bei reiner Eindringung
- Stützdruckübertragung bei unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung

### 5.2.1 Stützdruckübertragung bei vollständiger Filterkuchenbildung

Nach [Kilchert u. Karstedt 1984] bedeutet die Filterkuchenbildung *das Abscheiden von Feststoffteilchen aus der Suspension an der Grenzfläche zwischen Boden und Stützflüssigkeit*.

Sind die Feststoffpartikel der Stützflüssigkeit größer als der Durchmesser der Porenkanäle des Bodens, werden die Poreneingänge vollkommen verschlossen und die an der Ringraumwand liegenden Bodenkörner in ihrer Lage fixiert. Die Suspension kann nicht mehr in den Boden eindringen. Durch den Druckunterschied zwischen Suspension und Porenraum kommt es zur teilweisen Trennung der festen und flüssigen Suspensionsphasen (Filtration). Die Bentonitpartikel werden an der Oberfläche der Ringraumwand ausgefiltert und das Filtrat fließt in den Boden ab. An der Grenzfläche zwischen Boden und Suspension bildet sich ein vollkommener Filterkuchen aus, der auch als *äußerer Filterkuchen* bezeichnet wird (Abbildung 5.8) [Walz 2000, Triantafyllidis 2002].



**Abbildung 5.8:** Schematische Darstellung der Filterkuchenbildung [Kilchert u. Karstedt 1984]

Diese weitgehend wasserundurchlässige Filterkuchenschicht wirkt als Membran, durch die der wirksame Stützdruck vollständig auf den Erdkörper übertragen wird. Dies wird membranartige Stützdruckübertragung genannt. Sie erfolgt gemäß folgender Gleichung. Dabei ist die Druckdifferenz  $\Delta p$  als normal zur Ringraumwandung gerichtete Spannung  $\sigma_x$  wirksam [Triantafyllidis 2002].

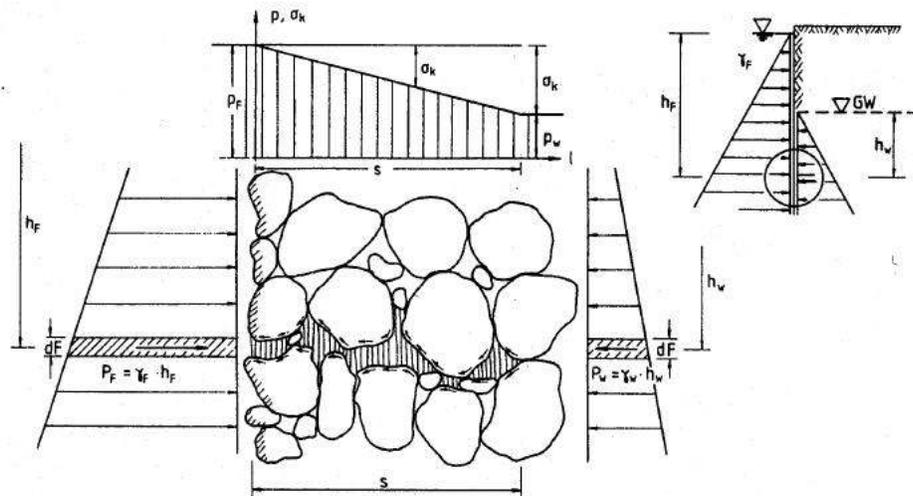
$$\sigma_x = \Delta p \quad (5.4)$$

Dieser Mechanismus der Stützkraftübertragung findet zumeist nur bei feinporigen bzw. feinkörnigen Böden ( $d_{10} = 0,2 \text{ mm}$ ) statt [Walz 2000].

### 5.2.2 Stützdruckübertragung bei reiner Eindringung

Bei grobkörnigen bzw. -porigen Böden sind die Feststoffteilchen der Suspension kleiner als der Porendurchmesser des Bodens. Die Bentonitpartikel sind nicht in der Lage die

Poreneingänge durch Brückenbildung zu verschließen. Die Suspension dringt ohne Filterkuchenbildung in den Porenraum des Bodens ein und erzeugt dabei aufgrund ihrer Fließgrenze  $t_F$  Schubspannungen entlang der Wandungen der Porenkanäle (Abbildung 5.9). Beim weiteren Eindringen der Suspension in den Boden wird der Flüssigkeitsdruck immer mehr abgebaut und dabei auf das Korngerüst übertragen. Der Fließvorgang stagniert, wenn das über die Porenkanaloberfläche gebildete Integral der Schubspannungen mit der Differenzdruckkraft zwischen Suspension und Grundwasser im Gleichgewicht steht [Walz 2002, Kilchert u. Karstedt 1984].



**Abbildung 5.9:** Schematische Darstellung der Eindringung [Kilchert u. Karstedt 1984]

Nach dieser Modellvorstellung wird der Differenzdruck zwischen Suspension und Grundwasser durch (statische) Schubspannungen gleichmäßig über die Eindringlänge an das Korngerüst abgegeben und steht an ihrem Ende voll als effektive Spannung zur Stützung der Ringraumwandung zur Verfügung. Im Inneren des zu stützenden Erdkörpers entsteht über den Bereich, in den die Bentonitsuspension eingedrungen ist, eine nahezu wasserundurchlässige Zone. Diese Zone wird als *innerer* Filterkuchen bezeichnet [Walz 2000].

Die Eindringtiefe  $s$  hängt neben der Druckdifferenz von der Korngröße des anstehenden Bodens und von der Scherfestigkeit der Suspension ab. Basierend auf Versuchserien von [Weiss 1967, Müller-Kirchenbauer 1977, Ruppert 1980] kann sie nach folgender Formel berechnet werden:

$$s = \frac{d_{10}}{2 \cdot \tau_F} \cdot \Delta p \quad (5.5)$$

mit:

$s$  = Eindringtiefe [mm]

$d_{10}$  = Korndurchmesser bei 10% Siebdurchgang [mm]

$\tau_F$  = Fließgrenze der Bentonitsuspension [ $N/mm^2$ ]

$\Delta p$  = Flüssigkeitsdruckdifferenz [ $N/mm^2$ ]

Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft Eindringtiefen von Bentonitsuspensionen in Abhängigkeit von der Fließgrenze  $\tau_F$ , der Druckdifferenz  $\Delta p$  und dem Korndurchmesser  $d_{10}$  bei 10% Siebdurchgang.

Fließ- grenze N/m <sup>2</sup>	$\Delta p = 15.000 \text{ N/m}^2$		$\Delta p = 30.000 \text{ N/m}^2$	
	$d_{10}$		$d_{10}$	
13	0,04	1,15	0,07	2,31
18	0,03	0,83	0,05	1,67
25	0,02	0,60	0,04	1,20
35	0,01	0,43	0,03	0,86
49	0,01	0,31	0,02	0,61

Abbildung 5.10: Eindringtiefen von Bentonisuspensionen [Ibeco 1998]

### 5.2.3 Stützdruckübertragung bei unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung

Dieser Mechanismus der Stützdruckübertragung ist eine Kombination aus den beiden vorangegangenen. In der Praxis ist der Porenraum des anstehenden Bodens in vielen Fällen so beschaffen, dass zwar die Bentonitsuspension eindringen kann, nicht aber die größeren Bodenpartikel, die sich während des Rohrvortriebes gelöst haben und in der Suspension in Schwebe gehalten werden. Diese Bodenpartikel werden beim Eindringen der Suspension an der Erdwandung abgefiltert und bilden dort zusammen mit angelagerten Bentonitpartikeln eine mehr oder weniger durchlässige und daher unvollkommene Filterkuchenschicht. Die von groben Feststoffteilchen befreite Suspension kann in begrenztem Maße weiter in den Boden eindringen.

Die Flüssigkeitsdruckdifferenz  $\Delta p$  wird hier anteilig auf zwei Arten auf das Korngerüst des Bodens übertragen. Dies geschieht zu einem Teil membranartig nach Kapitel 5.2.1 über die Filterkuchenschicht, zum anderen Teil nach Kapitel 5.2.2 über die Schubspannungen die sich aufgrund der Fließgrenze  $t_F$  der Bentonitsuspension entlang des Porenkanals ergeben.

Bei unvollkommener Filterkuchenbildung lässt sich die Eindringtiefe  $s$  nicht zufriedenstellend genau berechnen, da die Filterkuchendicke und das Druckgefälle im Filterkuchen nicht zutreffend vorausgesagt werden können. Die Eindringtiefe kann nur durch experimentelle Ermittlungen genau bestimmt werden [Kilchert u. Karstedt 1984].

## 5.3 Fließvorgänge im nichtbindigen Lockergestein

Die Poren des Lockergesteins sind die Fließwege des Injektionsgutes im Baugrund. Das Fließverhalten während eines Injektionsvorganges kann theoretisch relativ einfach beschrieben werden, wenn die Böden oder die einzelnen Bodenschichten aus weitgehend einheitlichen Korngemischen zusammengesetzt sind. Die für den Fließvorgang wichtigen Parameter können durch bodenmechanische Untersuchungen festgestellt werden.

Bei der Injektion einer Newtonschen Flüssigkeit in nichtbindige Lockergesteine breitet sich diese unter Verwendung eines punktförmigen Einpresselementes radial in alle Richtungen gleichmäßig aus. Der Injektionskörper bildet dabei eine Kugel mit dem Radius  $r_e$ . Wächst der Durchmesser der Kugel so weit an, dass das Injektionsgut eine undurchlässige oder wesentlich weniger durchlässige Schicht erreicht, erfolgt die weitere Ausbreitung von da an zylindrisch (Abbildung 5.11).

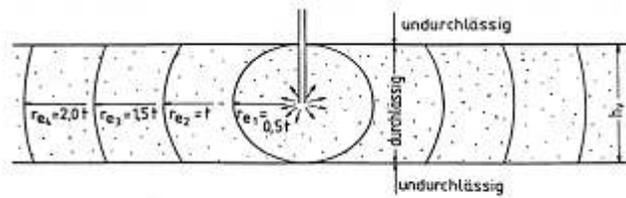


Abbildung 5.11: Wechsel des Fließens von Kugel- zu Zylinderform [Donel 1990]

In Wechsellagerung von Schichten verschiedener Mächtigkeit und Durchlässigkeit entstehen daher Injektionskörper unterschiedlicher Form. Diese Form ist abhängig vom Porenanteil und der Einpressmenge. Der Zusammenhang zwischen Injektionskörper und Porengröße ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

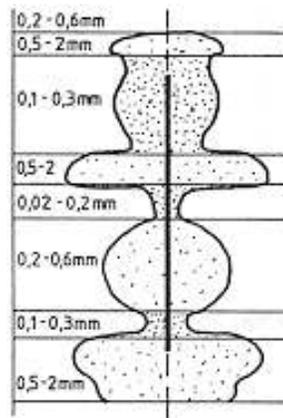


Abbildung 5.12: Einfluss der Porengröße auf den Injektionskörper [Donel 1990]

Für den Injektionsvorgang ist daher festzustellen, ob die vorgesehene Endreichweite der Injektion größer oder kleiner ist als die Dicke der injizierten Schicht. Auf die Reichweite einer Injektion wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Angaben und Formeln zur Berechnung können der Fachliteratur über Injektionstheorien entnommen werden. Injiziert man eine Flüssigkeit mit konstanter Menge je Zeiteinheit stellt sich für eine kugelförmige Ausbreitung ( $r_e < e$ ) folgender Einpressdruck ein [Donel 1990]:

$$p_i - p_0 = \frac{Q \cdot \gamma \cdot \eta_i}{4\pi \cdot r_0 \cdot k_0 \cdot \eta_0} [MN/m^2] \quad (5.6)$$

mit:

$p_i$  = Injektionsdruck

$p_0$  = hydrostatischer Gegendruck

$Q$  = Einpressmenge je Zeiteinheit

$\gamma$  = Wichte der Einpressflüssigkeit

$\eta_i : \eta_0$  = Viskositätsverhältnis der Injektionsflüssigkeit zu der des Wassers

$r_0$  = Radius des Injektionselementes

$k_0$  = k-Wert für Wasser

Analog ergibt sich der entsprechende Einpressdruck bei zylindrischer Ausbreitung ( $r_e > e$ ) zu [Donel 1990]:

$$p_i - p_0 = \frac{Q \cdot \gamma \cdot \eta_i}{2\pi \cdot k_0 \cdot \eta_0 \cdot e} \cdot \ln \frac{R}{r_0} [MN/m^2] \quad (5.7)$$

mit:

$e$  = Dicke der Schicht

$R$  = Endradius des injizierten Zylinders (Reichweite)

Entstehen während der Injektion zu hohe Einpressdrücke, können diese zu Hebungen im Boden oder unter Überwindung des Erddruckes sogar zu Aufsprengungen an Schichtgrenzen führen. Dies erfolgt überwiegend in sandigen und sandig-schluffigen Böden. Auf diese Weise wird ein gleichmäßiges Verteilen des Injektionsmittels in den Porenräumen verhindert.

Zu hohe Einpressdrücke können vermieden werden, wenn die Einpressmenge je Zeiteinheit so klein gehalten wird, dass laminares Fließen in den Poren stattfindet. Die in der Praxis angewandten Einpressmengen liegen, je nach Durchlässigkeit des Bodens zwischen 4 und 12 l/min [Donel 1990].

Mit zunehmender Einpressmenge je Zeiteinheit steigt auch der Einpressdruck. In Abbildung 5.13 ist dieser Zusammenhang in einer so genannten Druck-Mengen-Grafik in Abhängigkeit der Durchlässigkeit des Bodens dargestellt. Diese Grafik ist exemplarisch für vorgegebene Verhältnisse und muss für unterschiedliche Durchmesser und Längen der Rohrleitungen sowie eine andere Viskosität des Injektionsmittels neu aufgestellt werden. Praktische Erfahrungen haben ergeben, dass es ratsam ist einen Grenzwert von nicht zu überschreiten.

Handelt es sich bei dem Injektionsmittel nicht um eine Newtonsche Flüssigkeit, ist eine eventuell vorhandene Veränderung der Eigenschaften in Abhängigkeit der Zeit zu beachten. Nimmt die Viskosität mit zunehmender Zeit zu, wird auch der Einpressdruck ansteigen. Daher sind die Gelzeiten und die zu injizierenden Mengen aufeinander abzustimmen [Donel 1990].

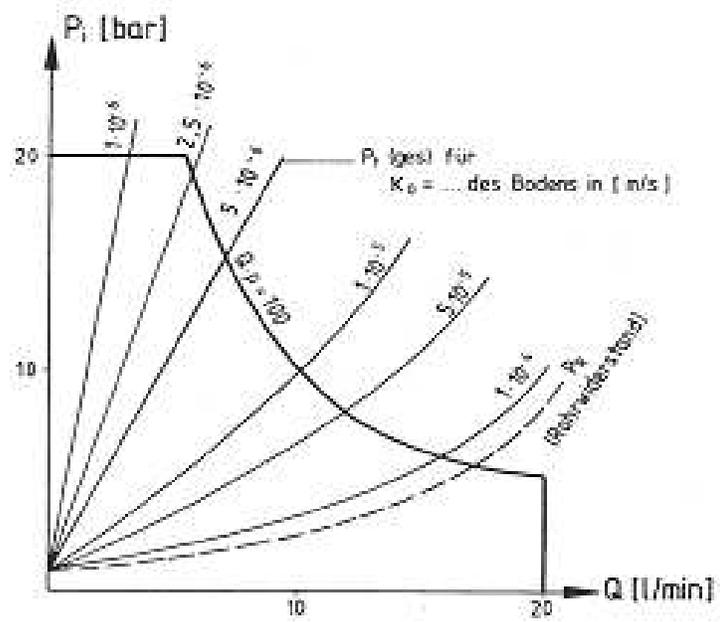


Abbildung 5.13: Druck-Mengen-Grafik für verschiedene  $k$ -Werte [Donel 1990]

# Kapitel 6

## Kleinformatische Injektionsversuche zur Ermittlung der Einsatzbereiche und -grenzen von Bentonitsuspensionen

Die im kleinformatischen Versuchsstand durchgeführten Injektionsversuche dienten zur experimentellen Bestimmung der jeweiligen Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen der in Kapitel 4 vorgestellten Bentonitsuspensionen. Hierzu wurden die Bentonitsuspensionen in definierte Böden, d.h. nichtbindige Lockergesteine, injiziert (Abbildung 6.1).



**Abbildung 6.1:** Kleinformatischer Injektionsstand

Um die in Kapitel 5.1 vorgestellte Beurteilung der Injizierbarkeit von nichtbindigem Lockergestein in Abhängigkeit von der Kornverteilung (Sieblinie), Durchlässigkeit und Porengeometrie vornehmen zu können, wurden die jeweiligen Bodenparameter bestimmt.

Für die Injektionsversuche wurden sechs Böden bestehend aus nichtbindigem Lockergestein ausgewählt, die nachfolgend vorgestellt werden (Kapitel 6.1).

Jeder dieser Böden kann als Einkornboden bezeichnet werden, der im Wesentlichen aus einer Korngröße besteht. Für die Injektionsversuche wurden Einkornböden gewählt, weil

- die Böden und somit die Injektionsversuche leicht reproduzierbar sind und
- der Einkornboden im Vergleich zu einem gut gestuften Boden den größtmöglichen Porenraum aufweist.

Insbesondere der letzte Punkt erlaubt eine theoretische Einordnung der Ergebnisse der Injektionsversuche auf der *sicheren Seite* liegend, da die relevanten Versuchsparameter **Eindringtiefe** und **Injektionsdruck** in einem zum verwendeten Einkornboden vergleichbaren gut gestuften Boden geringer sein werden.

Die ausführliche Ergebnisdarstellung aller Injektionsversuche ist im Anhang D zu finden, die Ergebnismatrix aller Injektionsversuche zeigt Anhang E.

## 6.1 Eigenschaften der Versuchsböden

Vor Verwendung der sechs nichtbindigen Versuchsböden wurden die einzelnen Bodenparameter am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum bestimmt. Zu den durchgeführten Laborversuchen gehörten:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung nach [DIN 18123 1996]
- Bestimmung der Dichte bei lockerer und dichter Lagerung gemäß [DIN 18126 1996]
- Bestimmung der Durchlässigkeit nach [DIN 18130 1989]

Die Versuchsböden werden nachfolgend als Sand A bis Sand E sowie Sand 0 benannt, wobei der Sand 0 in soweit eine Ausnahme bildet, dass dieser Boden nicht aus einer einzelnen Kornfraktion besteht (Korngrößen im Bereich von 0,2 mm bis 1 mm). Eine Übersicht über die untersuchten Böden ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

### 6.1.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

In Abbildung 6.3 sind die einzelnen Körnungslinien der untersuchten Böden Sand 0 sowie Sand A bis Sand E nach [DIN 18123 1996] dargestellt.

Die dazugehörigen Siebrückstände aus den Sieblinienbestimmungen sind in den Abbildungen 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 und 6.9 aufgeführt.

Korngrößenbereich	Benennung
0,2 - 1,0 mm	Sand 0
1,0 - 2,0 mm	Sand A
2,0 - 4,0 mm	Sand B
4,0 - 8,0 mm	Sand C
8,0 - 16,0 mm	Sand D
16,0 - 25,0 mm	Sand E

Abbildung 6.2: Übersicht der untersuchten Böden

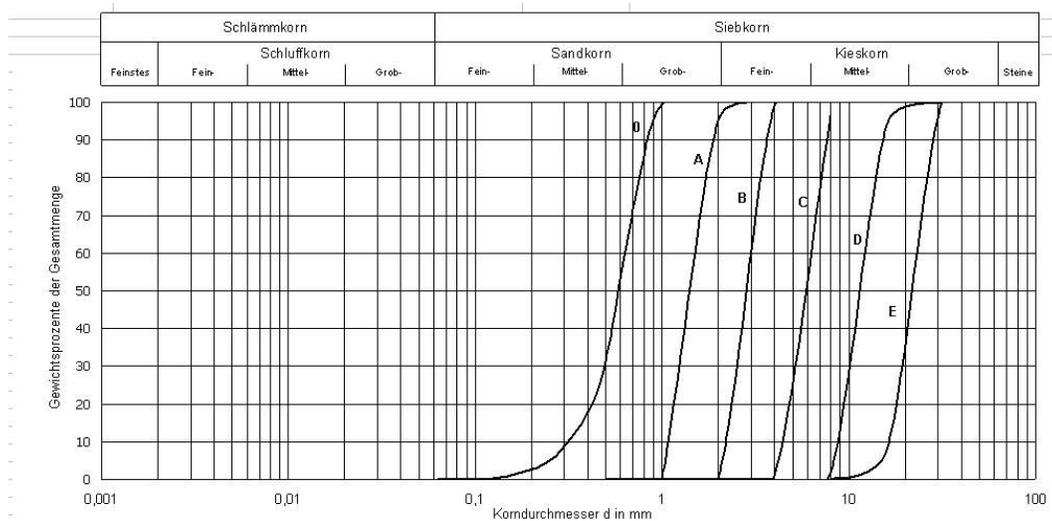


Abbildung 6.3: Körnungslinie Sand 0, Sand A - Sand E

Korngröße mm	Siebrückstände		Siebdurchgang
	delta md g	delta md /md %	%
8	0,00	0,00	100,00
4	0,00	0,00	100,00
2	0,00	0,00	100,00
1	3,58	0,57	99,43
0,71	162,12	25,80	73,63
0,5	267,35	42,54	31,09
0,4	83,09	13,22	17,87
0,25	81,62	12,99	4,88
0,125	29,28	4,66	0,22
0,063	1,37	0,22	0,00
Schale	0,00	0,00	0,00
Summe	628,41	100,00	
Siebverlust	0,75		
Siebverlust [%]	0,12		

Abbildung 6.4: Sieblinienbestimmung Sand 0

**6.1.1.1 Sand 0: 0,2 - 1 mm**

Aus den Werten für  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  ergeben sich für die Ungleichförmigkeitszahl U und die Krümmungszahl C:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,70 < 6$$

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = 1,08$$

Bei Sand 0 handelt es sich demnach gemäß [DIN 4022 1987] um einen Mittel- und Grobsand, schwach feinsandig (mS+gS, fs'). Nach [DIN 18196 1988] wird dieser als enggestufter Sand (SE) klassifiziert.

**6.1.1.2 Sand A: 1 - 2 mm**

Korngröße mm	Siebrückstände		Siebdurchgang
	delta md	delta md /md	
	g	%	%
8	0,00	0,00	100,00
4	0,00	0,00	100,00
2	50,20	5,10	94,90
1	930,20	94,59	0,31
0,71	3,00	0,31	0,00
0,5	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00
0,125	0,00	0,00	0,00
0,063	0,00	0,00	0,00
Schale	0,00	0,00	0,00
Summe	983,40	100,00	
Siebverlust	0,10		
Siebverlust [%]	0,01		

**Abbildung 6.5:** Sieblinienbestimmung Sand A

Aus den Werten für  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  ergeben sich für die Ungleichförmigkeitszahl U und die Krümmungszahl C:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,44 < 6$$

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = 0,90$$

Bei Sand A handelt es sich demnach gemäß [DIN 4022 1987] um Grobsand (gS). Nach [DIN 18196 1988] wird dieser als enggestufter Sand (SE) klassifiziert.

Korngröße mm	Siebrückstände		Siebdurchgang
	delta md g	delta md /md %	%
8	0,00	0,00	100,00
4	10,90	1,09	98,91
2	982,40	98,61	0,29
1	2,70	0,27	0,02
0,71	0,20	0,02	0,00
0,5	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00
0,125	0,00	0,00	0,00
0,063	0,00	0,00	0,00
Schale	0,00	0,00	0,00
Summe	996,20	100,00	
Siebverlust	0,10		
Siebverlust [%]	0,01		

Abbildung 6.6: Sieblinienbestimmung Sand B

### 6.1.1.3 Sand B: 2 - 4 mm

Aus den Werten für  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  ergeben sich für die Ungleichförmigkeitszahl U und die Krümmungszahl C:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,42 < 6$$

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = 0,77$$

Bei Sand B handelt es sich demnach gemäß [DIN 4022 1987] um Feinkies (fG). Nach [DIN 18196 1988] wird dieser als enggestuften Kies (GE) klassifiziert.

### 6.1.1.4 Sand C: 4 - 8 mm

Aus den Werten für  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  ergeben sich für die Ungleichförmigkeitszahl U und die Krümmungszahl C:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,44 < 6$$

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = 0,99$$

Bei Sand C handelt es sich demnach gemäß [DIN 4022 1987] um Feinkies, schwach mittelkiesig (fG, mg'). Nach [DIN 18196 1988] wird dieser als enggestufter Kies (GE) klassifiziert.

Korngröße mm	Siebrückstände		Siebdurchgang
	delta md	delta md /md	
	g	%	%
16	0,00	0,00	100,00
8	35,00	3,62	96,38
4	923,50	95,60	0,78
2	6,90	0,71	0,06
1	0,60	0,06	0,00
0,71	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00
0,125	0,00	0,00	0,00
Schale	0,00	0,00	0,00
Summe	966,00	100,00	
Siebverlust	0,40		
Siebverlust [%]	0,04		

Abbildung 6.7: Sieblinienbestimmung Sand C

#### 6.1.1.5 Sand D: 8 - 16 mm

Korngröße mm	Siebrückstände		Siebdurchgang
	delta md	delta md /md	
	g	%	%
31,5	0,00	0,00	100,00
16	75,60	6,20	93,80
8	1124,90	92,25	1,55
4	17,90	1,47	0,08
2	0,70	0,06	0,02
1	0,30	0,02	0,00
0,71	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00
Schale	0,00	0,00	0,00
Summe	1219,40	100,00	
Siebverlust	3,20		
Siebverlust [%]	0,26		

Abbildung 6.8: Sieblinienbestimmung Sand D

Aus den Werten für  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  ergeben sich für die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  und die Krümmungszahl  $C$ :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,46 < 6$$

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = 0,85$$

Bei Sand D handelt es sich demnach gemäß [DIN 4022 1987] um Mittelkies (mG). Nach [DIN 18196 1988] wird dieser als enggestufter Kies (GE) klassifiziert.

6.1.1.6 Sand E: 16 - 25 mm

Korngröße mm	Siebrückstände		Siebdurchgang
	delta md g	delta md /md %	%
63	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
16	3691,10	92,34	7,66
8	305,60	7,64	0,02
4	0,10	0,00	0,02
2	0,50	0,01	0,01
1	0,20	0,01	0,00
0,71	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00
Schale	0,00	0,00	0,00
Summe	3997,50	100,00	
Siebverlust	2,50		
Siebverlust [%]	0,06		

Abbildung 6.9: Sieblinienbestimmung Sand E

Aus den Werten für  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  ergeben sich für die Ungleichförmigkeitszahl U und die Krümmungszahl C:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,44 < 6$$

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = 0,92$$

Bei Sand E handelt es sich demnach gemäß [DIN 4022 1987] um Mittelkies (mG). Nach [DIN 18196 1988] wird dieser als enggestufter Kies (GE) klassifiziert.

6.1.2 Bestimmung der Dichte bei lockerer und dichter Lagerung

Abbildung 6.10 zeigt eine graphische Übersicht der Ergebnisse aus den Versuchen nach [DIN 18123 1996] für die untersuchten Böden Sand 0 sowie Sand A bis Sand E jeweils bei lockerster und dichtester Lagerung.

6.1.2.1 Sand 0: 0,2 - 1 mm

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $min\rho_d$  zu 1,412 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $min\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil max n berechnen: 1,412

$$maxn = 1 - \frac{min\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,412}{2,65} = 0,467$$

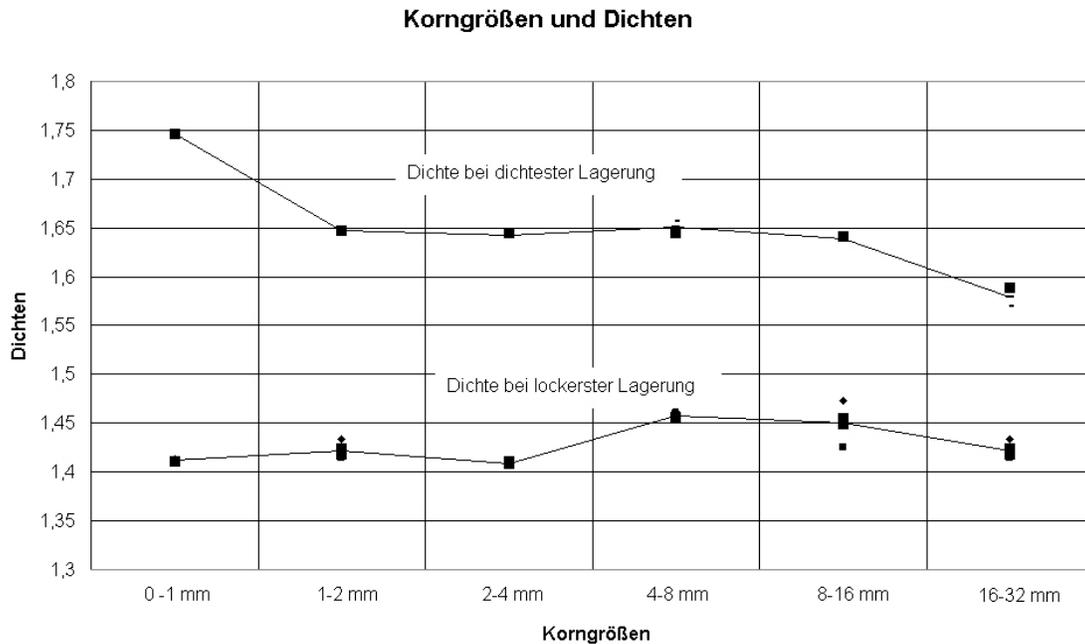


Abbildung 6.10: Übersicht Lagerungsdichte Sand 0, A, B, C, D und E

		1	2	3	4	5
Trockenmasse + Tara	[g]	1572,20	1571,50	1571,80	1571,50	1571,60
Tara	[g]	946,40	946,40	946,40	946,40	946,40
Trockenmasse	[g]	625,80	625,10	625,40	625,10	625,20
Volumen des Behälters	[cm³]	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00
<b>ρd min</b>	<b>[g/cm³]</b>	<b>1,413</b>	<b>1,411</b>	<b>1,412</b>	<b>1,411</b>	<b>1,411</b>

Abbildung 6.11: Lockerste Lagerung Sand 0

		1	2	3	4	5
Trockenmasse	[g]	625,32				
Volumen der Probe	[cm³]	358,21				
Feuchtmasse + Tara	[g]	3659,20				
Tara	[g]	2899,60				
Feuchtmasse	[g]	759,60				
ρ	[g/cm³]	2,12				
<b>ρd max</b>	<b>[g/cm³]</b>	<b>1,746</b>				

Abbildung 6.12: Dichteste Lagerung Sand 0

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $max\rho_d$  zu 1,746 g/cm³. Aus  $max\rho_d$  berechnet sich der Wert für den Porenanteil min n zu:

$$minn = 1 - \frac{max\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,746}{2,65} = 0,341$$

### 6.1.2.2 Sand A: 1 - 2 mm

		1	2	3	4	5
Trockenmasse + Tara	[g]	14928,00	14886,00	14901,00	14894,00	14909,00
Tara	[g]	11762,00	11762,00	11762,00	11762,00	11762,00
Trockenmasse	[g]	3166,00	3124,00	3139,00	3132,00	3147,00
Volumen des Behälters	[cm <sup>3</sup> ]	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93
<b>ρd min</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,433</b>	<b>1,414</b>	<b>1,421</b>	<b>1,418</b>	<b>1,425</b>

Abbildung 6.13: Lockerste Lagerung Sand A

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $min\rho_d$  zu 1,422 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $min\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $max n$  berechnen:

$$maxn = 1 - \frac{min\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,422}{2,65} = 0,463$$

		1	2	3	4	5
Trockenmasse	[g]	623,08	623,08			
Volumen der Probe	[cm <sup>3</sup> ]	378,27	378,14			
Feuchtmasse + Tara	[g]					
Tara	[g]					
Feuchtmasse	[g]	0,00	0,00			
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,00	0,00			
<b>ρd max</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,647</b>	<b>1,648</b>			

Abbildung 6.14: Dichteste Lagerung Sand A

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $max\rho_d$  zu 1,647 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $max\rho_d$  berechnet sich der Wert für den Porenanteil  $min n$  zu:

$$minn = 1 - \frac{max\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,647}{2,65} = 0,378$$

### 6.1.2.3 Sand B: 2 - 4 mm

		1	2	3	4	5
Trockenmasse + Tara	[g]	11549,00	11550,00	11550,00	11552,00	11550,00
Tara	[g]	10222,00	10222,00	10222,00	10222,00	10222,00
Trockenmasse	[g]	1327,00	1328,00	1328,00	1330,00	1328,00
Volumen des Behälters	[cm <sup>3</sup> ]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48
<b>ρd min</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,408</b>	<b>1,409</b>	<b>1,409</b>	<b>1,411</b>	<b>1,409</b>

Abbildung 6.15: Lockerste Lagerung Sand B

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $min\rho_d$  zu 1,409 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $min\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $max n$  berechnen:

$$\max n = 1 - \frac{\min \rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,409}{2,65} = 0,468$$

		1	2	3	4	5
Trockenmasse	[g]	4468,00	4416,00			
Volumen der Probe	[cm <sup>3</sup> ]	2717,20	2691,22			
Feuchtmasse + Tara	[g]	-	-			
Tara	[g]					
Feuchtmasse	[g]	-	-			
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-			
<b>pd max</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,644</b>	<b>1,641</b>			

Abbildung 6.16: Dichteste Lagerung Sand B

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $\max \rho_d$  zu 1,643 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $\max \rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $\min n$  berechnen:

$$\min n = 1 - \frac{\max \rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,643}{2,65} = 0,380$$

#### 6.1.2.4 Sand C: 4 - 8 mm

		1	2	3	4	5
Trockenmasse + Tara	[g]	14983,00	14978,00	15001,00	14976,00	14979,00
Tara	[g]	11762,00	11762,00	11762,00	11762,00	11762,00
Trockenmasse	[g]	3221,00	3216,00	3239,00	3214,00	3217,00
Volumen des Behälters	[cm <sup>3</sup> ]	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93
<b>pd min</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,458</b>	<b>1,456</b>	<b>1,466</b>	<b>1,455</b>	<b>1,456</b>

Abbildung 6.17: Lockerste Lagerung Sand C

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $\min \rho_d$  zu 1,458 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $\min \rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $\max n$  berechnen:

$$\max n = 1 - \frac{\min \rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,458}{2,65} = 0,450$$

		1	2	3	4	5
Trockenmasse	[g]	4312,00	4130,00	4424,00		
Volumen der Probe	[cm <sup>3</sup> ]	2701,61	2511,11	2670,79		
Feuchtmasse + Tara	[g]	-	-	-		
Tara	[g]					
Feuchtmasse	[g]	-	-	-		
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-		
<b>pd max</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,596</b>	<b>1,645</b>	<b>1,656</b>		

Abbildung 6.18: Dichteste Lagerung Sand C

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $max\rho_d$  zu 1,651 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $max\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $min n$  berechnen:

$$minn = 1 - \frac{max\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,651}{2,65} = 0,377$$

**6.1.2.5 Sand D: 8 - 16 mm**

		1	2	3	4	5
Trockenmasse + Tara	[g]	15015,00	14911,00	14960,00	14977,00	14963,00
Tara	[g]	11762,00	11762,00	11762,00	11762,00	11762,00
Trockenmasse	[g]	3253,00	3149,00	3198,00	3215,00	3201,00
Volumen des Behälters	[cm <sup>3</sup> ]	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93
<b>pd min</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,473</b>	<b>1,426</b>	<b>1,448</b>	<b>1,455</b>	<b>1,449</b>

Abbildung 6.19: Lockerste Lagerung Sand D

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $min\rho_d$  zu 1,450 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $min\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $max n$  berechnen:

$$maxn = 1 - \frac{min\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,450}{2,65} = 0,453$$

		1	2	3	4	5
Trockenmasse	[g]	4100,00	3924,00			
Volumen der Probe	[cm <sup>3</sup> ]	2497,26	2396,82			
Feuchtmasse + Tara	[g]	-	-			
Tara	[g]					
Feuchtmasse	[g]	-	-			
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-			
<b>pd max</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,642</b>	<b>1,637</b>			

Abbildung 6.20: Dichteste Lagerung Sand D

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $max\rho_d$  zu 1,639 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $max\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $min n$  berechnen:

$$minn = 1 - \frac{max\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,639}{2,65} = 0,382$$

**6.1.2.6 Sand E: 16 - 25 mm**

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $min\rho_d$  zu 1,422 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $min\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $max n$  berechnen:

$$maxn = 1 - \frac{min\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,422}{2,65} = 0,463$$

		1	2	3	4	5
Trockenmasse + Tara	[g]	1572,20	1571,50	1571,80	1571,50	1571,60
Tara	[g]	946,40	946,40	946,40	946,40	946,40
Trockenmasse	[g]	625,80	625,10	625,40	625,10	625,20
Volumen des Behälters	[cm <sup>3</sup> ]	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00
<b>ρd min</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,413</b>	<b>1,411</b>	<b>1,412</b>	<b>1,411</b>	<b>1,411</b>

Abbildung 6.21: Lockerste Lagerung Sand 0

		1	2	3	4	5
Trockenmasse	[g]	4369,00	3566,00			
Volumen der Probe	[cm <sup>3</sup> ]	2750,10	2272,13			
Feuchtmasse + Tara	[g]	-	-			
Tara	[g]					
Feuchtmasse	[g]	-	-			
ρ	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-			
<b>ρd max</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,589</b>	<b>1,569</b>			

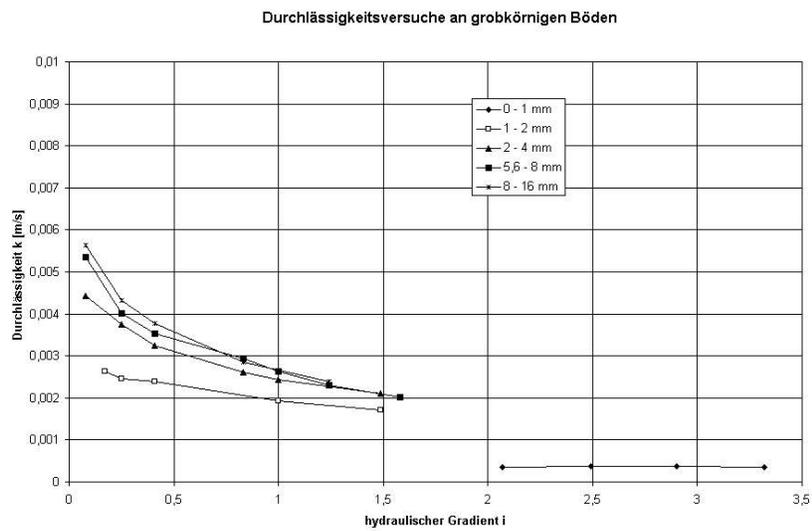
Abbildung 6.22: Dichteste Lagerung Sand E

Durch den Mittelwert der Messungen ergibt sich  $max\rho_d$  zu 1,579 g/cm<sup>3</sup>. Aus  $max\rho_d$  lässt sich der Wert für den Porenanteil  $min n$  berechnen:

$$min n = 1 - \frac{max\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,579}{2,65} = 0,404$$

### 6.1.2.7 Bestimmung der Durchlässigkeit

Gemäß Einteilung nach [DIN 18130 1998] sind die Böden Sand A bis Sand D stark durchlässig und der Sand 0 durchlässig. Für den Sand E konnte kein Durchlässigkeitsversuch durchgeführt werden (vgl. Abbildung 6.23)



Durchlässigkeitsbeiwert $k_0$ [m/s]	hydraulischer Gradient $i$												
	0,08	0,17	0,25	0,41	0,83	1	1,24	1,49	1,68	2,07	2,49	2,9	3,32
0 - 1 mm										3,47E-04	3,68E-04	3,81E-04	3,56E-04
1 - 2 mm		2,63E-03	2,47E-03	2,40E-03		1,93E-03		1,71E-03					
2 - 4 mm	4,42E-03		3,74E-03	3,24E-03	2,61E-03	2,43E-03		2,10E-03					
5,6 - 8 mm	5,36E-03		4,01E-03	3,52E-03	2,93E-03	2,63E-03	2,30E-03		2,01E-03				
8 - 16 mm	5,63E-03		4,32E-03	3,77E-03	2,86E-03		2,39E-03						

Abbildung 6.23: Auswertung K-Wert für Sand A bis Sand D

## 6.2 Aufbau und Durchführung der Injektionsversuche

Für die Ermittlung des Eindringverhaltens wurden die untersuchten Suspensionen mit einer konstanten Durchflussmenge in einen mit nichtbindigem Lockergestein befüllten Behälter injiziert. Dieser Behälter bestand aus einem Plexiglaszylinder, der sowohl oben als auch unten durch einen Stahlaufsatz eingefasst ist (Abbildung 6.24).

Die Kontaktstellen zwischen Plexiglas und Stahlaufsätzen wurden mit Gummiringen abgedichtet. Das ganze System wurde durch zwei Gewindestangen zusammengehalten. Die Zylinderhöhe betrug 50 cm und der Innendurchmesser 14 cm.



Abbildung 6.24: Plexiglaszylinder

Den oberen Abschluss des Behälters bildete ein Stahlring mit abnehmbarem Deckel. Dieser Deckel war mit einem exzentrisch angeordneten Bohrloch versehen (Abbildung 6.25). Die Öffnung hatte einen Durchmesser von einem Zoll. Durch die Injektion einer Suspension in den befüllten Zylinder wurde die Luft, die sich in den Poren des Bodens befand, verdrängt. Durch die Öffnung im Deckel konnte die verdrängte Luft aus dem Behälter entweichen. Die Versuche wurden somit ohne Einwirkung eines Luftdrucks durchgeführt.



Abbildung 6.25: Deckel Plexiglaszylinder

Den unteren Abschluss des Behälters bildete eine Stahlplatte. In dieser Platte befanden

sich zwei Bohrlöcher mit einem Durchmesser von jeweils einem Zoll. Das exzentrisch angeordnete Bohrloch war mit einem Blindstopfen verschlossen und für die durchgeführten Versuche ohne Bedeutung. Das zentrisch angeordnete Bohrloch diente als Injektionsöffnung. Diese Injektionsöffnung war mit einem 10 cm langen Metallrohr versehen, an dessen Ende eine GEKA-Kupplung angebracht wurde. Das passende Gegenstück zu dieser Kupplung befand sich am Ende des Schlauches, der die Pumpenanlage mit dem Probebehälter verband. Durch dieses System wurden Schlauch und Zylinder luft- und wasserdicht miteinander verbunden. Das Kupplungsstück am Schlauch hatte zudem ein verschließbares Ventil, mit dem der Zutritt der Suspension in den Zylinder jederzeit unterbunden werden konnte (Abbildung 6.26).



**Abbildung 6.26:** Anschluss Schlauch - Zylinder mit geöffnetem Ventil

Für die Durchführung der Injektionsversuche standen zwei verschiedene Injektionspumpen mit angeschlossener Messtechnik zur Verfügung, eine Schlauchpumpe sowie eine Plungerpumpe. Im Regelfall erfolgte die Injektion mit der Schlauchpumpe, nur bei besonders zähflüssigen Suspensionen wurde die Plungerpumpe verwendet, die einen größeren Ansaugschlauch besitzt und eine größere Ansaugenergie aufbringen kann.

Bei der Schlauchpumpe handelte es sich um die Industrieschlauchpumpe VF 15 der Firma Verderflex. Diese ist selbstsaugend und erreicht einen maximalen Betriebsdruck von 16 bar (Abbildung 6.27). Ein nachgeschalteter Pulsationsdämpfer dient der Dämpfung von Druckschwankungen, die bedingt durch die Charakteristik der Schlauchpumpe auftreten. Aus Sicherheitsgründen wurde hinter der Pumpe zudem ein Überströmventil angeschlossen. Dieses hat die Aufgabe den Druck im System unterhalb eines eingestellten Maximalwertes zu halten. In Abstimmung mit dem zulässigen aufnehmbaren Druck der Plexiglaszylinder wurde für die Versuche ein Maximalwert von 4 bar gewählt. Wurde dieser Wert während der Versuchsdurchführung überschritten, öffnete sich das Überstromventil und die Flüssigkeit bzw. der Druck wurde hierüber abgelassen.

Bei der Plungerpumpe handelte es sich um eine Doppel-Plungerpumpe DP 63 der Firma Obermann (Abbildung 6.28). Sie bewerkstelligt einen maximalen Betriebsdruck von 64 bar und hat eine maximale Förderleistung von 53 l/min. Optional konnte die Pumpe auf Umlauf gestellt werden, um die Suspension zwischen den Injektionsvorgängen in Bewegung zu halten.

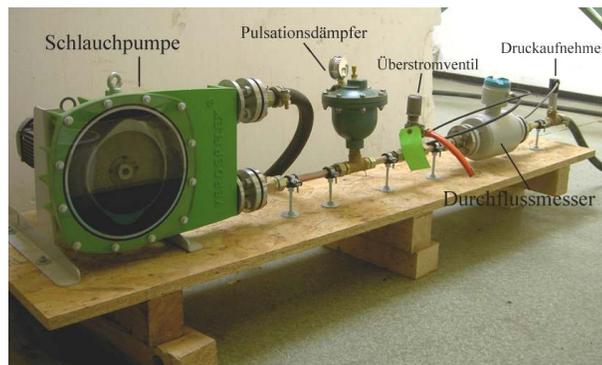


Abbildung 6.27: Schlauchpumpe



Abbildung 6.28: Doppel-Plungerpumpe

Zur Erfassung des Drucks, der sich während des Injektionsvorganges einstellt, wurde bei beiden Injektionspumpen der Druckaufnehmer Siemens Sitrans P verwendet. Dieses Gerät ist in der Lage die Relativdrücke von Gasen, Flüssigkeiten und Dämpfen zu messen.

An der Schlauchpumpe war zudem das magnetisch-induktive Durchflussmessgerät Siemens Sitrans FM 711/A angeschlossen, um das Injektionsvolumen der Suspensionen pro Zeiteinheit während der Versuche genau zu erfassen. An das Messgerät war ein Messumformer der Bauart Siemens Sitrans FM Intermag 2 angeschlossen, der die erfassten Messsignale aufnahm und verarbeitete. Die Durchflussmenge, die die Schlauchpumpe je Zeiteinheit transportieren sollte, wurde über die Frequenz geregelt mit der der Motor der Pumpe angetrieben wird. Die gewünschte Drehzahl ließ sich über den Frequenzumrichter L200 von Hitachi einstellen, der an einem transportablen Steuerpult an der Schlauchpumpe angeschlossen war.

Bei der Plungerpumpe wurde nur der Druck aufgezeichnet, der sich während der Versuche aufbaut, eine Durchflussmessung war an dieser Anlage nicht vorgesehen. Die gewünschte

Fördermenge wurde hier direkt an der Pumpe über ein Potentiometer eingestellt. Über Datenkabel wurden die aufgenommenen Informationen des Druckaufnehmers und bei der Schlauchpumpe auch die Daten des Frequenzumrichters und des Durchflussmessgerätes an einen angeschlossenen PC weitergeleitet und dort mittels des Softwareprogramms Labview in einem Takt von einer zehntel Sekunde aufgezeichnet.

Aufgrund der unterschiedlichen Fördercharakteristik der beiden Pumpen entstand bei der Aufzeichnung des Druckanstieges ein unterschiedlicher Kurvenverlauf, der aber in beiden Fällen das gleiche Ergebnis, also einen einheitlichen Wert für den erreichten Maximaldruck lieferte.

Bei der Schlauchpumpe wurde die Suspension durch einen U-förmig geführten Schlauch geleitet, der sich außen im Gehäuse der Pumpe abstützte und von innen durch Rollen oder Gleitschuhe abgeklemmt wurde, die an einem Rotor drehen. Bei Rotation bewegte sich die Abklemmstelle entlang des Schlauches und trieb damit die Suspension voran. Das Erzeugen des Ansaugunterdrucks erfolgte hier durch die Elastizität der Schlauchwandung. Bei den Injektionsversuchen entstand bei der Druckaufzeichnung ein stark schwankender Kurvenverlauf mit schnell aufeinander folgenden kurzen Pendelbewegungen, da der Druck immer wieder kurzzeitig abfiel sich sofort danach wieder gleichwertig aufbaute (Abbildung 6.29).

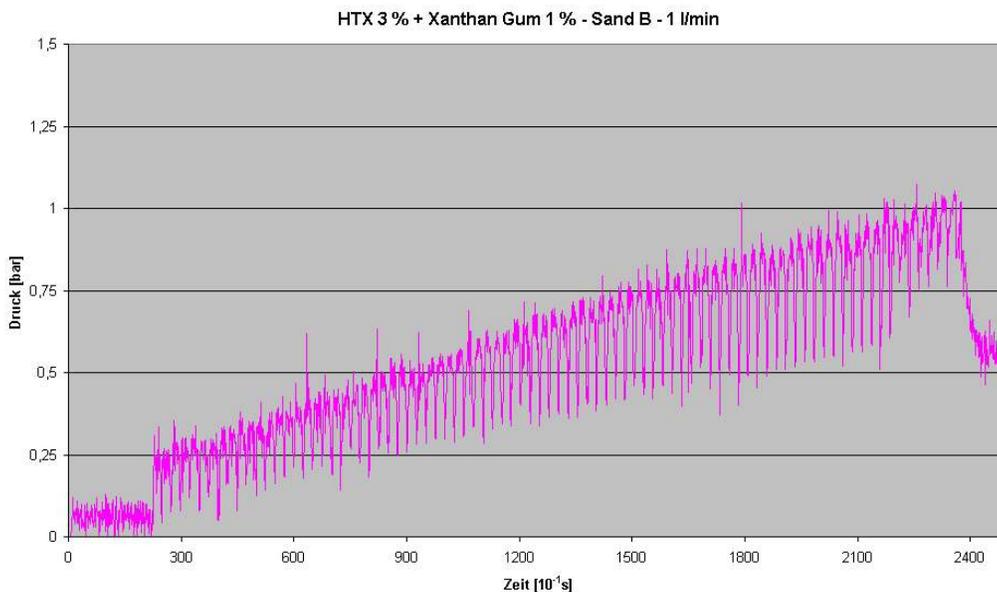
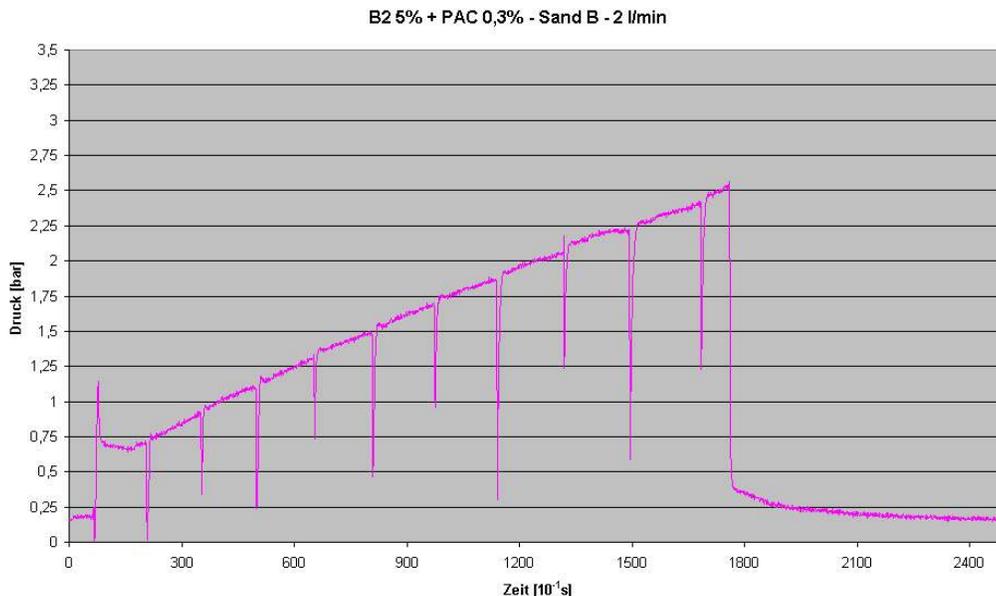


Abbildung 6.29: Beispiel Druckverlauf aus der Injektion mit der Schlauchpumpe

Bei der Plungerpumpe wurde die Suspension durch die Auf- und Abwärtsbewegung der langgestreckten Kolben, den sogenannten Plungern, gefördert. Durch die Aufwärtsbewegung des Plungers öffnete sich aufgrund der Saugwirkung das Saugventil und die Suspension gelangte in den Pumpenraum. Bei der Abwärtsbewegung schloss sich das Saugventil bedingt durch sein Eigengewicht und das Druckventil öffnet es sich, wobei die Suspension in den Zulaufschlauch gedrückt wurde. Bei den durchgeführten Injektionsversuchen brachte

die Plungerpumpe beim Anlaufen für wenige Sekunden zunächst einen hohen Startdruck auf, der bei weiterem Betrieb schnell wieder abfiel, worauf sich dann eine kontinuierliche, fast lineare Kurve einstellte, die nur durch den Wechsel der Plunger unterbrochen wurde. Bei jedem Plungerwechsel fiel der Druck kurzzeitig stark ab, baute sich aber direkt nach dem Wechsel wieder gleichwertig auf (Abbildung 6.30).



**Abbildung 6.30:** Beispiel Druckverlauf aus der Injektion mit der Plungerpumpe

Zu Beginn der einzelnen Versuche wurde der Zulaufschlauch der Injektionspumpe sorgfältig gereinigt und vollständig und luftblasenfrei mit der untersuchten Suspension befüllt. Der Schlauch wurde mit geöffnetem Ventil an der GEKA-Kupplung des Probebehälters angeschlossen und der Versuch gestartet. Die Aufzeichnung der Messdaten wurde gestartet und die verwendete Injektionspumpe mit der festgelegten Durchflussgeschwindigkeit in Betrieb gesetzt. Die Pumpe saugte die Suspension kontinuierlich über einen Ansaugschlauch an und förderte sie mit konstanter Durchflussmenge in den mit Boden befüllten Probezylinder. Hatte die Suspension den Zylinder vollständig durchströmt, trat diese aus der Austrittsöffnung im Deckel wieder heraus. In gleichen Moment wurde die Pumpe ausgeschaltet und das Ventil geschlossen. Die Aufzeichnung der Daten mittels PC wurde einige Zeit weiterlaufen gelassen. Nach Versuchende wurden die Probekörper vorsichtig auseinandergelassen und visuell auf eine mögliche Filterkuchenbildung an den Eintrittsöffnungen der Bodenporen untersucht. Wurden während des Versuchs zu hohe Drücke erreicht, wurde der Injektionsvorgang aus Sicherheitsgründen vorzeitig abgebrochen, auch wenn die Suspension den Probekörper noch nicht vollständig durchströmt hatte. In diesem Fall wurde die Eindringtiefe in den Boden gemessen, die die Suspension bis zu diesem Zeitpunkt zurückgelegt hatte. Alle Versuche wurden anhand von Fotos dokumentiert. Nach Beendigung des Versuchs wurden die Probekörper vorsichtig auseinandergelassen und visuell auf Filterkuchenbildung untersucht.

Vor dem Einbau der Bodenprobe wurde zunächst ein perforierter Abstandhalter in den

Boden des Zylinders eingelegt (Abbildung 6.31). Dieser Abstandhalter besteht aus einer, mit extrudierten Noppen versehenen Kunststoffbahn, die in der Baupraxis als Inliner bei der Sanierung von Kanälen eingesetzt wird.



**Abbildung 6.31:** CAD - Darstellung Abstandhalter

Für den Zweck dieser Versuche wurde der Kunststoff in den Maßen des Zylinders zugeschnitten und in regelmäßigen Abständen perforiert. Der Einbau dieses Abstandhalters erfüllte zwei Funktionen. Zum einen wurde verhindert, dass der eingebrachte Boden durch die Injektionsöffnung wieder aus dem Zylinder herausfällt, zum anderen wurde hierdurch der Ringspalt beim Rohrvortrieb simuliert.

Für die Versuche standen Abstandhalter mit einem Lochdurchmesser von 2 mm sowie von 4 mm zur Verfügung. Die verwendete Lochweite hing von der Körngröße des untersuchten Bodens ab. Sie wurde so gewählt, dass sie dem Größtkorndurchmesser des eingebrachten Bodens entsprach. Die Löcher im Abstandhalter waren stets größer als die Porendurchmesser des Bodens. Die Ergebnisse aus den Ermittlungen des Eindringverhaltens wurden hierdurch nicht beeinflusst.

Der Boden wurde in der dichtesten Lagerung eingebaut. Das Befüllen erfolgte in mehreren Lagen mit einer Schichtdicke von jeweils 10 cm. Nach jedem Einbringen wurde der Boden mit einem Proctorhammer verdichtet. Die Bodenmenge wurde durch Wägung bestimmt. Das Füllgewicht wurde zuvor, in Abhängigkeit der verwendeten Körnungsgruppe, so festgelegt, dass der Boden nach ordnungsgemäßem Einbringen bündig mit der Unterkante des Zylinderdeckels abschließt. Der fertige Probezylinder wurde in der Halterung mit Hilfe einer Gewindestange arretiert (Abbildung 6.32). Durch festes Anziehen des Gewindes mit einem Drehschlüssel wurde der Zylinderdeckel auf die Bodenkörner aufgepresst und widerstand so dem einwirkendem Druck aus dem Injektionsvorgang.

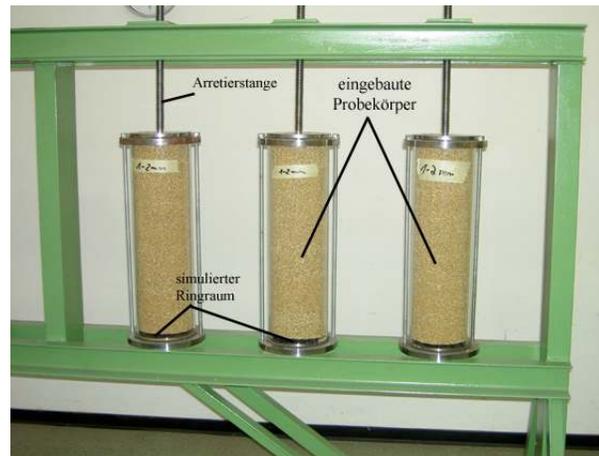


Abbildung 6.32: Befüllte und in den Versuchsstand eingebaute Plexiplaszylinder

### 6.3 Versuchsprogramm der kleinformatischen Injektionsversuche

Im Rahmen der Injektionsversuche wurden sowohl die reinen als auch die chemisch modifizierte Bentonitsuspensionen in die verschiedenen nichtbindigen Lockergesteine Sand 0, A, B, C, D, und E in unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten von 1, 2 und 4 l/min injiziert.

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm vermitteln die Abbildungen 6.33 und 6.34.

Vor Versuchsdurchführung mussten die Bewertungskriterien für den *Injektionserfolg* und *Injektionsmisserfolg* festgelegt werden, um die Einsatzbereich und Einsatzgrenzen der injizierten Suspensionen aufzuzeigen. Im Kapitel 5.2 wurde die drei möglichen Mechanismen der Stützdruckübertragung von Bentonitsuspensionen im nichtbindigen Lockergestein erläutert:

- 1 Stützdruckübertragung bei vollständiger Filterkuchenbildung
- 2 Stützdruckübertragung bei reiner Eindringung
- 3 Stützdruckübertragung bei unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung

Der erste Mechanismus der vollständigen Filterkuchenbildung hätte bei den vorliegenden Randbedingungen ausschließlich im Sand 0 erreicht werden können. In allen anderen Fällen waren die Porengrößen im dichtgelagerten Sande A, B, C, D und E größer als die in der Suspension verteilten Bentonitpartikel. Allerdings konnte bei den Injektionsversuchen im Sand 0 kein definierter äußerer Filterkuchen nachgewiesen werden. Die aufgetretenen Mechanismen der Stützdruckübertragung bei den Injektionsversuchen beschränkten sich somit auf die Fälle 2 und 3.

Im Fall 2 der Stützdruckübertragung bei reiner Eindringung trat bei der Versuchsdurchführung ein linearer Anstieg des Injektionsdrucks auf, der über den Wert hinausgeht, der erforderlich ist, um die hydrostatische Druckhöhe von theoretisch 0,05 bar (50 cm Injektionsweg im Plexiglaszylinder) zu überwinden. Der Anstieg des Injektionsdrucks ist hierbei ausschließlich auf die Übertragung von Schubspannungen von der Bentonitsuspension auf die Oberfläche der Bodenkörner zurückzuführen und verläuft mit größer werdender Oberfläche bei steigender Eindringtiefe linear. Dementsprechend wurde der *Injektionserfolg* bei dieser Form der Stützdruckübertragung wie folgt definiert:

- Es bildet sich kein äußerer und kein innerer Filterkuchen im durchstömten Lockergestein aus.
- Der Anstieg des Injektionsdrucks verläuft linear und liegt deutlich über dem zur Überwindung der statischen Druckhöhe erforderlichen Wert.

Im Fall 3 der Stützdruckübertragung bei unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung trat bei der Versuchsdurchführung zunächst ebenfalls ein linearer Anstieg des Injektionsdruckes auf. Darauffolgend stieg der Druck exponentiell stark an, bis der Versuch letztlich bei ca.  $\pm 3,5$  bar aus Sicherheitsgründen abgebrochen werden musste. Der in Abhängigkeit der injizierten Bentonitsuspension und des Lockergesteins u.U. sehr schnelle Druckanstieg auf einer geringen Eindringtiefe lässt sich durch die sukzessive Verstopfung der Porenräume durch die in der Suspension enthaltenen Bentonitpartikel in Kombination der Schubspannungsübertragung an den Oberflächen der Bodenkörner zurückführen. Der *Injektionserfolg* bei dieser Form der Stützdruckübertragung wurde demnach wie folgt definiert:

- Es bildet sich kein äußerer Filterkuchen im durchstömten Lockergestein aus.
- Der Anstieg des Injektionsdrucks verläuft exponentiell und die Injektions muss vor Erreichen der maximalen Eindringtiefe von 50 cm abgebrochen werden.

Entsprechend dieser Festlegungen konnten die Einsatzbereiche der injizierten Bentonitsuspensionen in Abhängigkeit des nichtbindigen Lockergesteins festgelegt werden. Hinsichtlich der Bewertung wurden nochmals Abstufungen in Abhängigkeit vom Verlauf des Druckanstiegs vorgenommen. Ein *Injektionsmisserfolg* war demnach ein Versuch, bei dem im vollständig durchströmten Plexiglaszylinder nur der Injektionsdruck erreicht wurde, der zur Überwindung der hydrostatischen Druckhöhe von ca. 50 cm erforderlich war.

Versuchsprogramm - Injektionsversuche				
	Produkt:	Kombination + Konzentration	untersuchter Boden	Durchflussgeschwindigkeit
	Ca	Ca (14 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		Ca (16 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	Na	Na (12 %)	Sand B	1 l/min; 4 l/min
	Wyoming Bentonit	Wyoming Bentonit (8 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		Wyoming Bentonit (10 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		Wyoming Bentonit (12 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
		Wyoming Bentonit (14 %)	Sand B; Sand C; Sand D	1 l/min
<b>Baroid</b>				
	Tunnel Gel Plus	Tunnel Gel Plus (2,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		Tunnel Gel Plus (3 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		Tunnel Gel Plus (4 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	No Sag	TG Plus (2,5 %) + No Sag (0,08 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		TG Plus (2,5 %) + No Sag (0,16 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
	Quik Trol	TG Plus (2,5 %) + Quik Trol (0,12 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	Diamond-Seal	TG Plus (3 %) + Diamond-Seal (1,2 %)	Sand C; Sand D; Sand E	1 l/min
		TG Plus (3 %) + Diamond-Seal (2,4 %)	Sand C; Sand D; Sand E	1 l/min
	N-Seal	TG Plus (2,5 %) + N-Seal (2 %)	Sand C; Sand D	1 l/min
		TG Plus (2,5 %) + N-Seal (4 %)	Sand C; Sand D; Sand E	1 l/min
<b>Cetco</b>				
	Super Gel X	Super Gel X (2,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		Super Gel X (3 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		Super Gel X (4 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	Hydraul EZ	Hydraul EZ (2,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min; 4 l/min
		Hydraul EZ (3 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
		Hydraul EZ (3,5 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
		Hydraul EZ (4 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
	Rel PAC	SG X (2,5 %) + Rel PAC (0,06 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		SG X (2,5 %) + Rel PAC (0,24 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	Suspend IT	SG X (2,5 %) + Suspend IT (0,06 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		SG X (2,5 %) + Suspend IT (0,24 %)	Sand 0; Sand A; Sand B	1 l/min
<b>Ciba</b>				
	Alcomer 507	B2 (5 %) + Alcomer 507 (0,25 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	Alcomer 1771	B2 (5 %) + Alcomer 1771 (0,05 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
		B2 (5 %) + Alcomer 1771 (0,1 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min; 4 l/min
<b>Condat</b>				
	Visco 2	B2 (5 %) + Visco 2 (0,1 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
		B2 (5 %) + Visco 2 (0,2 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
		B2 (5 %) + Visco 2 (0,3 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
	VI 34	B2 (5 %) + VI 34 (0,1 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
		B2 (5 %) + VI 34 (0,25 %)	Sand B; Sand C; Sand D	1 l/min
	F 11	B2 (5 %) + F 11 (1 %)	Sand 0; Sand A	4 l/min
		B2 (5 %) + F 11 (3 %)	Sand A; Sand B	4 l/min
	Visco M	B2 (5 %) + Visco M (0,1 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		Visco M (0,25 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		Visco M (0,5 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
<b>Degussa/BASF</b>				
	Polydrill	B2 (5 %) + Polydrill (0,3 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		B2 (5 %) + Polydrill (1 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	Biovis	B2 (5 %) + Biovis (0,15 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		B2 (5 %) + Biovis (0,75 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
	Bioflow	B2 (5 %) + Bioflow (0,2 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		B2 (5 %) + Bioflow (0,75 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		B2 (5 %) + Bioflow (1,5 %)	Sand A; Sand B; Sand C	4 l/min
	Polyvis II	B2 (5 %) + Polyvis II (0,2 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
		B2 (5 %) + Polyvis II (0,4 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
<b>Ibeco</b>				
	B1	B1 (6 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 2 l/min; 4 l/min
		B1 (8 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
		B1 (10 %)	Sand B; Sand C	1 l/min; 4 l/min
	B2	B2 (8 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 2 l/min; 4 l/min
		B2 (10 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
	HTX	HTX (6 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 2 l/min; 4 l/min
		HTX (8 %)	Sand B	1 l/min; 4 l/min
		HTX (10 %)	Sand B; Sand C; Sand D	1 l/min; 4 l/min
	HTX-Spezial	HTX-Spezial (3 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		HTX-Spezial (3,5 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		HTX-Spezial (4 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
		HTX-Spezial (4,5 %)	Sand B; Sand C	2 l/min

Abbildung 6.33: Versuchsprogramm kleinformatige Injektionsversuche

<b>Phrikolat</b>			
	W (3 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	W (4 %)	Sand A	1 l/min
	W Plus (3,5 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min; 4 l/min
	W Plus (4 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min; 4 l/min
Modipol 600	W (3 %) + Modipol 600 (0,075 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	W (3 %) + Modipol 600 (0,15 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
Filter Control	W (3 %) + Filter Control (0,2 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	W (3 %) + Filter Control (0,4 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
Modiflux 230	W (3 %) + Modiflux 230 (0,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
Modivis 800	W (3 %) + Modivis 800 (0,2 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
<b>Süd Chemie</b>			
	Bentonil XR (3 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	Bentonil XR (4 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
Bentonil CF	Bentonil CF (5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	Bentonil CF (6 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
	Bentonil CF (8 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
Tixoton C2	Tixoton C2 (4 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min; 4 l/min
	Tixoton C2 (4,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min
	Tixoton C2 (5 %)	Sand A; Sand B	1 l/min; 4 l/min
Tixoton C7S	Tixoton C7S (3,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min; 4 l/min
	Tixoton C7S (4 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
SC Mud HP	Bentonil XR (3 %) + SC Mud (0,1%)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
	Bentonil XR (3 %) + SC Mud (0,2 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
	Tixoton C2 (4 %) + SC Mud (0,1 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	Tixoton C2 (4 %) + SC Mud (0,2 %)	Sand B; Sand C	1 l/min
SC Vis HVP	Bentonil XR (3 %) + SC Vis (0,1%)	Sand 0; Sand A	1 l/min; 4 l/min
	Bentonil XR (3 %) + SC Vis (0,2 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	Tixoton C2 (4 %) + SC Vis (0,1 %)	Sand B; Sand C	1 l/min
	Tixoton C2 (4 %) + SC Vis (0,2 %)	Sand B; Sand C; Sand D	1 l/min
<b>Wolf Cellulosics</b>			
	Antisol 30000 (0,1 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	Antisol 30000 (0,2 %)	Sand A; Sand B; Sand C	1 l/min
<b>Polymere</b>			
	CMC (5 %) + CMC (0,25 %)	Sand B; Sand C; Sand D	2 l/min
	B2 (5 %) + CMC (0,5 %)	Sand B; Sand C; Sand D	2 l/min; 4 l/min
	B2 (5 %) + PAC (0,075 %)	Sand A	2 l/min; 4 l/min
	B2 (5 %) + PAC (0,15 %)	Sand A; Sand B	2 l/min
	B2 (5 %) + PAC (0,3 %)	Sand B; Sand C; Sand D	2 l/min
Guar Gum	B2 (5 %) + Guar Gum (0,25 %)	Sand A; Sand B	1 l/min
	B2 (5 %) + Guar Gum (0,5 %)	Sand B; Sand C	2 l/min; 4 l/min
	B2 (5 %) + Guar Gum (0,75 %)	Sand A; Sand B; Sand C; Sand D	1 l/min
Xanthan Gum	B2 (5 %) + Xanthan Gum (0,5 %)	Sand A; Sand B	2 l/min
	B2 (5 %) + Xanthan Gum (1 %)	Sand B; Sand C	2 l/min
Stärke	B2 (5 %) + Stärke (0,5 %)	Sand 0; Sand A	1 l/min

Abbildung 6.34: Fortsetzung: Versuchsprogramm kleinformatige Injektionsversuche

## 6.4 Auswertung der Injektionsergebnisse

Für diese Auswertung der durchgeführten Versuche zur Ermittlung des Eindringverhaltens wurden die aufgezeichneten Versuchsdaten zunächst bereinigt. Zur besseren Darstellung und zum Vergleich der unterschiedlichen Druckverläufe wurden die Messkurven am Start- und am Endpunkt des Injektionsvorgangs abgeschnitten (Abbildung 6.35). Die Werte wurden bei Null beginnend, fortlaufend über die Zeit aufgetragen. Die Injektionsdauer des Versuchs kann direkt an der Zeitachse abgelesen werden.

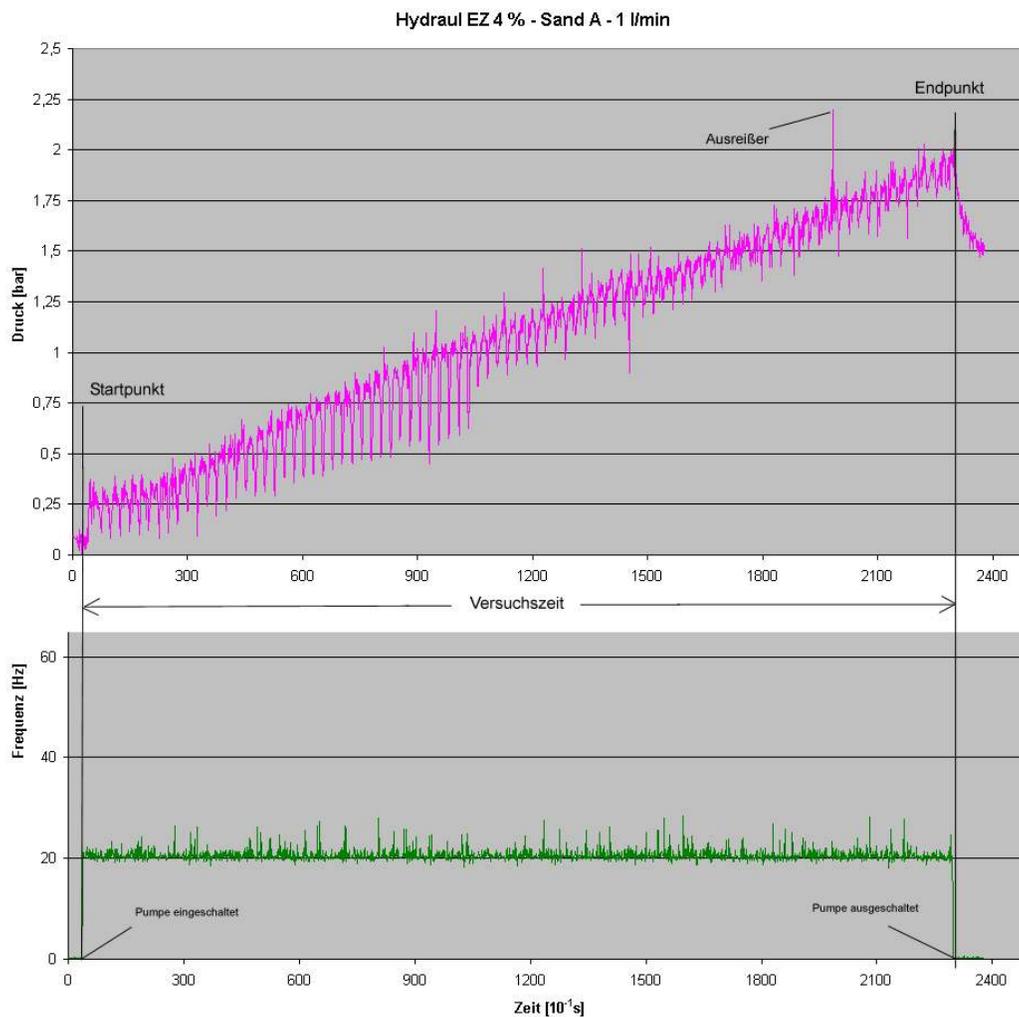


Abbildung 6.35: Beispiel zur Auswertung der gemessenen Versuchsdaten

Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse der Injektionsversuch zum reinen Calcium-Bentonit von Ibeco in 14%-iger Konzentration dargestellt.

### 6.4.1 Exemplarische Auswertung Calcium-Bentonit (Ibeco)

Bei dieser Versuchsserie wurde das Eindringverhalten der Suspension, hergestellt aus dem Calciumbentonit Ca in einer Konzentration von 14 % in den Böden mit den Korngrößen 0 - 1 mm (Sand 0) und 1 - 2 mm (Sand A) untersucht. Hierbei wurde die Suspension jeweils mit einer Geschwindigkeit von 1 l/min in die Böden injiziert. Die ermittelten Ergebnisse für den maximalen Druck, den Druckanstieg, die Versuchsdauer und die Eindringtiefe sind in Abbildung 6.36 zusammengefasst. Eine Zusammenstellung der aufgezeichneten Werte sowie der Kurvenverläufe für Druck, Durchfluss und der Frequenz sind im Anhang D.1 zu finden.

Produkt:		Ca - 14 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,10072	3,48499	78,7	3,38427	0,226	16 cm
Sand A	1l/min	0,1444	1,82741	187,6	1,68301	0,034	50 cm

Abbildung 6.36: Beispiel Calcium-Bentonit 14 Prozent: Ergebnisse des Injektionsversuches

Eine optische Untersuchung der Probekörper hat ergeben, dass sich bei dieser Versuchsserie kein äußerer Filterkuchen ausgebildet hat. Der Abbruch des Injektionsvorganges in Sand 0 erfolgte aus Sicherheitsgründen bei Erreichen eines Druckes knapp unterhalb einer Grenze von 3,5 bar. In Sand A wurde die Suspension über die volle Höhe des Probekörpers injiziert. Der aus dem Injektionsvorgang resultierende Druckanstieg betrug in Sand 0 ungefähr 3,4 bar, bevor der Versuch vorzeitig manuell abgebrochen wurde. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Suspension eine Eindringtiefe von 16 cm erreicht. Hieraus ergibt sich ein Druckanstieg von 0,23 bar/cm. Der resultierende Druckanstieg in Sand A betrug ungefähr 1,7 bar (0,03 bar/cm).

Das Diagramm in Abbildung 6.37 gibt den über die Versuchszeit aufgezeichneten Druck bei fester Durchflussmenge (1 l/min) jeweils für Sand 0 und Sand A wieder. Dies ermöglicht den Vergleich der unterschiedlichen Druckentwicklung in den verschiedenen Böden über den gesamten Versuchszeitraum. Bei der Injektion der Suspension in den feinkörnigeren Sand 0 stieg der Druck innerhalb der ersten 40 Sekunden annähernd linear an und verlief danach exponentiell bis zu dem Punkt weiter an dem der Versuch abgebrochen wurde. Der schnelle Druckanstieg lässt sich durch eine sukzessive Verstopfung der Porenräume durch die Bentonitpartikel in der Suspension erklären, was durch Betrachtung der aufgezeichneten Daten der Durchflussmenge belegt werden kann (Abbildung 6.38). Hieraus ist zu ersehen, dass der kontinuierliche Durchfluss von 1 l/min nach ungefähr diesen 40 Sekunden langsam weniger wurde und zwischenzeitlich sogar ganz abbrach. Der Druckanstieg in Sand A verlief über den gesamten Versuchszeitraum nahezu linear.

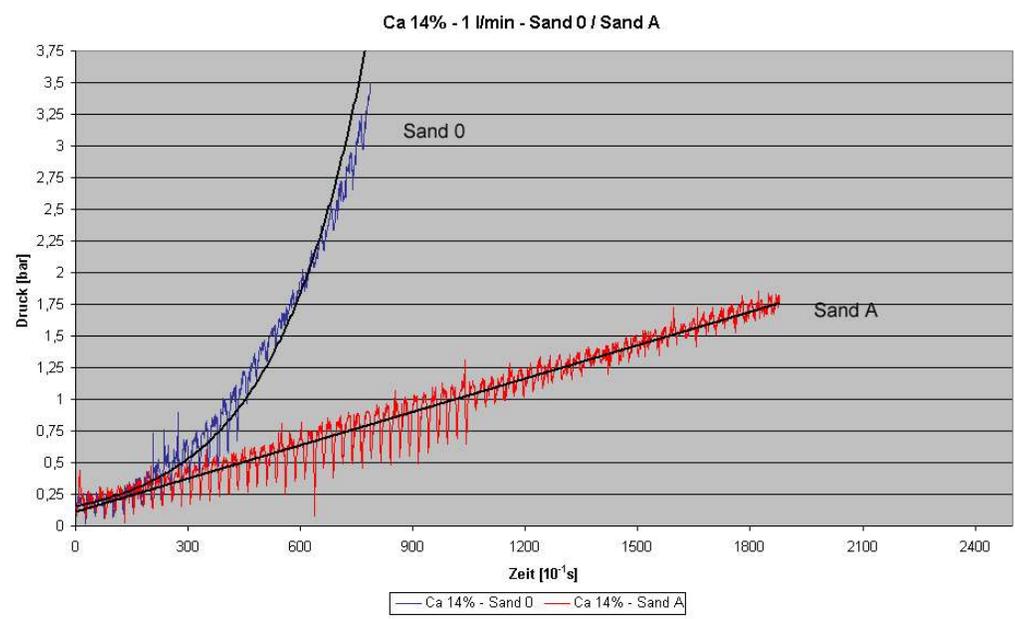


Abbildung 6.37: Beispiel: Calcium-Bentonit 14 Prozent, Druckverlauf, Sand 0 und Sand A mit 1 l/m

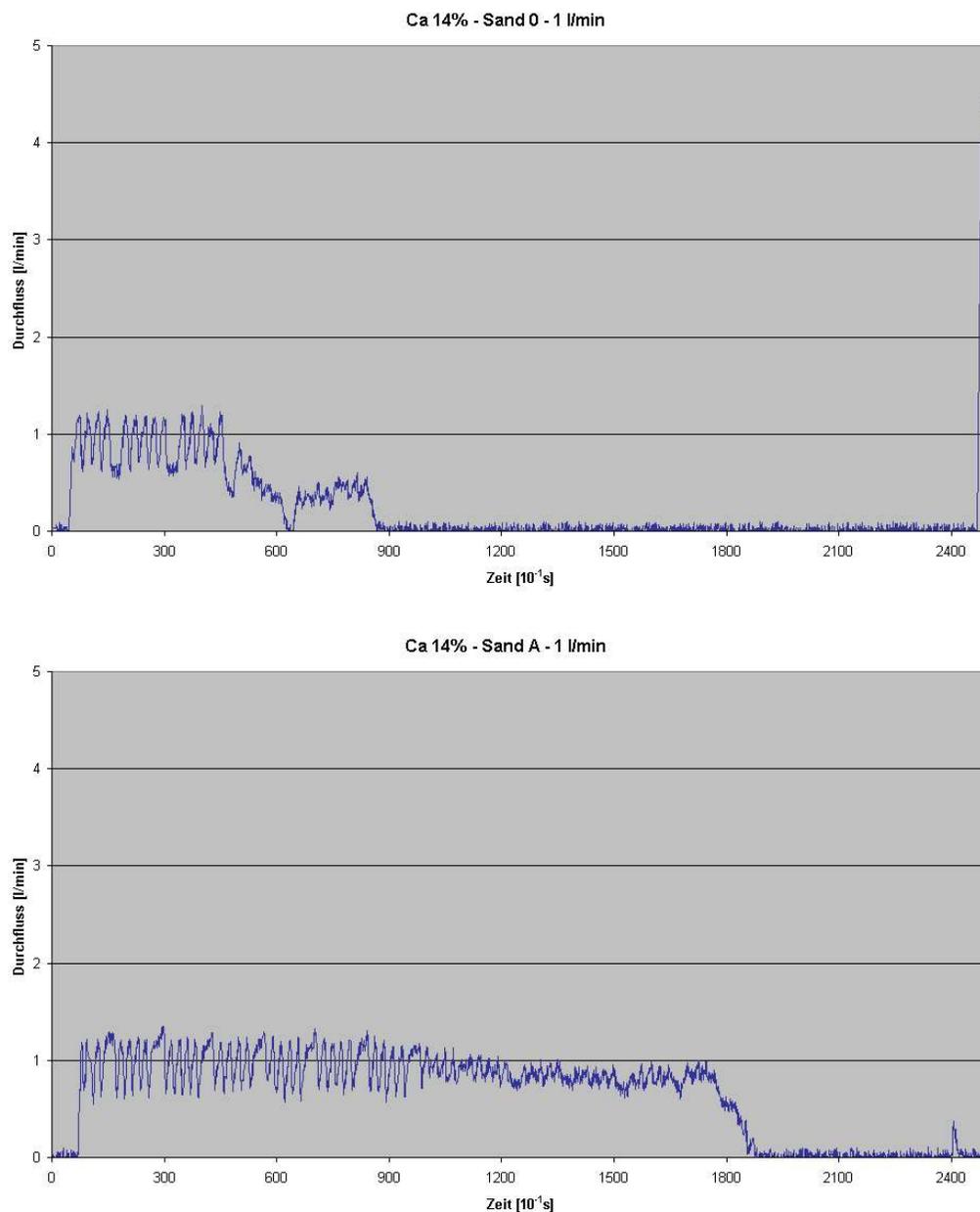


Abbildung 6.38: Beispiel: Calcium-Bentonit 14 Prozent, Durchflussmessung, Sand 0 und Sand A mit 1 l/min

## 6.4.2 Reine Polymerprodukte in Kombination mit der Basis-Bentonitsuspension B2

### 6.4.2.1 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Stärke 0,5 Prozent

Produkt:	B2 5% + Stärke 0,5 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,05959	3,42934	108	3,36975	0,153	23 cm
Sand A	1l/min	0,05437	0,38499	181	0,33062	0,007	50 cm

Abbildung 6.39: Injektionsergebnisse: Stärke

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
Stärke	B2 5% + Stärke 0,5%	XXX	~		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.40: Einsatzbereiche: Stärke

### 6.4.2.2 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit CMC 0,25 Prozent und 0,5 Prozent

Produkt:	B2 - 5 % + CMC 0,25 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	2l/min	0,38627	2,16096	110,5	1,77469	0,036	50 cm
Sand C	2l/min	0,58250	1,35614	85	0,77364	0,016	50 cm
Sand D	2l/min	0,62819	1,04169	94	0,41350	0,008	50 cm

Produkt:	B2 - 5 % + CMC 0,5 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [%]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	2l/min	1,18328	3,09011	90,6	1,90683	0,062	32 cm
Sand C	2l/min	1,17316	2,23218	352,8	1,05902	0,022	50 cm
Sand D	4l/min	1,37081	2,07253	82,2	0,70172	0,014	50 cm

Abbildung 6.41: Injektionsergebnisse: CMC

Injektionsversuche:	Boden:	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D	Sand E
Polymere	Korngrößen:	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 25 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
CMC	B2 5% + CMC 0,25%		XX	X	~	
	B2 5% + CMC 0,5%		XXX	XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.42: Einsatzbereiche: CMC

### 6.4.2.3 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit PAC 0,075 Prozent, 0,15 Prozent und 0,3 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + PAC 0,075 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	2l/min	0,17562	1,26811	114,7	1,09249	0,022	50 cm
Sand A	4l/min	0,22766	1,39024	51,6	1,16258	0,024	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + PAC 0,15 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [%]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	2l/min	0,37568	2,94436	159,4	2,56868	0,052	50 cm
Sand B	2l/min	0,38302	1,40344	138,6	1,02042	0,021	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + PAC 0,3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [%]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	2l/min	0,64449	2,56139	168,2	1,9169	0,039	50 cm
Sand C	2l/min	0,71265	1,64458	175,5	0,93193	0,019	50 cm
Sand D	2l/min	0,73224	1,13874	158,7	0,40650	0,008	50 cm

Abbildung 6.43: Injektionsergebnisse: PAC

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
PAC	B2 5% + PAC 0,075%		XX			
	B2 5% + PAC 0,15%		XX	X		
	B2 5% + PAC 0,3%			XX	X	~

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.44: Einsatzbereiche: PAC

### 6.4.2.4 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Guar Gum 0,25 Prozent, 0,5 Prozent und 0,75 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Guar Gum 0,25 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,06681	3,17596	111,7	3,10915	0,141	23 cm
Sand B	1l/min	0,08006	0,55257	183,8	0,47251	0,010	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Guar Gum 0,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07716	3,4619	88,9	3,38474	0,242	15 cm
Sand B	1l/min	0,1992	1,36662	203,5	1,16742	0,024	50 cm
Sand C	1l/min	0,1831	0,95567	201,9	0,77257	0,016	50 cm
Sand D	1l/min	0,19476	0,78200	200,5	0,58724	0,012	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Guar Gum 0,75 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [%]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	2l/min	0,34568	2,07163	188,7	1,72595	0,035	50 cm
Sand C	4l/min	0,71211	1,35169	68,2	0,63958	0,013	50 cm

Abbildung 6.45: Injektionsergebnisse: Guar Gum

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
Guar Gum	B2 5% + Guar Gum 0,25%		XXX	~		
	B2 5% + Guar Gum 0,5%		XXX	XX	X	~
	B2 5% + Guar Gum 0,75%			XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.46: Einsatzbereiche: Guar Gum

### 6.4.2.5 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Xanthan Gum 0,5 Prozent und 1 Prozent

Produkt: B2 - 5 % + Xanthan Gum 0,5 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [%]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	2l/min	0,21557	1,50244	142,7	1,28687	0,026	50 cm
Sand B	2l/min	0,22596	0,84025	157	0,61429	0,013	50 cm

Produkt: B2 - 5 % + Xanthan Gum 1 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [%]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	2l/min	0,42456	1,50106	148,7	1,0765	0,022	50 cm
Sand C	2l/min	0,375034	0,86054	138	0,48551	0,010	50 cm

Abbildung 6.47: Injektionsergebnisse: Xanthan Gum

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
Xanthan Gum	B2 5% + Xanthan Gum 0,5%		XX	X		
	B2 5% + Xanthan Gum 1%			XX	~	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.48: Einsatzbereiche: Xanthan Gum

### 6.4.3 Baroid Produkte

#### 6.4.3.1 Tunnelgel plus 2,5 Prozent, 3 Prozent, 4 Prozent

Produkt:		Tunnelgel Plus 2,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,05620	1,87576	205,9	1,81956	0,037	50 cm
Sand A	1l/min	0,05615	0,55074	196,4	0,49459	0,010	50 cm

Produkt:		Tunnelgel Plus 3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,05480	3,39532	152,8	3,34052	0,101	34 cm
Sand A	1l/min	0,05014	0,64968	206,7	0,59954	0,012	50 cm

Produkt:		Tunnelgel Plus 4 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,09850	1,03059	210,5	0,93209	0,019	50 cm
Sand B	1l/min	0,09534	0,66646	206,3	0,57112	0,012	50 cm

Abbildung 6.49: Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D	Sand E
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 25 mm
	Produkt:	Konzentration:					
<b>BAROID</b>							
	Tunnel Gel Plus	2,5%	XX	~			
		3%	XXX	X			
		4%		X	~		

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.50: Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus

#### 6.4.3.2 Tunnelgel plus 2,5 Prozent mit No Sag 0,08 Prozent und 0,16 Prozent

Produkt:		Tunnelgel Plus 2,5 % + No Sag 0,08 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,07189	2,73276	208,1	2,66087	0,054	50 cm
Sand A	1l/min	0,07446	0,75130	190,8	0,67684	0,014	50 cm

Produkt:		Tunnelgel Plus 2,5% + No Sag 0,16 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07664	0,80297	204,7	0,72633	0,015	50 cm
Sand A	4l/min	0,09631	1,17653	47,3	1,08022	0,022	50 cm
Sand B	4l/min	0,09574	0,61939	75,2	0,52365	0,011	50 cm

Abbildung 6.51: Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit No Sag

<b>Injektionsversuche:</b>	<b>Boden:</b>	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
<b>Polymere</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Kombination + Konzentration:</b>				
<b>BAROID</b>					
No Sag	Tunnel Gel Plus 2,5% + No Sag 0,08%	XX	X		
	Tunnel Gel Plus 2,5% + No Sag 0,16%		X / XX (bei 4 l/min)	~	
<b>Legende:</b> ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)					

Abbildung 6.52: Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit No Sag

### 6.4.3.3 Tunnelgel plus 2,5 Prozent mit Quik Trol 0,12 Prozent

<b>Produkt:</b>	<b>Tunnelgel Plus 2,5 % + Quik Trol 0,12 %</b>						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand 0	1l/min	0,05544	3,17003	214,4	3,11459	0,064	50 cm
Sand A	1l/min	0,05295	0,75946	201,8	0,70651	0,014	50 cm

Abbildung 6.53: Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit Quik Trol

<b>Injektionsversuche:</b>	<b>Boden:</b>	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
<b>Polymere</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Kombination + Konzentration:</b>				
<b>BAROID</b>					
Quik Trol	Tunnel Gel Plus 2,5% + Quik Trol 0,12%	XXX	X		
<b>Legende:</b> ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)					

Abbildung 6.54: Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit Quik Trol

### 6.4.3.4 Tunnelgel plus 3 Prozent mit Diamond Seal 1,2 Prozent und 2,4 Prozent

<b>Datum:</b>	20.04.2007						
<b>Produkt:</b>	<b>Tunnelgel Plus 3% + Diamond Seal 1,2 % (10 min)</b>						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand C	1l/min	0,07574	3,26457	78,6	3,18883	0,213	16 cm
Sand D	1l/min	0,05556	3,36519	146	3,30963	0,089	38 cm
Sand E	1l/min	0,14873	1,77025	195,3	1,62152	0,033	50 cm
<b>Produkt:</b>	<b>Tunnelgel Plus 3% + Diamond Seal 2,4 % (10 min)</b>						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand C	1l/min	0,09002	3,37258	74,4	3,28256	0,274	13 cm
Sand D	1l/min	0,08336	3,12500	140,9	3,04164	0,092	34 cm
Sand E	1l/min	0,0956	2,23985	184,5	2,14425	0,044	50 cm

Abbildung 6.55: Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit Diamond Seal (Quellzeit 10 Minuten)

Produkt: Tunnelgel Plus 3% + Diamond Seal 1,2% (30 min)							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand C	1l/min	0,06269	3,21362	81	3,15093	0,203	16,5 cm
Sand D	1l/min	0,10543	3,34821	174,6	3,24278	0,080	41,5 cm
Sand E	1l/min	0,11806	2,04217	193,7	1,92411	0,039	50 cm

Produkt: Tunnelgel Plus 3% + Diamond Seal 2,4% (30 min)							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand C	1l/min	0,14833	4,35219	58,3	4,20386	0,701	7 cm
Sand D	1l/min	0,18606	3,11743	92,6	2,93137	0,172	18 cm
Sand E	1l/min	0,25253	2,97143	219,8	2,71890	0,055	50 cm

Abbildung 6.56: Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit Diamond Seal (Quellzeit 30 Minuten)

Injektionsversuche:	Boden:	Sand B	Sand C	Sand D	Sand E
Polymere	Korngrößen:	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 25 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
<b>BAROID</b>					
Diamond Seal	Tunnel Gel Plus 3% + Diamond Seal 1,2% (10 min)		XXX	XXX	XX
	Tunnel Gel Plus 3% + Diamond Seal 1,2% (30 min)		XXX	XXX	XX
	Tunnel Gel Plus 3% + Diamond Seal 2,4% (10 min)		XXX	XXX	XX
	Tunnel Gel Plus 3% + Diamond Seal 2,4% (30 min)		XXX	XXX	XX

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.57: Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit Diamond Seal

### 6.4.3.5 Tunnelgel plus 3 Prozent mit N-Seal 2 Prozent und 4 Prozent

Produkt: Tunnelgel Plus 3% + N-Seal 2%							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand C	1l/min	0,08553	3,44714	129	3,36161	0,125	28 cm
Sand D	1l/min	0,08129	2,45278	185,5	2,37149	0,048	50 cm

Datum: 20.04.2007							
Produkt: Tunnelgel Plus 3% + N-Seal 4%							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand C	1l/min	0,07957	3,40944	57,1	3,32987	0,416	9 cm
Sand D	1l/min	0,07029	3,30858	95,2	3,23829	0,147	23 cm
Sand E	1l/min	0,09014	0,36441	147,9	0,27427	0,006	50 cm

Abbildung 6.58: Injektionsergebnisse: Baroid - Tunnelgel plus mit N-Seal

Injektionsversuche:	Boden:	Sand B	Sand C	Sand D	Sand E
Polymere	Korngrößen:	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 25 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
<b>BAROID</b>					
N-Seal	Tunnel Gel Plus 3% + N-Seal 2%		XXX	XX	
	Tunnel Gel Plus 3% + N-Seal 4%		XXX	XXX	~

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.59: Einsatzbereiche: Baroid - Tunnelgel plus mit N-Seal

## 6.4.4 Cetco Produkte

### 6.4.4.1 Super Gel X 2,5 Prozent, 3 Prozent, 4 Prozent

Produkt:		Super Gel X 2,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,09741	1,42774	197,6	1,33033	0,027	50 cm
Sand A	1l/min	0,09263	0,47613	207	0,38350	0,008	50 cm

Produkt:		Super Gel X 3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,15394	2,49706	195,9	2,34312	0,048	50 cm
Sand A	1l/min	0,15063	0,71347	203,6	0,56284	0,011	50 cm

Produkt:		Super Gel X 4 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,16497	1,37986	207,6	1,21489	0,025	50 cm
Sand B	1l/min	0,14267	0,88191	190,5	0,73924	0,015	50 cm

Abbildung 6.60: Injektionsergebnisse: Cetco - Super Gel X

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Konzentration:					
<b>CETCO</b>						
Super Gel X	2,5%	XX	~			
	3%	XX	~			
	4%		XX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.61: Einsatzbereiche: Cetco - Super Gel X

### 6.4.4.2 Super Gel X 2,5 Prozent mit Rel PAC 0,06 Prozent und 0,24 Prozent

Produkt:		Super Gel X 2,5 % + Rel PAC 0,06 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,05806	1,93619	198,2	1,87813	0,038	50 cm
Sand A	1l/min	0,06821	0,58241	205,3	0,51420	0,010	50 cm

Produkt:		Super Gel X 2,5 % + Rel PAC 0,24 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,08557	3,11395	184,9	3,02838	0,062	50 cm
Sand A	1l/min	0,09777	0,94109	296,6	0,84332	0,017	50 cm

Abbildung 6.62: Injektionsergebnisse: Cetco - Super Gel X mit Rel PAC

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
<b>CETCO</b>					
Rel PAC	Super Gel X 2,5 % + Rel PAC 0,06%	XX	~		
	Super Gel X 2,5% + Rel PAC 0,24%	XXX	X		
<b>Legende:</b> ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)					

Abbildung 6.63: Einsatzbereiche: Cetco - Super Gel X mit Rel PAC

### 6.4.4.3 Super Gel X 2,5 Prozent mit Suspend IT mit 0,06 Prozent und 0,24 Prozent

Produkt:	Super Gel X 2,5 % + Suspend It 0,06 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,04565	2,41366	207,4	2,36801	0,048	50 cm
Sand A	1l/min	0,04398	0,75804	196,5	0,71406	0,015	50 cm
Produkt:	Super Gel X 2,5 % + Suspend It 0,24 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,14629	3,19295	180,5	3,04666	0,062	50 cm
Sand A	1l/min	0,13328	1,17238	202,3	1,0391	0,021	50 cm
Sand B	1l/min	0,10706	0,70789	198,9	0,60083	0,012	50 cm

Abbildung 6.64: Injektionsergebnisse: Cetco - Super Gel X mit Suspend IT

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
<b>CETCO</b>					
Suspend IT	Super Gel X 2,5% + Suspend IT 0,06%	XX	X		
	Super Gel X 2,5% + Suspend IT 0,24%	XXX	XX	X	
<b>Legende:</b> ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)					

Abbildung 6.65: Einsatzbereiche: Cetco - Super Gel X mit Suspend IT

6.4.4.4 Hydraul EZ 2,5 Prozent, 3 Prozent, 3,5 Prozent und 4 Prozent

Produkt:		Hydraul EZ 2,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,09057	3,1368	130,8	3,04623	0,122	26 cm
Sand A	1l/min	0,05689	0,82337	237,6	0,76648	0,016	50 cm
Sand A	4l/min	0,0864	1,06326	53,4	0,97686	0,020	50 cm

Produkt:		Hydraul EZ 3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,09608	1,02969	215,5	0,93361	0,019	50 cm
Sand B	1l/min	0,09813	0,68301	205,3	0,58488	0,012	50 cm
Sand B	4l/min	0,13086	0,91171	50,4	0,78085	0,016	50 cm

Produkt:		Hydraul EZ 3,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,16189	1,65159	220,9	1,4897	0,030	50 cm
Sand B	1l/min	0,16131	1,00255	209,7	0,84124	0,017	50 cm
Sand C	1l/min	0,16127	0,75974	222,5	0,59847	0,012	50 cm

Produkt:		Hydraul EZ 4 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,0574	2,00462	226,1	1,94722	0,040	50 cm
Sand B	1l/min	0,16548	1,28500	208,6	1,11952	0,023	50 cm
Sand C	1l/min	0,23071	0,93657	191,4	0,70586	0,014	50 cm

Abbildung 6.66: Injektionsergebnisse: Cetco - Hydraul EZ

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
	Produkt:	Konzentration:				
<b>CETCO</b>						
	Hydraul EZ	2,5%	XXX	X		
		3%		X		
		3,5%	XX	X	~	
		4%	XX	XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.67: Einsatzbereiche: Cetco - Hydraul EZ

## 6.4.5 Ciba Specialities Produkte

### 6.4.5.1 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Alcomer 507 0,25 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Alcomer 507 0,25 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,10533	1,34249	201,7	1,23716	0,056	23 cm
Sand B	1l/min	0,10821	0,82593	194,2	0,71772	0,015	50 cm

Abbildung 6.68: Injektionsergebnisse: Ciba - Alcomer 507

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
CIBA					
Alcomer 507	B2 5% + Alcomer 507 0,25%		XX	X	

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.69: Einsatzbereiche: Ciba - Alcomer 507

### 6.4.5.2 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Alcomer 1771 0,05 Prozent und 0,1 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Alcomer 1771 0,05 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,11291	2,97362	109,9	2,86071	0,151	10 cm (20 cm)
Sand B	1l/min	0,11670	2,31986	198,6	2,20316	0,045	30 cm (50 cm)
Sand C	1l/min	0,11045	0,46825	199,9	0,3578	0,007	50 cm
Sand C	4l/min	0,11881	0,63617	50,1	0,51736	0,011	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Alcomer 1771 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,12770	3,08366	76,8	2,95596	0,227	8 cm (14 cm)
Sand B	1l/min	0,10632	1,61778	168,1	1,51146	0,034	30 cm (45 cm)
Sand C	1l/min	0,11063	0,54165	234,4	0,43102	0,009	50 cm

Abbildung 6.70: Injektionsergebnisse: Ciba - Alcomer 1771

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
CIBA					
Alcomer 1771	B2 5% + Alcomer 1771 0,05%		XXX	XX	~
	B2 5% + Alcomer 1771 0,1%		XXX	XX	~

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.71: Einsatzbereiche: Ciba - Alcomer 1771

## 6.4.6 Condat Produkte

### 6.4.6.1 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Visco 2 0,1 Prozent, 0,2 Prozent und 0,3 Prozent

Produkt:		B2 5% + Visco 2 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,09531	3,57284	162,4	3,47753	0,116	31 cm
Sand B	1l/min	0,25465	1,22396	206,9	0,96931	0,020	50 cm
Sand C	1l/min	0,18101	0,79175	203,9	0,61074	0,012	50 cm

Produkt:		B2 5% + Visco 2 0,2%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,15057	3,12101	229,2	2,97044	0,061	50 cm
Sand B	1l/min	0,21885	1,93006	215,6	1,71121	0,035	50 cm
Sand C	1l/min	0,31972	1,26099	202,8	0,94127	0,019	50 cm

Produkt:		B2 5% + Visco 2 0,3%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,22286	3,12286	165	2,9	0,085	35 cm
Sand B	1l/min	0,29789	2,44614	225,1	2,14825	0,044	50 cm
Sand C	1l/min	0,31278	1,64949	221,8	1,33671	0,027	50 cm

Abbildung 6.72: Injektionsergebnisse: Condat - Visco 2

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
<b>CONDAT</b>						
Visco 2	B2 5% + Visco 2 0,1%		xxx	x	x	
	B2 5% + Visco 2 0,2%		xxx	xx	x	
	B2 5% + Visco 2 0,3%		xxx	xx	xx	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.73: Einsatzbereiche: Condat - Visco 2

### 6.4.6.2 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit VI34 0,1 Prozent und 0,25 Prozent

Produkt:		B2 5% + VI 34 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	4l/min	0,19068	3,4132	20,1	3,22252	0,215	16 cm
Sand B	4l/min	0,13133	3,21304	39,3	3,08171	0,091	35 cm
Sand C	4l/min	0,16267	2,37068	56,4	2,20801	0,045	50 cm

Produkt:		B2 5% + VI 34 0,25 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	4l/min	0,12084	3,40175	35	3,28091	0,164	21 cm
Sand C	4l/min	0,14878	2,76994	58,3	2,62116	0,053	50 cm
Sand D	4l/min	0,1153	1,65672	53,4	1,54142	0,031	50 cm

Abbildung 6.74: Injektionsergebnisse: Condat - VI 34

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D	Sand E
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 25 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:						
<b>CONDAT</b>							
VI 34	B2 5% + VI 34 0,1%		XXX	XXX	XX		
	B2 5% + VI 34 0,25%			XXX	XX	XX	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.75: Einsatzbereiche: Condat - VI34

### 6.4.6.3 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit F11 1 Prozent und 3 Prozent

Produkt:		B2 5% + F11 1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	4l/min	0,11055	2,86673	52,2	2,75618	0,056	50 cm
Sand A	4l/min	0,14666	0,78603	50,8	0,63937	0,013	50 cm

Produkt:		B2 5% + F11 1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	4l/min	0,11055	2,86673	52,2	2,75618	0,056	50 cm
Sand A	4l/min	0,14666	0,78603	50,8	0,63937	0,013	50 cm

Abbildung 6.76: Injektionsergebnisse: Condat - F 11

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
<b>CONDAT</b>					
F11	B2 5% + F11 1%	XX	X		
	B2 5% + F11 3%		XX	~	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.77: Einsatzbereiche: Condat - F 11

### 6.4.6.4 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Visco M 0,1 Prozent

Produkt:		B2 5% + Visco 2 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,09531	3,57284	162,4	3,47753	0,116	31 cm
Sand B	1l/min	0,25465	1,22396	206,9	0,96931	0,020	50 cm
Sand C	1l/min	0,18101	0,79175	203,9	0,61074	0,012	50 cm

Abbildung 6.78: Injektionsergebnisse: Condat - B2 mit Visco M

6.4.6.5 Visco M 0,25 Prozent und 0,5 Prozent

Produkt:		Visco M 0,25 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,05407	2,90756	215,8	2,85349	0,058	50 cm
Sand B	1l/min	0,06455	0,44942	191,6	0,38487	0,008	50 cm

Produkt:		Visco M 0,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07584	3,33213	114,8	3,25629	0,148	23 cm
Sand B	1l/min	0,09539	2,22706	211,8	2,13167	0,044	50 cm
Sand C	1l/min	0,09186	0,86614	183,7	0,77428	0,016	50 cm

Abbildung 6.79: Injektionsergebnisse: Condat - Visco M

Injektionsversuche:	Boden:	Sand D	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
Visco M	Visco M 0,25 %		XX	~		
	Visco M 0,5 %		XXX	XX	X	
	B2 5% + Visco M 0,01%		XXX	X		

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.80: Einsatzbereiche: Condat - Visco M mit und ohne Bentonit B2

## 6.4.7 Degussa/Basf Produkte

### 6.4.7.1 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Polydrill 0,3 Prozent und 1 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Polydrill 0,3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,08452	3,59929	89,3	3,51477	0,207	18 cm
Sand A	1l/min	0,08386	0,43621	192	0,35235	0,007	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Polydrill 1,0 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,04307	3,19242	157,9	3,14935	0,087	37 cm
Sand A	1l/min	0,05132	0,30929	200,4	0,25797	0,005	50 cm

Abbildung 6.81: Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Polydrill

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
DEGUSSA/BASF					
Polydrill	B2 5% + Polydrill 0,3%	xxx	~		
	B2 5% + Polydrill 1%	xxx	~		

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.82: Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Polydrill

### 6.4.7.2 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Biovis 0,15 Prozent und 0,75 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Biovis 0,15 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,06415	2,91676	80,3	2,85261	0,228	13,5 cm
Sand A	1l/min	0,06339	0,39048	200	0,32709	0,007	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Biovis 0,75 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,04524	2,61162	218,9	2,56638	0,052	50 cm
Sand B	1l/min	0,04282	1,38192	201,8	1,33910	0,027	50 cm
Sand C	1l/min	0,06595	0,81656	200,3	0,75061	0,015	50 cm

Abbildung 6.83: Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Biovis

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
DEGUSSA/BASF						
Biovis	B2 5% + Biovis 0,15%	xxx	~			
	B2 5% + Biovis 0,75%		xx	xx	x	

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.84: Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Biovis

6.4.7.3 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Bioflow 0,2 Prozent, 0,75 Prozent und 1,5 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Bioflow 0,2 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,11063	3,04801	80,5	2,93738	0,210	15 cm
Sand A	1l/min	0,10054	0,82129	203	0,72075	0,015	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Bioflow 0,75 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,16136	2,05508	217,1	1,89372	0,039	50 cm
Sand B	1l/min	0,15003	1,19144	199	1,04141	0,021	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Bioflow 1,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	4l/min	0,18778	3,28883	72,9	3,10105	0,063	50 cm
Sand B	4l/min	0,19643	1,94034	57,7	1,74391	0,036	50 cm
Sand C	4l/min	0,25281	0,75143	77,2	0,49862	0,010	50 cm

Abbildung 6.85: Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Bioflow

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
DEGUSSA/BASF					
Bioflow	B2 5% + Bioflow 0,2%	XXX	X		
	B2 5% + Bioflow 0,75%		XX	XX	
	B2 5% + Bioflow 1,5%		XXX	XX	~

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.86: Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Bioflow

6.4.7.4 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Polyvis II 0,2 Prozent und 0,4 Prozent

Produkt:		B2 - 5 % + Polyvis II 0,2 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,11878	3,68331	97,7	3,56453	0,178	21 cm
Sand A	1l/min	0,10622	0,52705	187	0,42083	0,009	50 cm

Produkt:		B2 - 5 % + Polyvis II 0,4 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,04493	3,24656	99,7	3,20163	0,178	19 cm
Sand A	1l/min	0,08129	0,66620	199,4	0,58491	0,012	50 cm

Abbildung 6.87: Injektionsergebnisse: Degussa/Basf - Polyvis

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:				
DEGUSSA/BASF					
Polyvis II	B2 5% + Polyvis II 0,2%	XXX	~		
	B2 5% + Polyvis II 0,4%	XXX	~		

Legende: ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.88: Einsatzbereiche: Degussa/Basf - Polyvis

## 6.4.8 Ibeco Produkte

### 6.4.8.1 Natrium-Bentonit 12 Prozent

Produkt:		Na - 12 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	1l/min	0,12092	1,33464	202,4	1,21372	0,025	50 cm
Sand B	4l/min	0,18465	1,65860	52,8	1,47395	0,030	50 cm

Abbildung 6.89: Injektionsergebnisse: Ibeco - Natrium-Bentonit

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
<b>Bentonite</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Konzentration:</b>					
Natriumbentonit Na	12%			XX		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.90: Einsatzbereiche: Ibeco - Natrium-Bentonit

### 6.4.8.2 Calcium-Bentonit 14 Prozent und 16 Prozent

Produkt:		Ca - 14 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,10072	3,48499	78,7	3,38427	0,226	16 cm
Sand A	1l/min	0,1444	1,82741	187,6	1,68301	0,034	50 cm

Produkt:		Ca - 16 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,13149	3,73082	101	3,59933	0,200	19 cm
Sand B	1l/min	0,14728	0,87235	213,7	0,72507	0,015	50 cm

Abbildung 6.91: Injektionsergebnisse: Ibeco - Calcium-Bentonit

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
<b>Bentonite</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Konzentration:</b>					
Calciumbentonit Ca	14%	XXX	XX			
	16%		XXX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.92: Einsatzbereiche: Ibeco - Calcium-Bentonit

### 6.4.8.3 B1 6 Prozent, 8 Prozent und 10 Prozent

Produkt:		B1 - 6%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe
1-2 mm (Sand A)	1l/min	0,1621	1,12354	220,6	0,96144	0,0196	50 cm
	2l/min	0,1892	1,21047	99,7	1,02127	0,0208	50 cm
	4l/min	0,20893	1,23045	52	1,02152	0,0208	50 cm
2-4 mm (Sand B)	1l/min	0,14864	0,71381	208,6	0,56517	0,0115	50 cm
	2l/min	0,15169	0,75187	98,1	0,60018	0,0122	50 cm
	4l/min	0,17343	0,76845	50,5	0,59502	0,0121	50 cm

Produkt:		B1 - 8 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,27518	3,3552	192	3,08002	0,070	45 cm
Sand B	1l/min	0,26985	0,99051	205,1	0,72066	0,015	50 cm
Sand B	4l/min	0,2055	1,095	51,5	0,88950	0,018	50 cm

Produkt:		B1 - 10 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe
Sand B	1l/min	0,36898	1,68286	221,2	1,31388	0,027	50 cm
Sand C	4l/min	0,32246	1,19550	54	0,87304	0,018	50 cm

Abbildung 6.93: Injektionsergebnisse: Ibeco - B1

Injektionsversuche:	Boden:	Sand D	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Konzentration:					
<b>IBECO</b>						
B1	6%		XX	X		
	8%		XXX	X		
	10%			XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.94: Einsatzbereiche: Ibeco - B1

### 6.4.8.4 B2 8 Prozent und 10 Prozent

Produkt:		B2 - 8%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe
1-2 mm (Sand A)	1l/min	0,15295	1,12278	200	0,96983	0,0198	50 cm
	2l/min	0,17564	1,19796	95	1,02232	0,0209	50 cm
	4l/min	0,18676	1,28361	48	1,09685	0,0224	50 cm
2-4 mm (Sand B)	1l/min	0,15173	0,67264	200	0,52091	0,0106	50 cm
	2l/min	0,16535	0,67766	97	0,51231	0,0105	50 cm
	4l/min	0,16900	0,74028	49	0,57128	0,0117	50 cm

Produkt:		B2 - 10 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07303	2,33738	208,1	2,26435	0,046	50 cm
Sand B	1l/min	0,07536	1,02054	218,7	0,94518	0,019	50 cm
Sand B	4l/min	0,08645	1,07821	48,5	0,99176	0,020	50 cm

Abbildung 6.95: Injektionsergebnisse: Ibeco - B2

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
<b>Bentonite</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
	<b>Produkt:</b>					
	<b>Konzentration:</b>					
<b>IBECO</b>						
B2	8%		XX	~		
	10%		XX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.96: Einsatzbereiche: Ibeco - B2

### 6.4.8.5 HT-X 6 Prozent, 8 Prozent und 10 Prozent

Produkt:		HTX - 6%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
1-2 mm (Sand A)	1l/min	0,14117	1,22408	193,3	1,08291	0,0221	50 cm
	2l/min	0,15661	1,27832	96,6	1,12171	0,0229	50 cm
	4l/min	0,17882	1,32051	49,3	1,14169	0,0233	50 cm
2-4 mm (Sand B)	1l/min	0,1492	0,65788	198,8	0,50868	0,0104	50 cm
	2l/min	0,1307	0,64019	95,5	0,50949	0,0104	50 cm
	4l/min	0,1696	0,68419	51,5	0,51459	0,0105	50 cm

Produkt:		HTX - 8%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	1l/min	0,2839	1,46434	212,5	1,18044	0,024	50 cm
Sand B	4l/min	0,2987	1,51555	51,9	1,21685	0,025	50 cm

Produkt:		HTX - 10%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	1l/min	0,52963	3,31424	237,2	2,78461	0,057	50 cm
Sand C	1l/min	0,70668	2,29944	246,8	1,59276	0,033	50 cm
Sand D	4l/min	0,87024	1,75412	60,7	0,88388	0,018	50 cm

Abbildung 6.97: Injektionsergebnisse: Ibeco - HT-X

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D	Sand E
<b>Bentonite</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 25 mm
	<b>Produkt:</b>						
	<b>Konzentration:</b>						
<b>IBECO</b>							
HT-X	6%		XX	~			
	8%			XX			
	10%			XX	XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.98: Einsatzbereiche: Ibeco - HT-X

6.4.8.6 HT-X Spezial 3 Prozent, 3,5 Prozent, 4 Prozent und 4,5 Prozent

Produkt:		HTX-Spezial 3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,0508	1,08127	207,5	1,03047	0,021	50 cm
Sand B	1l/min	0,06318	0,60821	201,7	0,54503	0,011	50 cm
Produkt:		HTX-Spezial 3,5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,05361	1,46117	210,7	1,40756	0,029	50 cm
Sand B	1l/min	0,05671	0,91297	200,6	0,85626	0,017	50 cm
Produkt:		HTX-Spezial 4%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,08724	1,57946	219,6	1,49222	0,030	50 cm
Sand B	1l/min	0,15444	1,05910	205,4	0,90466	0,018	50 cm
Produkt:		HTX-Spezial 4,5%					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	2l/min	0,492105	1,88881	83	1,396705	0,029	50 cm
Sand C	2l/min	0,71411	1,27101	76,1	0,55690	0,011	50 cm

Abbildung 6.99: Injektionsergebnisse: Ibeco - HT-X spezial

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Konzentration:					
IBECO	HT-X Spezial	3%	XX	~		
		3,5%	XX	X		
		4%	XX	X		
		4,5%		XX	~	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.100: Einsatzbereiche: Ibeco - HT-X spezial

## 6.4.9 Phrikolat Produkte

### 6.4.9.1 Wyoming Bentonit 8 Prozent, 10 Prozent, 12 Prozent und 14 Prozent

Produkt:		Wyoming Bentonite 8 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]	
Sand 0	1l/min	0,04185	3,42579	126,8	3,38394	0,125	28 cm	
Sand A	1l/min	0,04312	0,52156	199,7	0,47844	0,010	50 cm	

Produkt:		Wyoming Bentonite 10 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]	
Sand A	1l/min	0,05631	1,0225	213	0,96619	0,020	50 cm	
Sand B	1l/min	0,06449	0,58182	198,5	0,51733	0,011	50 cm	

Produkt:		Wyoming Bentonit - 12 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]	
Sand A	1l/min	0,09283	1,99258	211,3	1,89975	0,039	50 cm	
Sand B	1l/min	0,11266	1,10586	203,6	0,9932	0,020	50 cm	
Sand C	1l/min	0,09319	0,83080	190,4	0,73761	0,015	50 cm	

Produkt:		Wyoming Bentonit - 14 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]	
Sand B	1l/min	0,08116	2,33207	237,7	2,25091	0,046	50 cm	
Sand C	1l/min	0,2806	1,79745	208,9	1,51685	0,031	50 cm	
Sand D	1l/min	0,26444	1,3904	198,3	1,12596	0,023	50 cm	

Abbildung 6.101: Injektionsergebnisse: Phrikolat - Wyoming Bentonit

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Konzentration:					
Wyoming Bentonit	8%	XXX	~			
	10%		X	~		
	12%		XX	X	X	
	14%			XX	XX	XX

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.102: Einsatzbereiche: Phrikolat - Wyoming Bentonit

### 6.4.9.2 Wplus 3,5 Prozent und 4 Prozent

Produkt:		W Plus - 3.5 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]	
Sand A	1l/min	0,11678	1,74923	206,7	1,63245	0,033	50 cm	
Sand B	1l/min	0,10614	0,7918	196,5	0,68566	0,014	50 cm	
Sand B	4 l/min	0,10726	1,04931	50,2	0,94205	0,019	50 cm	
Sand C	1l/min	0,10772	0,54497	195,7	0,43725	0,009	50 cm	

Datum:		01.12.2006						
Produkt:		W Plus - 4 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]	
Sand A	1l/min	0,16782	2,53136	204,7	2,36354	0,048	50 cm	
Sand B	1l/min	0,14601	1,00763	205,5	0,86162	0,018	50 cm	
Sand B	4 l/min	0,16756	1,18185	52,2	1,01429	0,021	50 cm	
Sand C	1l/min	0,1825	0,71659	202,6	0,53409	0,011	50 cm	

Abbildung 6.103: Injektionsergebnisse: Phrikolat - W plus

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
	Produkt:	Konzentration:				
<b>PHRIKOLAT</b>						
W Plus	3,5%		XX	X	~	
	4%		XX	X	~	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.104: Einsatzbereiche: Phrikolat - W plus

### 6.4.9.3 W 3 Prozent und 4 Prozent

Produkt:	W - 3 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,08423	1,63154	192,4	1,54731	0,032	50 cm
Sand A	1l/min	0,07331	0,72139	197,1	0,64808	0,013	50 cm

Produkt:	W - 4 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07902	1,49626	198,7	1,41724	0,029	50 cm

Abbildung 6.105: Injektionsergebnisse: Phrikolat - W

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
	Produkt:	Konzentration:				
<b>PHRIKOLAT</b>						
W	3%	XX	X			
	4%		XX			

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.106: Einsatzbereiche: Phrikolat - W

### 6.4.9.4 W 3 Prozent mit Modipol 600 0,075 Prozent und 0,15 Prozent

Produkt:	W - 3 % + Modipol 600 0,075 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,08272	2,0353	212	1,95258	0,040	50 cm
Sand A	1l/min	0,1401	0,71806	194,6	0,57796	0,012	50 cm

Produkt:	W - 3 % + Modipol 600 0,15 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,09626	2,86237	212,9	2,76611	0,056	50 cm
Sand A	1l/min	0,10778	1,00045	194,3	0,89267	0,018	50 cm

Abbildung 6.107: Injektionsergebnisse: Phrikolat - Modipol 600

<b>Injektionsversuche:</b>	<b>Boden:</b>	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
<b>Polymere</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Kombination + Konzentration:</b>				
<b>PHRIKOLAT</b>					
Modipol 600	W 3% + Modipol 600 0,075%	XX	~		
	W 3% + Modipol 600 0,15%	XX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.108: Einsatzbereiche: Phrikolat - Modipol 600

#### 6.4.9.5 W 3 Prozent mit Filter Control 0,2 Prozent und 0,4 Prozent

<b>Produkt:</b>	<b>W - 3 % + Filter Control 0,2 %</b>						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand 0	1l/min	0,07158	2,58800	210,4	2,51642	0,051	50 cm
Sand A	1l/min	0,06849	0,66656	205,9	0,59807	0,012	50 cm

<b>Produkt:</b>	<b>W - 3 % + Filter Control 0,4 %</b>						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand 0	1l/min	0,07719	3,28076	156,5	3,20357	0,103	32 cm
Sand A	1l/min	0,06891	1,13877	198,5	1,06986	0,022	50 cm

Abbildung 6.109: Injektionsergebnisse: Phrikolat - Filter Control

<b>Injektionsversuche:</b>	<b>Boden:</b>	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
<b>Polymere</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Kombination + Konzentration:</b>				
<b>PHRIKOLAT</b>					
Filter Control	W 3% + Filter Control 0,2%	XX	X		
	W 3% + Filter Control 0,4%	XXX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.110: Einsatzbereiche: Phrikolat - Filter Control

#### 6.4.9.6 W 3 Prozent mit Modiflux 230 0,5 Prozent

<b>Produkt:</b>	<b>W - 3 % + Modiflux 230 0,5 %</b>						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand 0	1l/min	0,08516	2,62865	193,8	2,54349	0,052	50 cm
Sand A	1l/min	0,12359	0,87401	198,7	0,75042	0,015	50 cm

Abbildung 6.111: Injektionsergebnisse: Phrikolat - Modiflux 230

<b>Injektionsversuche:</b>	<b>Boden:</b>	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
<b>Polymere</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Kombination + Konzentration:</b>				
<b>PHRIKOLAT</b>					
Modiflux 230	W 3% + Modiflux 230 0,5%	XX	X		
<b>Legende:</b> ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)					

Abbildung 6.112: Einsatzbereiche: Phrikolat - Modiflux 230

### 6.4.9.7 W 3 Prozent mit Modivis 800 0,2 Prozent

<b>Produkt:</b>	W -3 % + Modivis 800 0,2 %						
<b>Boden:</b>	<b>Durchfluss:</b>	<b>Druck Start [bar]</b>	<b>Druck Max [bar]</b>	<b>delta t [s]</b>	<b>Druckanstieg [bar]</b>	<b>Druckanstieg [bar/cm]</b>	<b>Eindringtiefe [cm]</b>
Sand 0	1l/min	0,13964	3,30165	142,9	3,16201	0,105	31 cm
Sand A	1l/min	0,13667	1,42842	199,4	1,29175	0,026	50 cm

Abbildung 6.113: Injektionsergebnisse: Phrikolat - Modivis 800

<b>Injektionsversuche:</b>	<b>Boden:</b>	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C
<b>Polymere</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
<b>Produkt:</b>	<b>Kombination + Konzentration:</b>				
<b>PHRIKOLAT</b>					
Modivis 800	W 3% + Modivis 800 0,2%	XXX	XX		
<b>Legende:</b> ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)					

Abbildung 6.114: Einsatzbereiche: Phrikolat - Modivis 800

## 6.4.10 Süd-Chemie Produkte

### 6.4.10.1 Bentonil XR 3 Prozent und 4 Prozent

Produkt:		Bentonil XR - 3 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,07288	3,2279	194,7	3,15502	0,073	44 cm
Sand A	1l/min	0,0891	0,61629	207,6	0,52719	0,011	50 cm

Produkt:		Bentonil XR - 4 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07678	1,08746	209,4	1,01068	0,021	50 cm
Sand B	1l/min	0,0761	0,69034	203,7	0,61424	0,013	50 cm
Sand B	4 l/min	0,15485	0,91439	53,6	0,75954	0,016	50 cm

Abbildung 6.115: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Bentonil XR

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Konzentration:					
<b>SÜD CHEMIE</b>						
Bentonil XR	3%	XXX	~			
	4%		XX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.116: Einsatzbereiche: Süd-Chemie - Bentonil XR

### 6.4.10.2 Bentonil CF 5 Prozent, 6 Prozent und 8 Prozent

Produkt:		Bentonil CF - 5 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,04606	3,22635	132,4	3,18029	0,138	24 cm
Sand A	1l/min	0,04759	0,48701	226,5	0,43942	0,009	50 cm

Produkt:		Bentonil CF - 6 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,06209	1,02282	229,4	0,96073	0,020	50 cm
Sand A	4l/min	0,16497	1,19749	50,2	1,03252	0,021	50 cm
Sand B	1l/min	0,11149	0,61859	203,9	0,5071	0,010	50 cm

Produkt:		Bentonil CF - 8 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,12717	2,23109	209,6	2,10392	0,043	50 cm
Sand B	1l/min	0,11289	1,36960	189,6	1,25671	0,026	50 cm
Sand C	1l/min	0,18286	0,77846	163,8	0,5956	0,012	50 cm

Abbildung 6.117: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Bentonil CF

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
<b>Bentonite</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
	<b>Produkt:</b>					
	<b>Konzentration:</b>					
<b>SÜD CHEMIE</b>						
	Bentonil CF	5%	XXX	~		
		6%		X	~	
		8%		XX	XX	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.118: Einsatzbereiche: Süd-Chemie - Bentonil CF

### 6.4.10.3 Tixoton C2 4 Prozent, 4,5 Prozent und 5 Prozent

Produkt:	Tixoton C2 - 4 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,07031	3,29478	192,5	3,22447	0,077	43 cm
Sand A	1l/min	0,07172	0,76081	199,8	0,68909	0,014	50 cm
Sand A	4l/min	0,12965	0,93722	56,2	0,80757	0,016	50 cm

Produkt:	Tixoton C2 - 4,5 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,1197	3,40268	132,1	3,28298	0,113	30 cm
Sand A	1l/min	0,10654	0,91976	204,6	0,81322	0,017	50 cm

Produkt:	Tixoton C2 5 %						
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,08539	1,1004	203,8	1,01501	0,021	50 cm
Sand B	1l/min	0,08000	0,72005	202,5	0,64005	0,013	50 cm
Sand B	4l/min	0,31864	1,06627	48,7	0,74763	0,015	50 cm

Abbildung 6.119: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Tixoton C2

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
<b>Bentonite</b>	<b>Korngrößen:</b>	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
	<b>Produkt:</b>					
	<b>Konzentration:</b>					
<b>SÜD CHEMIE</b>						
	Tixoton C2	4%	XXX	X		
		4,5%	XXX	X		
		5%		XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.120: Einsatzbereiche: Süd-Chemie - Tixoton C2

#### 6.4.10.4 Tixoton C7s 3,5 Prozent und 4 Prozent

Produkt: Tixoton C7S - 3,5 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,1278	3,67124	208,4	3,54344	0,081	45 cm
Sand A	1l/min	0,12928	0,91517	219,9	0,78589	0,016	50 cm
Sand A	4l/min	0,16537	1,08997	54,4	0,92460	0,019	50 cm

Produkt: Tixoton C7S - 4 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,06573	1,26114	218	1,19541	0,024	50 cm
Sand B	1l/min	0,09071	0,82921	204,2	0,73850	0,015	50 cm

Abbildung 6.121: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - Tixoton C7s

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Bentonite	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Konzentration:					
<b>SÜD CHEMIE</b>						
Tixoton C7S	3,5%	XXX	X			
	4%		XX	X		

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar, **X** Druckanstieg > 0,6 bar, **XX** Druckanstieg > 1 bar, **XXX** max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.122: Einsatzbereiche: Phrikolat - Tixoton C7s

#### 6.4.10.5 Bentonil XR 3 Prozent mit SC Mud 0,1 Prozent und 0,2 Prozent

Produkt: Bentonil XR - 3 % + SC Mud P 0,1 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,08165	2,27662	216,8	2,19497	0,045	50 cm
Sand B	1l/min	0,09659	0,98980	195,3	0,89321	0,018	50 cm
Sand C	1l/min	0,08336	0,48694	193,9	0,40358	0,008	50 cm

Produkt: Bentonil XR - 3 % + SC Mud P 0,2 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,13442	2,76103	226,4	2,62661	0,054	50 cm
Sand B	1l/min	0,10212	1,20219	196,1	1,10007	0,022	50 cm
Sand C	1l/min	0,10698	0,66395	195,5	0,55697	0,011	50 cm

Abbildung 6.123: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Mud mit Bentonil XR

### 6.4.10.6 Tixoton C2 4 Prozent mit SC Mud 0,1 Prozent und 0,2 Prozent

Produkt:		Tixoton C2 - 4 % + SC Mud P 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07106	2,14027	215,7	2,06921	0,042	50 cm
Sand B	1l/min	0,07311	0,84226	197,4	0,76915	0,016	50 cm

Produkt:		Tixoton C2 - 4 % + SC Mud P 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,07106	2,14027	215,7	2,06921	0,042	50 cm
Sand B	1l/min	0,07311	0,84226	197,4	0,76915	0,016	50 cm

Abbildung 6.124: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Mud mit Tixoton C2

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
<b>SÜD CHEMIE</b>						
SC Mud P	Bentonil XR 3% + SC Mud P 0,1 %		XX	X	~	
	Bentonil XR 3% + SC Mud P 0,2 %		XX	XX	~	
	Tixoton C2 4% + SC Mud P 0,1 %		XX	X		
	Tixoton C2 4% + SC Mud P 0,2 %			XXX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar, X Druckanstieg > 0,6 bar, XX Druckanstieg > 1 bar, XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.125: Einsatzbereiche: Süd-Chemie - SC Mud

### 6.4.10.7 Bentonil XR 3 Prozent mit SC Vis 0,1 Prozent und 0,2 Prozent

Produkt:		Bentonil XR - 3 % + SC Vis HVP 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand 0	1l/min	0,06982	3,29818	162	3,22836	0,087	38 cm
Sand A	1l/min	0,07474	0,7313	201,4	0,65656	0,013	50 cm
Sand A	4l/min	0,07113	1,23424	50,4	1,16311	0,024	50 cm

Produkt:		Bentonil XR - 3 % + SC Vis HVP 0,2 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,0697	1,02002	195,1	0,95032	0,019	50 cm
Sand B	1l/min	0,06987	0,52214	194,4	0,45227	0,009	50 cm

Abbildung 6.126: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Vis mit Bentonil XR

### 6.4.10.8 Tixoton C2 4 Prozent mit SC Vis 0,1 Prozent und 0,2 Prozent

Tixoton C2 - 4 % + SC Vis HVP 0,1 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	1l/min	0,20269	1,32869	195,8	1,126	0,023	50 cm
Sand C	1l/min	0,24085	0,94565	197,9	0,70480	0,014	50 cm
Tixoton C2 - 4 % + SC Vis HVP 0,1 %							
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand B	1l/min	0,20269	1,32869	195,8	1,126	0,023	50 cm
Sand C	1l/min	0,24085	0,94565	197,9	0,70480	0,014	50 cm

Abbildung 6.127: Injektionsergebnisse: Süd-Chemie - SC Vis mit Tixoton C2

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
<b>SÜD CHEMIE</b>						
SC VIS HVP	Bentonit XR 3% + SC VIS HVP 0,1 %	XXX	X / XX (bei 4 l/min)			
	Bentonit XR 3% + SC VIS HVP 0,2 %		X	~		
	Tixoton C2 4% + SC VIS HVP 0,1 %			XX	X	
	Tixoton C2 4% + SC VIS HVP 0,2 %			XX	X	~

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.128: Einsatzbereiche: Süd-Chemie - SC Vis

## 6.4.11 Wolf Cellulosics Produkte

### 6.4.11.1 B2 (Ibeco) 5 Prozent mit Antisol 30000 0,1 Prozent und 0,2 Prozent

Produkt:		B2 5 % + Antisol 30000 0,1 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,08333	1,37987	206,9	1,29654	0,026	50 cm
Sand B	1l/min	0,09388	0,92149	194,7	0,82761	0,017	50 cm

Produkt:		B2 5 % + Antisol 30000 0,2 %					
Boden:	Durchfluss:	Druck Start [bar]	Druck Max [bar]	delta t [s]	Druckanstieg [bar]	Druckanstieg [bar/cm]	Eindringtiefe [cm]
Sand A	1l/min	0,09861	2,47231	219,4	2,3737	0,048	50 cm
Sand B	1l/min	0,10417	1,48521	194,1	1,38104	0,028	50 cm
Sand C	1l/min	0,09306	1,02479	201,8	0,93173	0,019	50 cm

Abbildung 6.129: Injektionsergebnisse: Wolf Cellulosics - Antisol 30000

Injektionsversuche:	Boden:	Sand 0	Sand A	Sand B	Sand C	Sand D
Polymere	Korngrößen:	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm
Produkt:	Kombination + Konzentration:					
Wolf Cellulosics						
Antisol 30000	B2 5% + Antisol 30000 0,1%		XX	X		
	B2 5% + Antisol 30000 0,2%		XX	XX	X	

**Legende:** ~ Druckanstieg < 0,6 bar; X Druckanstieg > 0,6 bar; XX Druckanstieg > 1 bar; XXX max. Druck > 3 bar (Versuchsabbruch)

Abbildung 6.130: Einsatzbereiche: Wolf Cellulosics - Antisol 30000

# Kapitel 7

## Großformatige Versuche zur Simulation der Ringspaltstützung

Die Modellversuche zur Ringspaltstützung, durchgeführt im sogenannten Großversuchsstand, dienten der Nachweisführung, dass durch die Injektion einer an die bestehende Geologie angepassten Bentonitsuspension die Standfestigkeit des aufgefahrenen Hohlraums (Ringspalt) um das Vortriebsrohr erhöht werden kann.

Da die Vorbereitung, Durchführung und der Abbau der Großversuche sehr aufwendig waren, wurde sowohl bei den zu injizierenden Bentonitsuspensionen (vgl. Kapitel 4) als auch bei den Versuchsböden (vgl. Kapitel 6.1) eine Auswahl getroffen. Insgesamt wurden 3 Modellversuche mit jeweils unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt.

Einheitlich bei allen großformatigen Versuche war, dass im Zuge des simulierten Vortriebs ein geologischer Wechsel vom feinkörnigeren zum grobkörnigeren Boden durchfahren wurde.

- Im ersten Versuch (Kapitel 7.3.1) wurde eine reine, hoch konzentrierte Bentonitsuspension injiziert.
- Beim zweiten Versuch (Kapitel 7.3.2) kam eine polymermodifizierte, niedrig konzentrierte Bentonitsuspension zum Einsatz.
- Der dritte Versuch (Kapitel 7.3.3) diente dem Nachweis der Wirksamkeit von mechanischen Stopfmitteln. Hierbei wurde der niedrig konzentrierten Bentonitsuspension ein quellendes, chemisch nicht aktives Polymer zugegeben und injiziert.

Nachfolgend werden der Aufbau (Kapitel 7.1) und das Untersuchungsprogramm (Kapitel 7.2) vorgestellt. Ergänzend wird die bei den Modellversuchen eingesetzte Technik zur Ringspaltinjektion und Messwerterfassung erläutert. Darauf aufbauend werden die einzelnen Versuche ausführlich beschrieben und abschließend die Versuchsergebnisse diskutiert. Im Anhang F sind zusätzliche Ergebnisdarstellungen aufgelistet.

## 7.1 Aufbau des großformatigen Versuchsstands

Für die nachfolgend dargestellten Laborversuche wurde eigens ein Versuchsstand konzipiert und gebaut, mit dem das Verfahrensprinzip des Rohrvortriebs einschließlich Herstellung eines Ringspalts abgebildet werden kann. Der Versuchsstand bestand aus einem Stahlrahmen mit den Abmessungen 2 m Länge, 1,20 m Breite und 1,43 m Höhe und fasst ein Bodenvolumen von  $3,43 \text{ m}^3$ . Die seitlichen Begrenzungswände bestanden aus Holzbohlen. Die Begrenzung an den Stirnseiten erfolgte ebenfalls mit Bohlen sowie je einer Multiplexplatte mit einer zentrisch angeordneten kreisförmigen Aussparung. Diese diente als Ein- bzw. Austrittsöffnung, um ein Rohr mit entsprechendem Durchmesser, nachfolgend als Vortriebsrohr bezeichnet, durch den Versuchsstand ziehen zu können. In Abbildung 7.1 ist der Versuchsstand schematisch dargestellt.

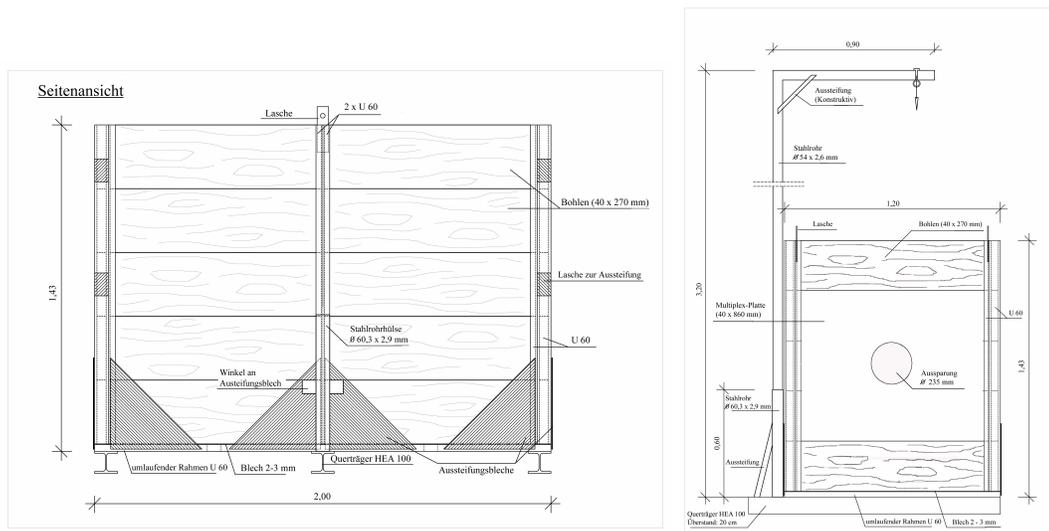


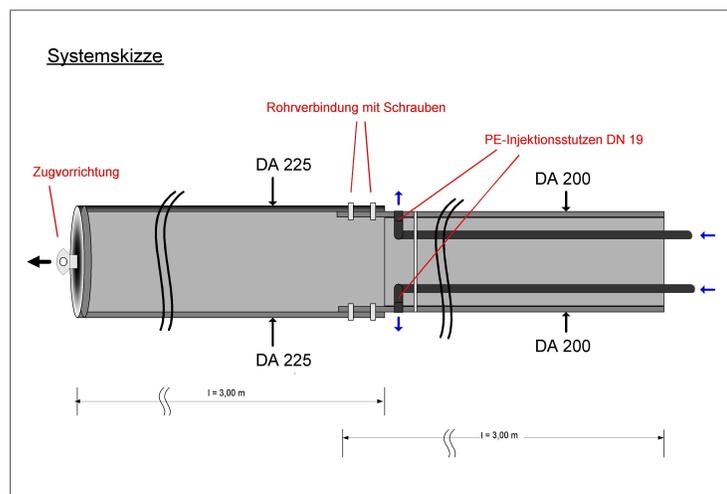
Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Versuchsstands

Die Abdichtung der Rohrein- und -austrittsöffnungen gegen das Auslaufen der injizierten Bentonitsuspension erfolgte durch eine einfache Lippendichtung aus Gummi. Diese wurde mit Hilfe einer weiteren Multiplexplatte (50 cm x 50 cm) mit Aussparung an den Stirnseiten montiert (Abbildung 7.2).

Das Vortriebsrohr setzte sich aus zwei einzelnen PE-HD-Rohren mit einer Länge von jeweils 3 m und unterschiedlichen Außendurchmessern zusammen (Abbildung 7.3). An der Stirnseite des großen Rohres (DA 225) war eine Zugvorrichtung angebracht; in dem kleinen Rohr (DA 200) befanden sich vier PE-Zuleitungsrohre (DN 19) mit gleichmäßig über den Querschnitt verteilten Austrittsöffnungen an der Rohroberfläche, direkt hinter dem Übergang vom großen zum kleinen Rohr. Die Zugverbindung der beiden Rohre wurde mit einer Schraubverbindung realisiert. Durch die unterschiedlichen Außendurchmesser der beiden Rohre entstand beim Ziehen des Vortriebsrohres durch den mit Boden befüllten Versuchsstand ein Ringspalt in der Größe der Differenz der beiden Rohraußendurchmesser. Die Höhe des Ringspalts betrug somit 12,5 mm.



**Abbildung 7.2:** Eingebautes Vortriebsrohr mit Lippendichtung an der Zugseite



**Abbildung 7.3:** Schematische Darstellung des Vortriebsrohres bestehend aus zwei 3 m langen PE-Rohren mit unterschiedlichen Durchmessern

Die Simulation des Rohrvortriebs, also das Ziehen des Vortriebsrohres durch den mit Boden befüllten Versuchsstand erfolgte mit Hilfe einer Seilwinde, die durch ein Stahlseil mit Karabinerhaken an der Zugvorrichtung des Vortriebsrohres befestigt wurde. Die Betätigung der Seilwinde erfolgte per Hand und erlaubte so eine individuelle und flexible Einstellung der Vortriebsgeschwindigkeit.

Während des Zugvorgangs (Vortriebs) wurde die Bentonitsuspension durch die Austrittsöffnungen der PE-Zuleitungsrohre in den entstehenden Ringspalt injiziert, um diesen offen zu halten und die Mantelreibung am Umfang des Vortriebsrohres herabzusetzen. Die Injektion der Bentonitsuspension erfolgte über eine Schlauchverbindung mit einer in der Baustellenpraxis üblichen Plungerpumpe DP 63 der Firma Obermann (Abbildung 7.4).





**Abbildung 7.6:** Einbau des nichtbindigen Lockergesteins mit geologischem Wechsel

Austrittsöffnungen für die Bentonitsuspension wurden so frei von Bodenkörnern gehalten. Als untere Abgrenzung wurde zunächst bei allen durchgeführten Versuchen unabhängig von der Korngröße des für den Versuch relevanten Bodens eine ca. 25 cm hohe Schicht mit einem Sand 0 der Körnung 0,2-2 mm eingebracht und mit einem leichten Verdichtungsgerät (25 kg) verdichtet (Abbildung 7.7).



**Abbildung 7.7:** Einsatz des leichten Verdichtungsgeräts beim Einbau des nichtbindigen Lockergesteins

Auf dieser ersten Abgrenzungsschicht aufbauend wurden parallel beide Hälften des Versuchsstands mit dem jeweiligen Boden schichtweise gefüllt. Nach Einbau einer Schichtdicke von ca. 15 cm erfolgte jeweils ein Verdichtungsverfahren mit dem leichten Verdichtungsgerät (Abbildung 7.7). Der Zwickelbereich des Rohres und andere mit dem Verdichter schlecht zu erreichende Stellen sowie der Bereich unmittelbar über dem Rohr werden von Hand verdichtet. In dieser Weise erfolgte der Bodeneinbau bis zu einer Höhe von 32 cm über Rohrscheitel. An dieser Stelle wurde ein weiteres PE-HD-Rohr (DN 200) in den Versuchsstand eingebaut, welches ausschließlich dem Zweck der Kalibrierung der Georadarsonden

im trockenen, noch nicht injizierten Boden dienté. Anschließend erfolgte der Einbau einer weiteren Schicht desselben Bodens mit einer Dicke von 15 cm, die das Rohr, nachfolgend als Kalibrierungsrohr bezeichnet, zu ca. 3/4 seiner Höhe umgab. Die Zwickelverdichtung erfolgte manuell.

## 7.2 Untersuchungsprogramm des großformatigen Versuchsstands

Nach einem ersten Testversuch zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Versuchsstandes und der Messtechnik, wurden drei Versuche durchgeführt, die sich durch die Art der injizierten Suspension unterschieden. Die Korngröße des eingebauten Bodens wurde entsprechend der Einsatzgrenzen des jeweiligen Injektionsmittels gewählt, die sich aus der Bestimmung der Suspensionseigenschaften und der zuvor durchgeführten kleinformatigen Versuche zur Ermittlung des Eindringverhaltens ergab. Die Durchflussgeschwindigkeit des Injektionsmediums und die Zugeschwindigkeit des Vortriebsrohres wurden in Bezug auf das Verhältnis von Suspensionseigenschaften und Korngröße einzeln variiert. Abbildung 7.8 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm.

	Injektionsmittel	Boden 1	Boden 2
<b>Testversuch</b>	B1 6%	Sand B (2 - 4 mm)	-
<b>Versuch 1</b>	B2 (neu) 14%	Sand B (2 - 4 mm)	Sand C (4 - 8 mm)
<b>Versuch 2</b>	B2 (neu) 7% + Xanthan Gum 0,5%	Sand B (2 - 4 mm)	Sand C (4 - 8 mm)
<b>Versuch 3</b>	B2 (neu) 7% + Diamond Seal 1,2%	Sand C (4 - 8 mm)	Sand D (8 - 16 mm)

Abbildung 7.8: Versuchsprogramm

Die Auswertung jedes einzelnen Versuchs umfasste folgende Untersuchungspunkte:

- Bestimmung der Eigenschaften des Injektionsmittels
- Überprüfung des Verdichtungsgrads des Bodens
- Aufzeichnung des Drucks und der Durchflussgeschwindigkeit des Injektionsmittels über die gesamte Vortriebsstrecke
- Aufzeichnung des Vortriebswegs
- Aufzeichnung der Zugkraft
- Setzungsmessung (optisch)
- Erfassung der Eindringtiefe des Injektionsmittels (optisch)
- Erfassung der Eindringtiefe des Injektionsmittels (Georadar)

### 7.2.1 Bestimmung der Suspensionseigenschaften

Vor jedem Versuch wurden die rheologischen Eigenschaften des eingesetzten Injektionsmittels untersucht und mit Hilfe des **Rotationsviskosimeters** die Bingham-Fließgrenze  $\tau_B$ , die plastische und die scheinbare Viskosität, mittels **Kugelharfe** die Fließgrenze  $\tau_F$  nach [DIN 4126-100 1996] sowie die Dichte der Suspension mit dem **Dichteglas** ermittelt.

Dazu ist anzumerken, dass im Rahmen der Großversuche eine Basis-Bentonitsuspension bestehend aus B2(neu) eingesetzt wurde. Für die Versuchsdurchführung wurde eine neue Charge des Ibeco Bentonits B2 geliefert. Bei der Überprüfung der Suspensionseigenschaften fiel auf, dass die Werte des neugelieferten Bentonits B2(neu) nur bei Erhöhung der verwendeten Konzentration in der Suspension erreicht werden konnten. Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Versuchsbeschreibungen eine Bentonitsuspension bestehend aus B2(neu) verwendet.

### 7.2.2 Bodeneigenschaften

Die bodenmechanischen Eigenschaften und Kenngrößen der eingesetzten Böden wie die Korngrößenverteilung nach [DIN 18123 1996], die Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung gemäß [DIN 18126 1996] sowie die Durchlässigkeit nach [DIN 18130 1989] wurden vom Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt (vgl. Kapitel 6.1).

Nach dem Einbau der Böden in den Versuchsstand wurden zur Überprüfung einer einheitlichen und gleichmäßigen Verdichtung Rammsondierungen durchgeführt. Bei Rammsondierungen wird der dynamische Widerstand des Baugrundes gegen das Eindringen einer Sonde mit kegelförmiger Spitze gemessen [Rizkallah 1995]. Dabei wird die Anzahl der Schläge gezählt, die erforderlich sind, das Sondierungsgestänge in weitere 10 cm Bodentiefe einzutreiben (Schlagzahlen N<sub>10</sub>). Eine Zunahme der Bodenverdichtung äußert sich durch eine Zunahme der Schlagzahlen N<sub>10</sub> (Abbildung 7.9).

Bezeichnung	bei $U \leq 3$ D (-)	Verdichtungsgrad $D_{pr}$	Spitzenwiderstand Drucksonde $q_s$ (MN/m <sup>2</sup> )	Rammsondierungen Schlagzahl	
				DPH N <sub>10</sub>	DPL-5 N <sub>10</sub>
sehr locker	< 0,15		< 2,0	0 - 1	0 - 3
locker	0,15 - 0,30		2,0 - 5,0	1 - 4	3 - 7
mitteldicht	0,30 - 0,50	≥ 95 %	5,0 - 12,0	4 - 13	7 - 20
dicht	0,50 - 0,75	≥ 98 %	12,0 - 20,0	13 - 24	> 20
sehr dicht	0,75 - 1				

**Abbildung 7.9:** Bezeichnungen der Lagerungsdichte, Zuordnung zu Versuchsergebnissen bei gleichförmigen, nichtbindigen Böden über Grundwasser [Rizkallah 1995]

### 7.2.3 Aufzeichnung von Injektionsdruck und -menge

Zur Steuerung und Aufzeichnung des Injektionsvorganges der Bentonitsuspension wurde eine stand-alone Version des SDV13 eingesetzt. Das SDV13 der Firma CENTERLINE GmbH, Wesel, ist ein System zur Datenerfassung und Vortriebssteuerung und Standard

bei der Durchführung von Rohrvortrieben. In der stand-alone Version wird es nur zur Steuerung der automatischen Bentonitschmierung mit anschließender Datenaufzeichnung eingesetzt. Dieses erfolgt mittels eigenem Steuer-PC und dazugehöriger Software (Abbildung 7.10).



**Abbildung 7.10:** Steuer PC der Fa. Centerline GmbH, Wesel

Zentrales Element der automatisierten Schmierung stellt die Bentonitsteuereinheit (BSU) dar (Abbildung 7.11). Sie ist die Verbindungsstelle zwischen den daran angeschlossenen Bentonitventilen in der Schmierstation und den von dem Steuer-PC gesendeten Steuerungssignalen auf der anderen Seite. Das Bentonitventil wird über die BSU elektronisch angesteuert und mittels pneumatischem Steuerdruck geöffnet und geschlossen.



**Abbildung 7.11:** BSU, MSU, BCU und Durchflussmesser der Fa. Centerline GmbH, Wesel

Die Menge der Bentonitsuspension bestimmt die sogenannte BCU mit Hilfe eines magnetisch induktiven Durchflussmessers (Abbildung 7.11). Eine BCU wird zweckmäßig hinter der Bentonitpumpe installiert. Bei einer Nennweite der Schlauchleitung von 25 mm liegt der messbare Bereich bei 0 - 21 m<sup>3</sup>/h. Diese Werte werden vom System SDV13 erfasst und gespeichert. Am Durchflussmesser kann die aktuelle Durchflussmenge abgelesen werden.

Die Mess- und Steuereinheit (MSU) nimmt über die angeschlossenen Sensoren die Weg- und Druckmessung auf. So können zum einen der Weg des Laufrads und die jeweiligen

Drücke in der Bentonitleitung erfasst werden. Eine MSU kann mit maximal vier Mess-Signalen ausgestattet werden und ist darauf ausgelegt, dass sie die analogen Weg- und Druckmessungen in digitale Form umwandelt und so über ein CAN-BUS Datenkabel an den Steuer-PC weiterleitet (Abbildung 7.11).

Mit einem an der Stirnseitenbegrenzung angebrachten Laufrad wurde der zurückgelegte Weg des Vortriebsrohres durch den Versuchsstand aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Daten ist eine Zuordnung der aufgezeichneten Werte aus der Druck- und der Durchflussmessung nicht nur anhand des zeitlichen Verlaufs, sondern auch über die zurückgelegte Strecke möglich (Abbildung 7.12).



**Abbildung 7.12:** Laufrad der Fa. Centerline GmbH, Wesel, zur Erfassung des Vortriebswegs

#### 7.2.4 Aufzeichnung des Zugkraftverlaufs

Während des Versuches wurde die aufgebrauchte Kraft, die benötigt wird, um das Vortriebsrohr durch den mit Boden befüllten Versuchsstand zu ziehen, kontinuierlich mit Hilfe einer Kraftmessdose aufgezeichnet. Die Kraftmessdose wurde zwischen der Zugvorrichtung des Rohres und dem Karabinerhaken der Stahlseilwinde angebracht (Abbildung 7.13). Die gemessenen Werte wurden von hier aus an einen PC weitergeleitet und dort mit dem Softwareprogramm Labview aufgezeichnet.



**Abbildung 7.13:** Kraftmessdose zur Erfassung der Zugkraft

Als Referenzmessung wurde das Vortriebsrohr einmal ohne Bentonitschmierung durch den vollständig mit Boden (Sand B und Sand C) befüllten Versuchsstand gezogen, um

die Reibungswiderstände zwischen Rohr und Boden experimentell zu erfassen, um so später die Wirkung einer Bentonitschmierung auf die Zugkräfte aufzeigen zu können. Der Kraftverlauf dieser Referenzmessung ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

Für das erste Einziehen des Vortriebsrohres in den Boden wurde eine Kraft von 8705 N aufgebracht. Während des weiteren Vortriebs wurde ein Maximalwert von 9486 N erreicht bevor die Zugkraft kontinuierlich abnahm. Die minimale Zugkraft lag bei 4866 N. Zum Ende des Versuchs kam es noch einmal zu einer Zugkraftherhöhung bei der der gemessene Wert aus einem nicht bekannten Grund wieder auf ungefähr 8215 N anstieg.

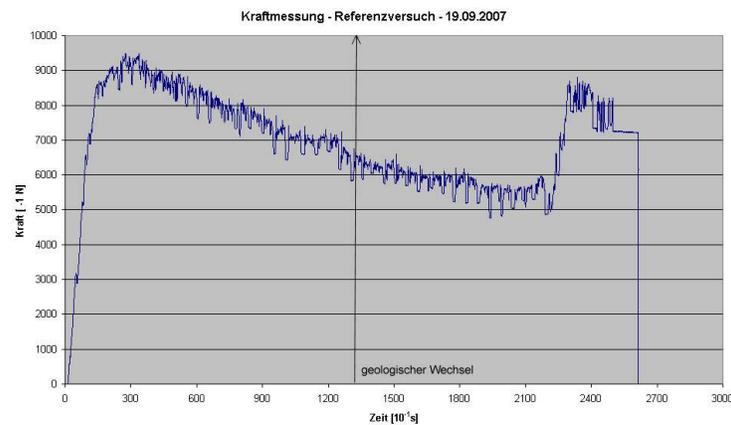


Abbildung 7.14: Referenzmessung des Zugkraftverlaufs

### 7.2.5 Setzungsmessung - optisch

Vor Versuchsbeginn wurde die Oberfläche des eingebauten Bodens mit einem Brett und Zuhilfenahme einer Wasserwaage eben abgezogen und die Höhe der Überschüttung durch Anzeichnen einer Geländelinie markiert (Abbildung 7.15). Auf diese Weise konnten versuchsbedingte Setzungen aufgrund eines zusammengebrochenen Ringraumes oder Hebungen durch zu hohe Injektionsdrücke optisch erfasst werden.



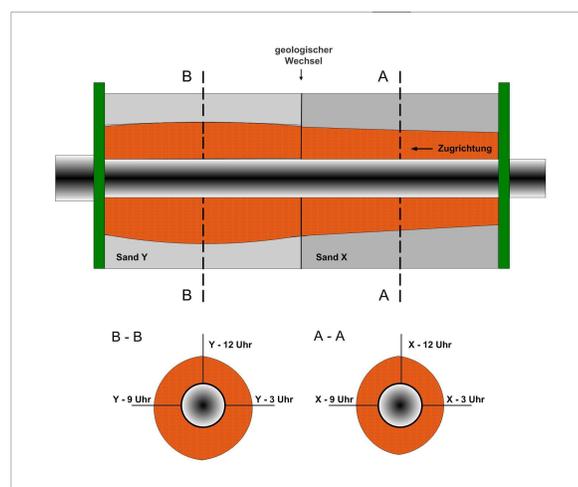
Abbildung 7.15: Abziehen der Überschüttung mit einem Brett und Anzeichnen der Geländelinie

## 7.2.6 Erfassung der Eindringtiefe - optisch

Nach dem Versuche und Abschluss der Messungen mit dem Georadar (Kapitel 7.2.7.1) wurde der Boden schichtweise von oben nach unten wieder ausgebaut und die Ausbreitung der Bentonit suspension um das Vortriebsrohr mittels Zollstock erfasst und anhand von Fotos dokumentiert. Die Bestimmung der Schichtdicke des um den Rohrstrang standfesten Bodens erfolgte jeweils in der Mitte einer Versuchstandshälfte an je drei markanten Punkten: 12 Uhr, 3 Uhr und 9 Uhr. Die Schichtdicke unterhalb des Sohlbereichs (6 Uhr) konnte auf diese Weise nicht ermittelt werden, da das Gemisch aus Boden und Bentonit hier direkt nach dem Ausbau zusammenbrach. Die Bezeichnungen der einzelnen Messpunkte sind in Abbildung 7.16 dargestellt.

Die mittels Zollstock gemessene Schichtdicke beinhaltet zwei Bereiche. Zum einen wurde die Höhe des standfesten Hohlraumes (Ringspalt) um das Vortriebsrohr und zum anderen die Höhe des von der Bentonit suspension durchtränkten nichtbindigen Lockergesteins erfasst, welches als *standfester Zylinder* den Rohrstrang umschloß. Die Messungen mittels Zollstock waren zur Verifizierung der mit dem Georadar gewonnenen Ergebnisse gedacht (Kapitel 7.2.7.1), da die optische Erfassung der Messwerte mit Zollstock erst ca. 3 Stunden nach Versuchsende erfolgen konnte und die Ergebnisparameter sich in dieser Zeit noch veränderten.

Zur besseren optischen Erfassung der Schichtdicke wurde das injizierte Injektionsmittel bei den Versuchen 2 und 3 mit Eisenoxid rot eingefärbt. Die Farbpigmente des Eisenoxids legen sich ausschließlich an die Bentonitpartikel, nicht aber an das Wasser in der Suspension an, so dass sich eine mögliche Trennung dieser Stoffe durch Filtration gut beobachten lässt. Die Zugabe von Eisenoxid verändert lediglich die Färbung der Bentonit suspension und hat keinen Einfluss auf dessen rheologische Eigenschaften.



**Abbildung 7.16:** Messpunkte zur Ermittlung der gesamten Schichtdicke (Eindringtiefe) bestehend aus standfestem Ringspalt und umhüllendem standfestem Lockergestein

## 7.2.7 Erfassung der Eindringtiefe - Georadar-Verfahren

Im Zuge der Versuchsplanung bestand die Aufgabe, die Injektionsergebnisse direkt nach Versuchsende und zerstörungsfrei zu erfassen und zu dokumentieren. Eine weitere Anforderung umfasste die Unterscheidung der verschiedenen, sich im Lockergestein einstellenden Injektionszonen. Diese Anforderungen konnte die optische Erfassung der Eindringtiefe nicht erfüllen.

Nach intensiver Recherche und zahlreichen fachlichen Diskussionen mit den Entwicklern und dem Hersteller fiel die Entscheidung, den in der Kanalinspektion arbeitenden Georadar im Rahmen der Großversuche einzusetzen. Um das geophysikalische Messsystem zur Erfassung der Eindringtiefe von Bentonitsuspensionen in nichtbindige Lockergesteine verwenden zu können, mussten vom Hersteller Modifikationen vorgenommen werden.

Die mittels Georadar erfassten Messwerte und die daraus generierten Messergebnisse erfüllten alle eingangs formulierten Anforderungen in hervorragender Qualität. Nachfolgend wird das System des Geo- bzw. Kanalradars vorgestellt.

### 7.2.7.1 Messprinzip

Die Arbeitsweise des Georadars beruht auf Grundlage der elektromagnetischen Wellentheorie und geometrischen Optik. Zum besseren Verständnis sollen kurz die zwei Hauptgebiete beschrieben werden, die im direkten Zusammenhang mit Impuls-Radar-Messungen stehen.

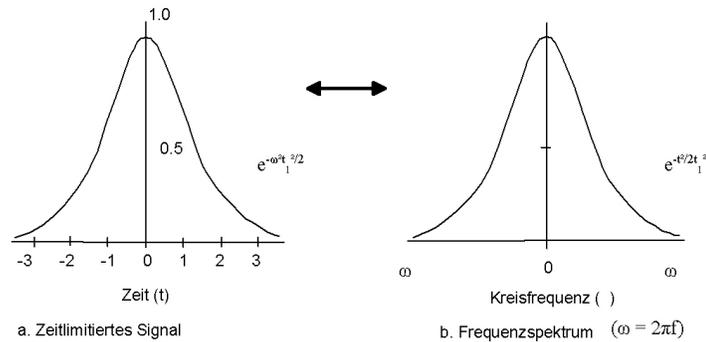
#### Die elektromagnetische Wellentheorie:

Eine elektromagnetische Welle setzt sich zusammen aus dem elektrischen Feld  $E$  und dem magnetischen Feld  $H$ . Die Maxwell'schen Feldgleichungen beschreiben den Zusammenhang zwischen den elektrischen und magnetischen Feldvektoren und ihre gegenseitige Beeinflussung in Bezug auf Zeit und Raum.

#### Die geometrische Optik (Snellius):

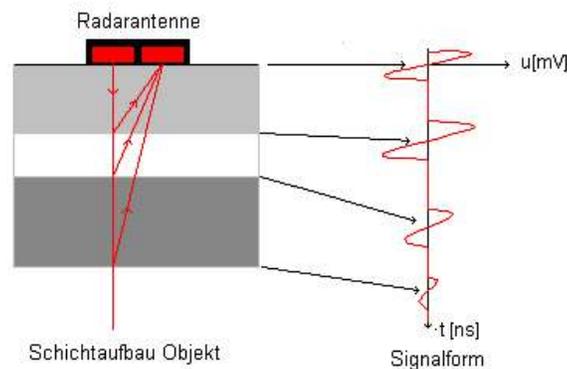
Die geometrische Optik ist grundsätzlich dann anzuwenden, wenn die Wellenlänge beträchtlich kleiner ist als das Objekt mit dem die Welle in Berührung kommt und wenn das Material als Isolator angesehen werden kann. Das für den Einsatz innerhalb der Kanalisation verwendete Georadar ist ein Impuls-Radar, also ein Breitbandradar. Das heißt, die Energie wird über ein Frequenzband ausgesendet. Das Georadar emittiert einen Puls in Form einer nahezu Gauss'schen Verteilung (siehe Abbildung 7.17). Die Bandbreite des abgestrahlten elektromagnetischen Signals beträgt ca. 1 GHz bis 2.5 GHz.

Das zu den Messungen verwendete Georadar-System sendet repetitiv einen kurzzeitlichen elektromagnetischen Impuls von einer Breitband-Antenne, die auf das zu untersuchende Objekt gerichtet ist, aus. Das System arbeitet gleich einem *Echo-sounding-System*, benutzt allerdings elektromagnetische Pulse von nur einigen Nanosekunden Länge und ist in der Lage reflektierende Diskontinuitäten zu entdecken und ihre Tiefenlage zu messen (Abbildung 7.18). Die verwendete Radarantenne ist ein Transceiver, d.h. der Response der



**Abbildung 7.17:** Frequenzspektrum eines zeitlimitierten Signals

abgestrahlten Signale wird durch dieselbe Antenne wieder aufgefangen und via entsprechende Kontroll- und Aufzeichnungseinheiten aufgezeichnet und zur weiteren Bearbeitung auf Magnetband gespeichert.

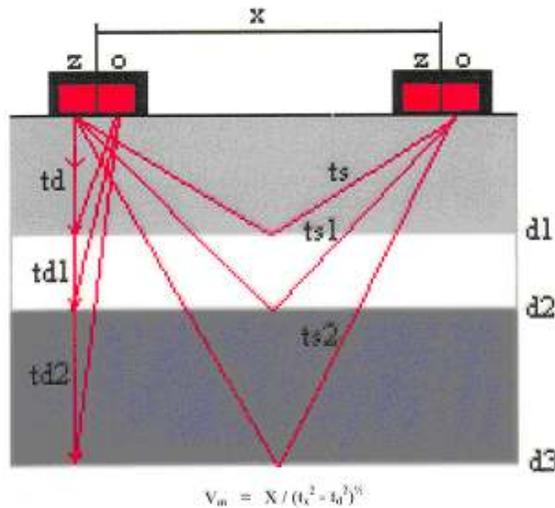


**Abbildung 7.18:** Darstellung des Messprinzips des Georadars

Um ein Continu-Bild vom Inneren des zu untersuchenden Objekts zu erhalten, wird die Antenne über dieses hinweggeführt. Durch das Wechselspiel zwischen Senden und Empfangen erhält man ein vertikales Schnittbild der Substrata. Das Signal durchläuft hierbei unterschiedliche Medien, so dass ein Teil der Energie an jedem Materialübergang reflektiert und von der Antenne empfangen wird, der Rest penetriert weiter. Es ist dieser reflektierte Impuls, den das Geo-/Kanalradar detektiert, aufnimmt und analysiert (Abbildung 7.19).

Physische und chemische Eigenschaften der Medien beeinflussen die dielektrische Konstante und Konduktivität, die wiederum das Signal resp. die Signalform und Ausbreitung beeinflussen. Jedes Medium besitzt eigene Charakteristika und entsprechende Konstanten.

- Die dielektrische Konstante bestimmt die Geschwindigkeit, mit der eine elektromagnetische Welle ein Medium durchläuft.
- Die Konduktivität eines Mediums verursacht Wärmeverluste der Pulsenergie und



**Abbildung 7.19:** Messprinzip des Georadares mit zwei Antennen-Konfiguration

bestimmt die Dämpfung oder den Energieverlust, wenn ein elektromagnetisches Signal ein Medium durchläuft.

Beide Parameter hängen von der Dichte und dem Feuchtigkeitsgehalt des penetrierten Mediums ab.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle in einem Medium bestimmt sich über:

$$V_M = X / (t_s^2 - t_d^2)^{1/2} \quad (7.1)$$

mit

$X$  = horizontaler Abstand zwischen Sender/Empfänger-Antenne und Empfänger-Antenne

$t_d$  = Ankunftszeit einer Reflektion von einer Diskontinuität bei Antennenabstand  $X$

$t_s$  = direkte Laufzeit nach und von einer reflektierenden Diskontinuität.

Hieraus errechnet sich die dielektrische Konstante

$$\varepsilon_r = (c/V_M)^2 \quad (7.2)$$

wobei

$c$  = die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im Vakuum ist, die Rohrwanddicke  $D$  wird gegeben durch

$$D = V_M / 2t \quad (7.3)$$

wobei  $2t$  die Zeit zwischen gesendetem und empfangenem Signal einer Trennfläche darstellt (gemeint ist der Hin- und Rückweg des Signals, daher Faktor 2).

Das Prinzip, Materialuntersuchungen mittels Geo-Radar durchzuführen, beruht auf zeitlichen Verzögerungen von Reflektionen einer elektromagnetischen Welle in einem Medium. Diese Zeitverzögerungen liegen in einer Größenordnung von einigen Nanosekunden

( $10^{-9}s = 1ns$ ), so dass hohe Anforderungen an die Messapparatur gestellt werden. Die Beziehung von Materialeigenschaften und der Fortpflanzung einer elektromagnetischen Welle durch das zu untersuchende Medium wird durch die sog. dielektrische Konstante beschrieben. Physische und chemische Eigenschaften eines Mediums beeinflussen die dielektrische Konstante und Konduktivität.

### 7.2.7.2 Durchführung der Messungen

Zur Ausführung der Messungen wurden Georadar-Systeme der Firmen **MALÅ** und **Rad-sys** verwendet. Diese Systeme bestehen aus einer Basiseinheit und einer Antennenkonfiguration in Abhängigkeit des Messziels. Entsprechend der Aufgabenstellung wurde für sämtliche Versuchsreihen aus der DN 200 PE-Leitung heraus gemessen. Kalibriermessungen erfolgten vor Aufnahme der Arbeiten zur Durchführung der Ringspaltinjektion aus einer im Abstand von 0,32 m (Sohle Kalibrierrohr — Scheitel Vortriebsrohr) oberhalb der Vortriebsleitung eingebrachten DN 200 Leitung aus identischem Material in der Sohle auf 6 Uhr.

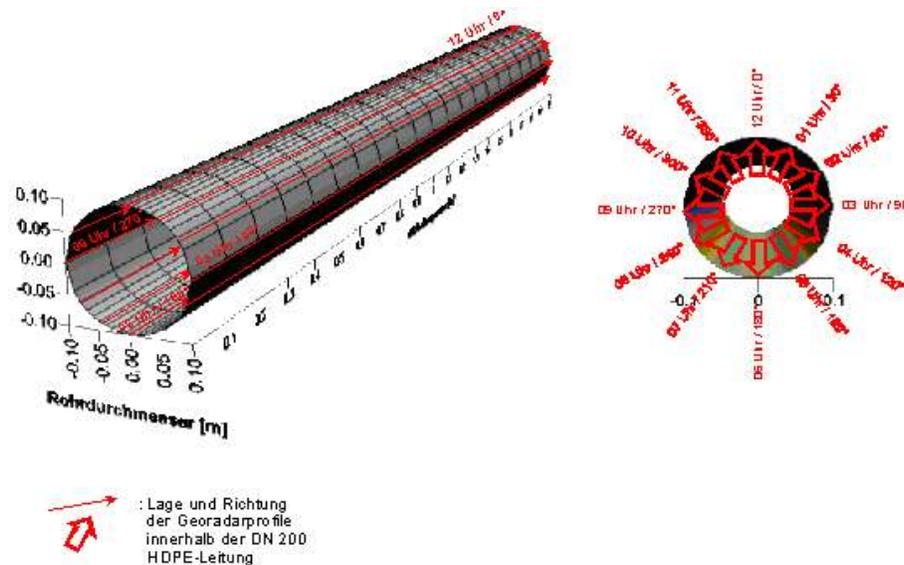
Sämtliche elektromagnetischen Vermessungsarbeiten wurden unmittelbar nach Versuchsende durchgeführt. Die Antenne wurde hierbei mittels eines an das Antennengehäuse gekoppelten Kunststoffrohres in der PE-Vortriebsleitung direkt an der Innenwandung geführt (Abbildung 7.20).



**Abbildung 7.20:** Georadar-Antenne mit montiertem Kunststoffrohr zum Führen der Antenne innerhalb des Vortriebsrohres

Innerhalb der PE-Leitung DN 200 wurde mit einer 1,2 GHz-Antenne gemessen. Die maximale Erkundungstiefe betrug in diesem Anwendungsfall, ausgehend von einer dielektrischen Verteilung im Bereich von  $\epsilon = 9 - 11$ , ca. 0,5 m (Innenwandung Vortriebsrohr bis experimentelle Leitungszone entsprechend der räumlichen Verfüllung innerhalb der Versuchsanordnung). Die vermessenen Georadar-Profile verliefen im Scheitel, Sohle, Kämpfer- und Zwickelbereich der Leitung. Sämtliche Daten wurden nach Messung der

jeweiligen Handlungsabschnitte vor Ort in Hinblick auf Informationsgehalt und Interpretationswürdigkeit in Form einer vorläufigen Datensichtung bearbeitet. Die kontinuierliche Informationsdichte innerhalb der Einzelprofile betrug 0,01 m, d. h. alle 0,01 m erfolgte eine Einzelmessung (Radarscan), was einem Messspurabstand von 0,01 m entsprach (Abbildung 7.21).



**Abbildung 7.21:** Lage und Verlauf der Georadarprofile auf 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr, ... und 12 Uhr, innerhalb des Vortriebsrohres DN 200

Die Zuordnung der GPR-Längsprofile erfolgte entsprechend Lage und Verlauf innerhalb der Leitung im Uhrzeigersinn:

GPR-Profil 12 Uhr ( $0^\circ$ )

GPR-Profil 01 Uhr ( $30^\circ$ )

GPR-Profil 02 Uhr ( $60^\circ$ )

GPR-Profil 03 Uhr ( $90^\circ$ )

GPR-Profil 04 Uhr ( $120^\circ$ )

GPR-Profil 05 Uhr ( $150^\circ$ )

GPR-Profil 06 Uhr ( $180^\circ$ )

GPR-Profil 07 Uhr ( $210^\circ$ )

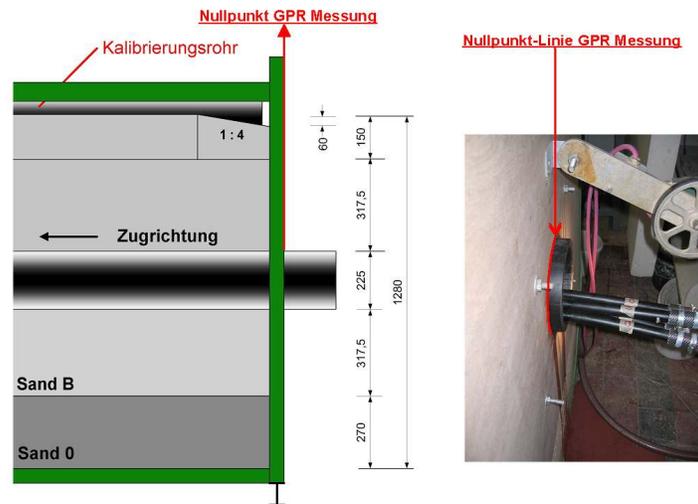
GPR-Profil 08 Uhr ( $240^\circ$ )

GPR-Profil 09 Uhr ( $270^\circ$ )

GPR-Profil 10 Uhr (300°)

GPR-Profil 11 Uhr (330°)

Nullpunkt sämtlicher Georadarprofile war die hölzerne Außenkante des Versuchstands (Abbildung 7.22).



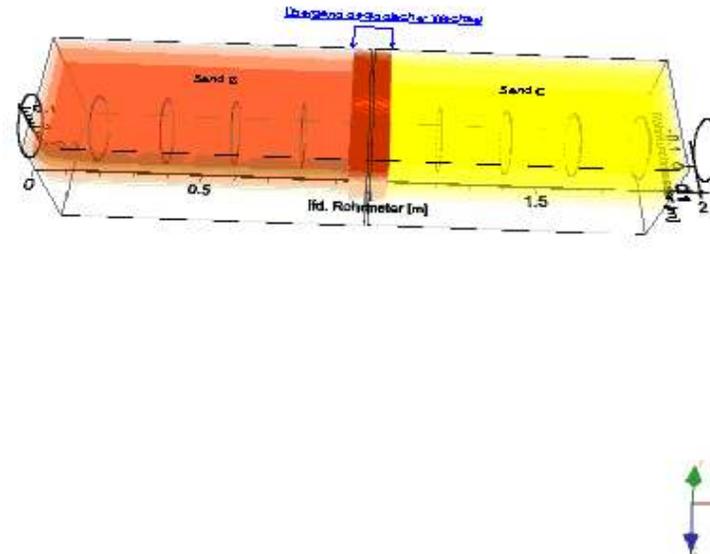
**Abbildung 7.22:** Lage des Nullpunktes der Georadarprofile innerhalb des Längsschnittes und der Vorderseite des Versuchstands

Beim Durchfahren der Antenne im definierten geologischen Wechsel erschien der Übergang von z.B. Sand B zu Sand C nicht als eindeutig definierte Zone konstanter Koordinaten. Es zeigte sich innerhalb sämtlicher Versuchsreihen ein Übergang in Form einer *Mischzone* im Schwankungsbereich 0,95 m bis 1,05 m bezogen auf die Längsachse des Versuchstands (Abbildung 7.23).

### 7.2.7.3 Messergebnisse

Im Rahmen elektromagnetischer Vermessungen werden grundsätzlich physikalische Phänomene erfasst, die in der Regel einer Verifizierung bedürfen. Das heißt, dass sämtliche verfügbare Information über infolge injizierter Bentonitsuspension ausgebildeter Phasenverläufe i. A. eine gesicherte Zuordnung der Georadardaten ermöglicht. Aussagen hinsichtlich der Lagerungsverhältnisse und Verdichtung leiten sich ab aus dem Dämpfungsverhalten der elektromagnetischen Welle in Verbindung mit Amplituden- und Phasenvergleich sowie anstehender dielektrischer Kontraste gemäß ihrem elektromagnetischen Erscheinungsbild.

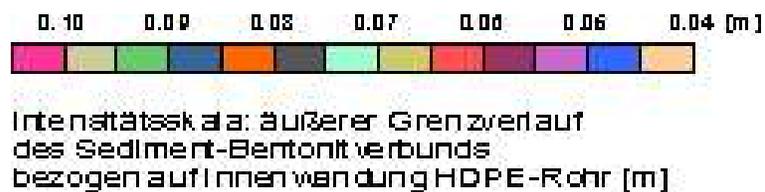
Die Tiefenlage innerhalb der Leitungszone ermittelter unterschiedlicher Phasenverläufe erfolgte auf Grundlage einer dielektrischen Verteilung von  $e = 9 - 11$ . Erfasst und dargestellt wurden drei erkennbare Phasenverläufe unterschiedlich ausgeprägter Intensität. Die Ergebnisse wurden sowohl als Diagramm in Form von Profilschnitten der Einzelprofile als



**Abbildung 7.23:** Lage des definierten geologischen Wechsels innerhalb des Versuchsstandes

auch in Form einer perspektivisch, räumlichen Verteilung georteter Phasen erstellt (siehe Anhang F).

Zusätzlich wurde zur Veranschaulichung der Messergebnisse die PE-Leitung in der Sohle zeichnerisch geschnitten, entfaltet und ein 360°-Gesamtbild des erfassten Verdichtungsgrades triangulär interpoliert und spektralanalytisch zugeordnet. Die nachfolgend aufgeführte Farbskala kennzeichnet den Verlauf erkennbarer Einzelphasen in Abhängigkeit ihrer Tiefenlage bezogen auf die Innenwand der DN 200 PE-Vortriebsleitung (Abbildung 7.24).



**Abbildung 7.24:** Spektralanalytische Zuordnung der Tiefenlage erfasster Phasenverläufe innerhalb der Leitungszone

## 7.3 Ergebnisse der großformatigen Modellversuche

### 7.3.1 Großversuch 1

Bei dem Versuch 1 wurde als Injektionsmedium die reine Bentonitsuspension B2 (neu) in einer Konzentration von 14 % untersucht. Entsprechend der Einsatzgrenzen der Suspension wurde die erste Hälfte des Versuchsstandes, in Zugrichtung gesehen, mit dem Sand B (2-4 mm) und die zweite Hälfte mit dem Sand C (4-8 mm) befüllt (Abbildung 7.25).

Die Durchflussgeschwindigkeit der Injektionspumpe wurde, solange der feinkörnigere Sand B durchfahren wurde, mit 19,5 l/min eingestellt, nach Erreichen des geologischen Wechsels lief die Pumpe mit einer Durchflussgeschwindigkeit von 23 l/min bis zum Ende weiter. Die Vortriebsgeschwindigkeit wurde während des gesamten Versuches konstant bei 50 cm/min gehalten.

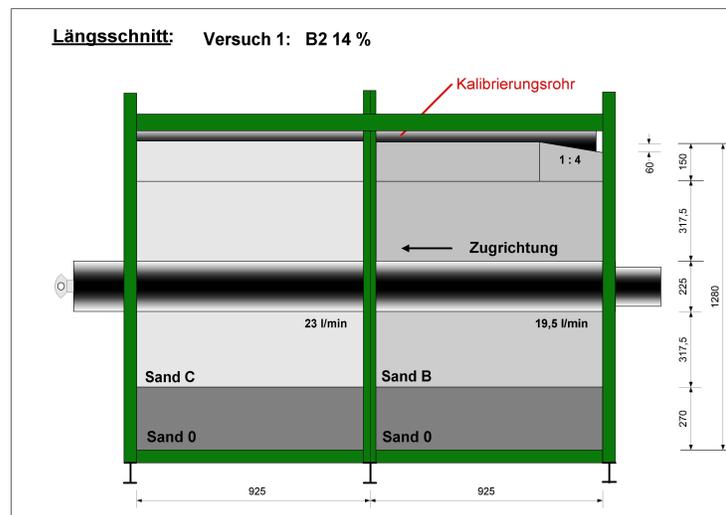


Abbildung 7.25: Großversuch 1: Versuchsaufbau

#### 7.3.1.1 Suspensionseigenschaften

Das Injektionsmittel für den Versuch 1 war eine reine Bentonitsuspension, hergestellt mit dem Bentonit B2 (neu) in einer Konzentration von 14 %. Das Anmischen erfolgte 48 Stunden vor dem Versuch, um ein vollständiges Ausquellen der Bentonitpartikel sicherzustellen. Die ermittelten rheologischen Eigenschaften sind in Abbildung 7.26 aufgeführt.

#### 7.3.1.2 Bodeneigenschaften

Abbildung 7.27 zeigt die Ergebnisse der Rammsondierung in Sand B und Sand C.

<b>B2 (neu)</b>		
<b>Datum:</b> 15.06.2007	<b>Bentonit:</b>	
	<b>Konzentration:</b>	14%
<b>Dichte</b>		
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,076
<b>Fließgrenze</b>		
Fließgrenze $t_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharfe	68,31 - 76,64
Bingham-Fließgrenze $t_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	24,429
<b>Gelstärke</b>		
Gelstärke $t_{70}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	27,303
Gelstärke $t_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	45,984
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	18,681
<b>Viskosität</b>		
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	34,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9

Abbildung 7.26: Großversuch 1: Suspensionseigenschaften B2 (neu)

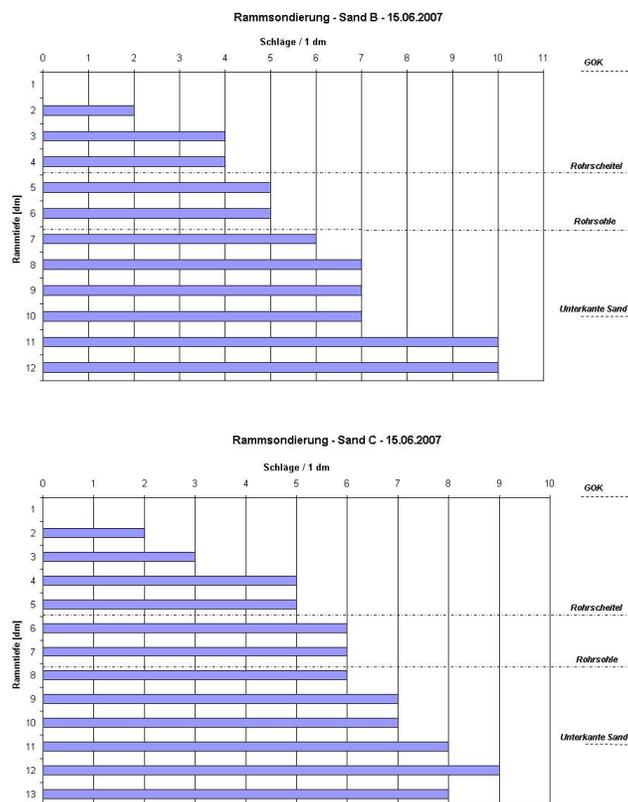


Abbildung 7.27: Großversuch 1: Ergebnisse der Rammsondierung Sand B und Sand C

### 7.3.1.3 Injektionsmesswerte

Abbildung 7.28 zeigt die Datenaufzeichnung des SDV13. Hierbei können die Verläufe des Durchflusses, des Drucks in der Injektionsleitung gemessen vor dem Durchflussmesser (Druck Schacht) und des Drucks in der Injektionsleitung am Bentonitventil (Druck Ventil)

kurz vor dem Übergang in das Vortriebsrohr unterschieden werden. Der unstete Verlauf des Durchflusses und des Druckverlaufes vor dem Durchflussmesser ergab sich aus dem Einsatz der Kolbenpumpe. Am Verlauf der Durchflussmenge ließ sich die Durchfahrt des geologischen Wechsels an der ansteigenden Durchflussmenge erkennen.

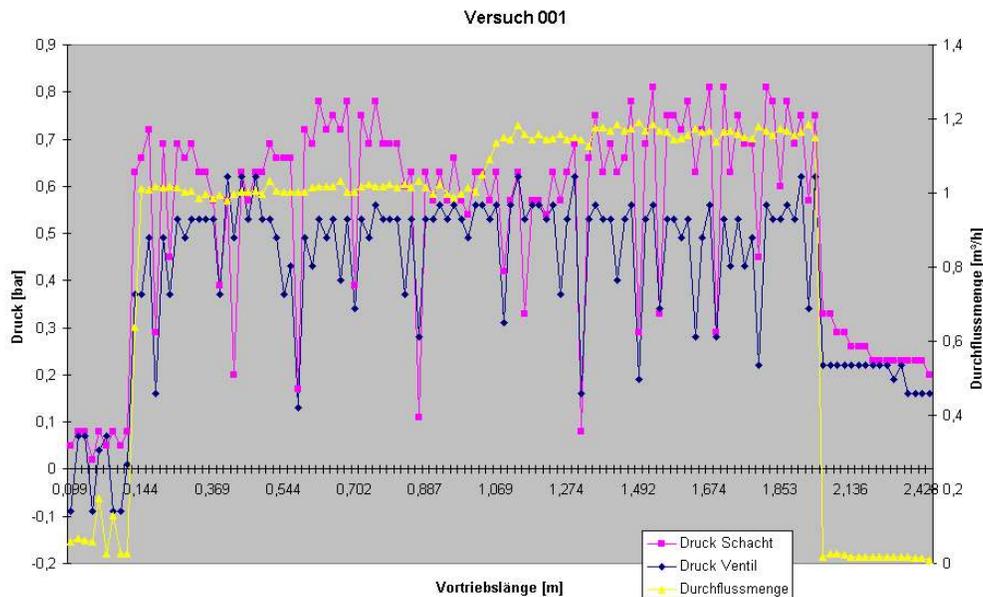


Abbildung 7.28: Großversuch 1: Aufzeichnung SDV13

#### 7.3.1.4 Zugkraftverlauf

Während des Versuchs wurde die an der Seilwinde aufgebrachten Zugkräfte mit Hilfe einer Kraftmessdose aufgenommen. Der Zugkraftverlauf ist in Abbildung 7.29 dargestellt. Für das erste Einziehen des Vortriebsrohres in den Boden wurde eine Kraft von 8662 N aufgebracht. Nach dem Hereinziehen der Injektionsstutzen in den Versuchsstand wurde der Zugvorgang für exakt drei Sekunden unterbrochen. Während des weiteren Vortriebs wurde ein Maximalwert von 9290 N erreicht bevor die Zugkraft kontinuierlich abnahm. Die minimale Zugkraft lag bei 4668 N.

#### 7.3.1.5 Setzungsmessung - optisch

An der Oberfläche des eingebauten Bodens waren keine Veränderungen gegenüber der Markierung der Geländelinie zu erkennen. Es sind keine mit bloßem Auge wahrnehmbaren Setzungen oder Hebungen aufgetreten.

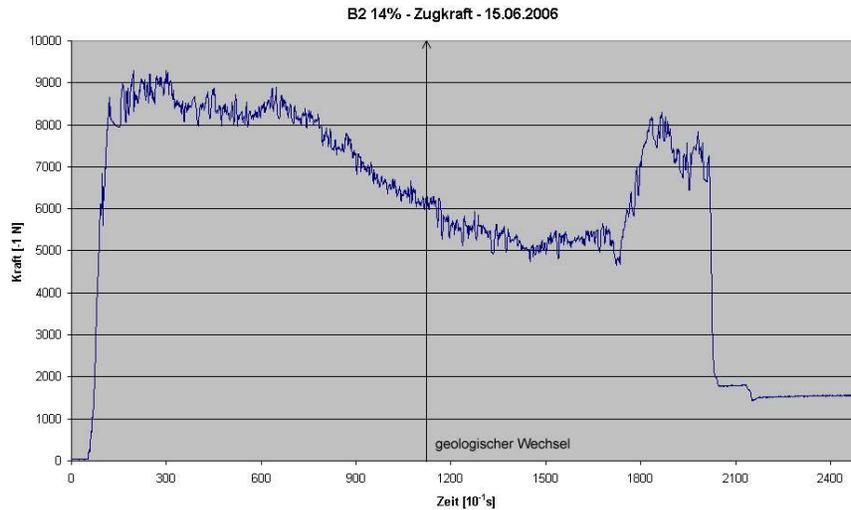


Abbildung 7.29: Großversuch 1: Aufzeichnung des Zugkraftverlaufs

### 7.3.1.6 Erfassung der Eindringtiefe - optisch

Nach Beendigung des Versuchs wurde der Boden lagenweise von oben nach unten wieder aus dem Versuchsstand ausgebaut und unter Zuhilfenahme eines Zollstocks das Ausbreitmaß der Bentonitsuspension im Boden erfasst. Die injizierte Bentonitsuspension und der Boden haben sowohl in Sand B als auch in Sand C ein stabiles, nahezu zylinderförmiges Gebilde erzeugt, dass auch nach dem Bodenaushub bis hin zum Zwickelbereich nicht zusammenfiel (Abbildung 7.30). Erst bei Ausbau der Bodenschichten im Sohlbereich brachen die Teile des Bentonit-Boden-Gemisches durch das Eigengewicht zusammen. Daher konnte die Eindringtiefe der Bentonitsuspension im Sohlbereich (6 Uhr) nicht mittels Zollstock erfasst werden.

Die ermittelten Eindringtiefen im Kämpfer (3 Uhr und 9 Uhr) lagen in Sand B bei 6 cm und in Sand C bei 8 cm, die Eindringtiefe über Rohrscheitel (12 Uhr) betrug in Sand B 5,5 cm und in Sand C 6,6 cm (Abbildung 7.31).

Sowohl in Sand B als auch in Sand C wurde der erzeugte Ringraum über den gesamten Rohrquerschnitt durch die Bentonitsuspension aufrecht erhalten. Dies ließ sich nach vorsichtigem Anschneiden des Bentonit-Boden-Gemisches optisch als auch durch Abtasten deutlich erfassen. Der Unterschied zwischen dem durch die Bentonitsuspension gestützten Boden und der fließfähigen Suspension im Ringraum war über dem Rohrscheitel gut zu erkennen.



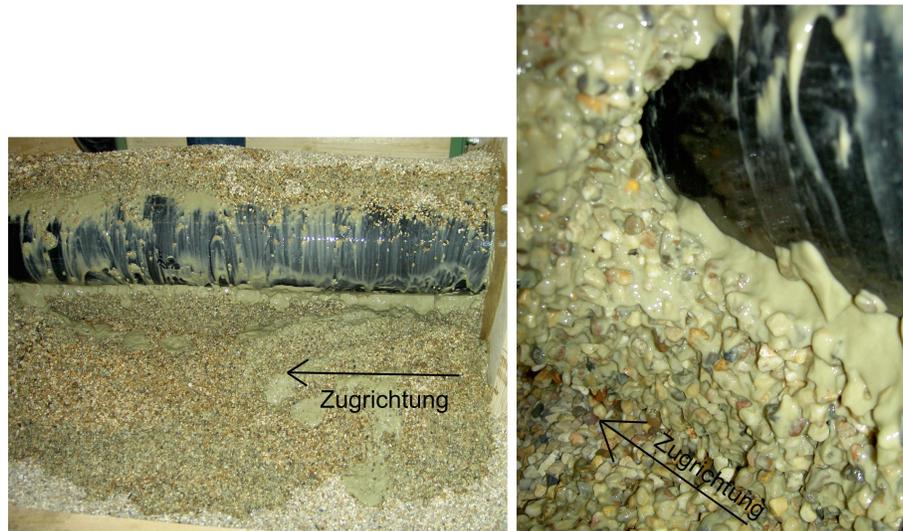
Abbildung 7.30: Großversuch 1: Freigelegter Rohrstrang, standfester Boden um das Vortriebsrohr

Versuch 1:			
	9 Uhr	12 Uhr	3 Uhr
Sand B	6 cm	5,5 cm	6 cm
Sand C	8 cm	6,6 cm	8 cm

Abbildung 7.31: Großversuch 1: Optisch erfasste Eindringtiefen



Abbildung 7.32: Großversuch 1: Messung des standfesten Bodens



**Abbildung 7.33:** Großversuch 1: Ringspalt vollständig mit Bentonitsuspension gefüllt

### 7.3.1.7 Erfassung der Eindringtiefe - Georadar

Die Ergebnisse der Georadar-Messungen zeigt exemplarisch für die Bereiche Scheitel (12 Uhr), Kämpfer (3 und 9 Uhr) und Sohle (6 Uhr) die Abbildung 7.34. Die ausführliche Auflistung aller Messpunkte enthält Anhang F.

Grundsätzlich wurden vom Georadar drei unterschiedliche Phasen hinter der Rohrwandung des Vortriebsrohres identifiziert. Die erste Phase zeigt den Verlauf des vollständig mit Bentonitsuspension gefüllten, standfesten Hohlraumes (Ringspalt) um das Rohr. Der Ringspalt war im Sand B, d.h. auf der Vortriebsstrecke zwischen 0-1 m, deutlich ausgeprägt. Im Sand C, d.h. zwischen 1-2 m Vortriebsstrecke, wurde diese Phase vom Georadar nicht erfasst. Über die Vortriebslänge gesehen und in Abhängigkeit von der Position am Rohrquerschnitt variierte die Höhe des Ringspalts.

Die zweite Phase zeigt den Bereich an, indem das nichtbindige Lockergestein von der Bentonitsuspension durchdrungen war. Hier erfolgte der kombinierte Stützmechanismus der Bentonitsuspension bestehend aus unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung. In diesem Bereich wurden die Bentonitpartikel aus der Suspension gefiltert. Dieser Umstand wurde durch die vom Georadar gemessene dritte Phase nachgewiesen, da hier der Bereich des nichtbindigen Lockergesteins erfasst wurde, der nur von Wasser durchfeuchtet war.

Abbildung 7.35 zeigt eine dreidimensionale Ansicht der Phase 1 (mit Bentonitsuspension gefüllter Ringspalt). Hier wird deutlich, dass der Ringspalt vor allem im feinkörnigeren Lockergestein (Sand B) aufrechterhalten wurde; im Sand C in Teilbereichen. Im grobkörnigeren Sand C war der Ringspalt vor allem in den seitlichen Bereichen der Kämpfer ausgebildet, während im Scheitelbereich der mit Bentonitsuspension gefüllte Ringspalt streckenweise nicht identifiziert werden konnte. Alle dreidimensionalen Darstellungen der einzelnen Phasen enthält Anhang F.

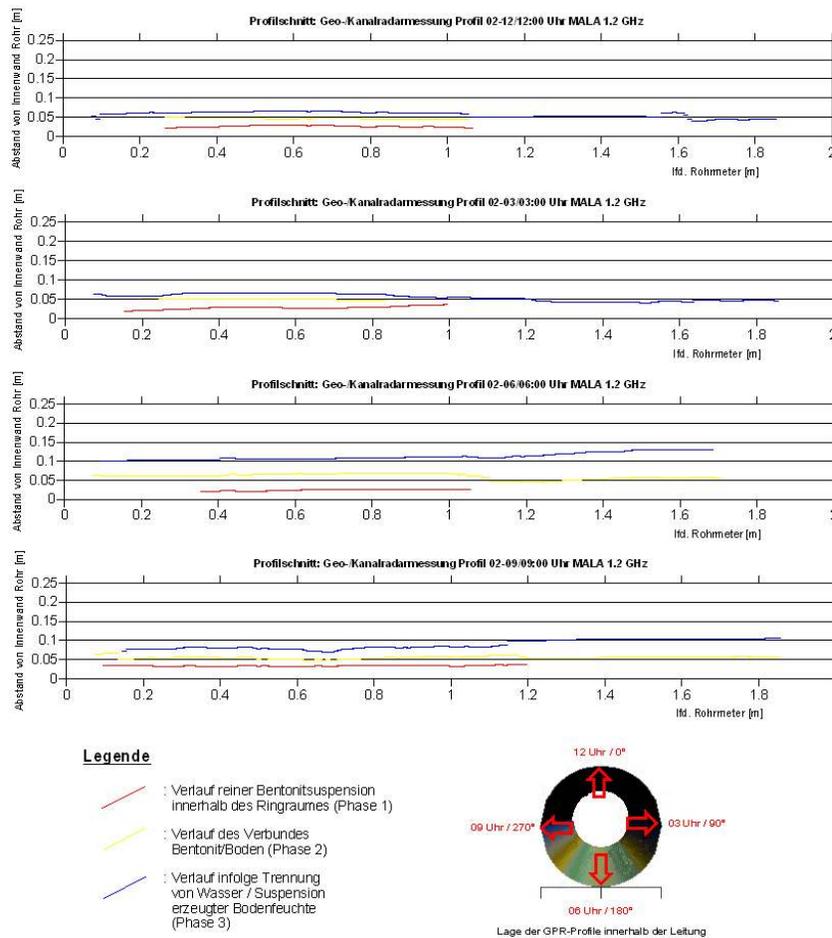


Abbildung 7.34: Großversuch 1: Aufzeichnung der Georadarmessungen: GPR-Profile 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr, 9 Uhr: Tiefen des mit reiner Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts

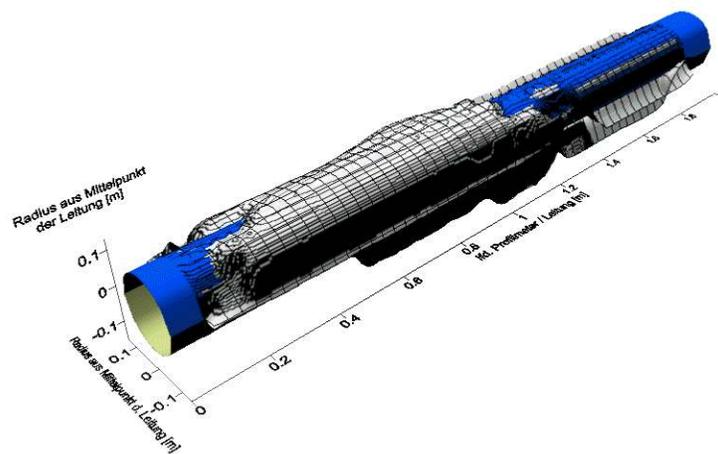


Abbildung 7.35: Großversuch 1: 3D-Ansicht Georadarmessung: Flächenverteilung des mit reiner Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts

### 7.3.2 Großversuch 2

Bei dem Versuch 2 wurde als Injektionsmedium eine polymermodifizierte Bentonitsuspension bestehend aus dem Bentonit B2 (neu) in einer Konzentration von 7 % und dem Polymer Xanthan Gum mit einem Anteil von 0,5 % untersucht. Entsprechend der Einsatzgrenzen der Suspension wurde die erste Hälfte des Versuchsstands, in Zugrichtung gesehen, mit dem Sand B (2-4 mm) und die zweite Hälfte mit dem Sand C (4-8 mm) befüllt (Abbildung 7.36). Die Durchflussgeschwindigkeit der Injektionspumpe wurde solange der feinkörnigere Sand B durchfahren wird mit 19 l/min eingestellt, nach Erreichen des geologischen Wechsels lief die Pumpe anschließend im grobkörnigeren Sand C mit einer Durchflussgeschwindigkeit von 23 l/min bis zum Ende weiter. Die Vortriebsgeschwindigkeit wurde während des gesamten Versuches konstant bei 45 cm/min gehalten. Der Zugvorgang wurde lediglich nach dem ersten Hereinziehen der Injektionsstutzen hinter die Lippendichtung für drei Sekunden unterbrochen, um den Ringraum vollständig mit Bentonit zu füllen bevor der Versuch dann kontinuierlich bis zum Ende weiterlief.

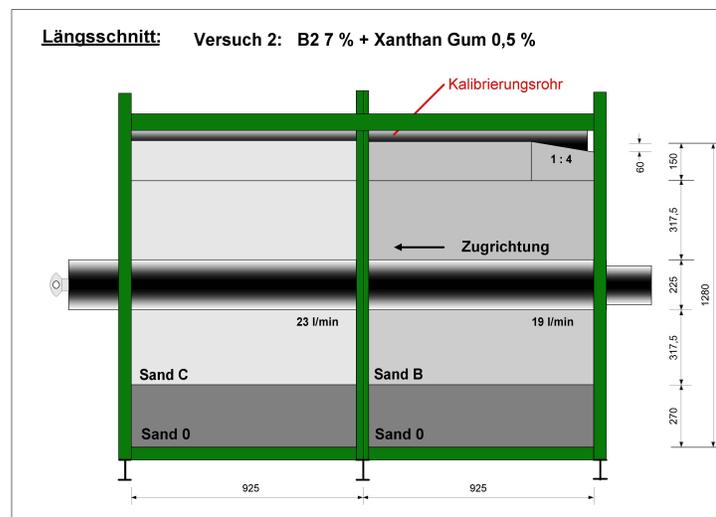


Abbildung 7.36: Großversuch 2: Versuchsaufbau

#### 7.3.2.1 Suspensionseigenschaften

Das Injektionsmittel für den Versuch 2 war eine polymermodifizierte Bentonitsuspension, hergestellt mit dem Bentonit B2 (neu) in einer Konzentration von 7 % und dem Polymer Xanthan Gum mit einem Anteil von 0,5 %. Die Bentonitsuspension wurde 48 Stunden vor dem Versuch angemischt, um ein vollständiges Ausquellen der Bentonitpartikel sicherzustellen, die Modifizierung mit dem Polymer erfolgte 24 Stunden darauf. Nach der Herstellung wurde die Suspension durch Zugabe von 0,1 % Eisenoxid zwecks besserer optischer Erfassung rot eingefärbt. Die ermittelten rheologischen Eigenschaften sind in Abbildung 7.37 aufgeführt.

B2 (neu) + Xanthan Gum			
Datum: 06.07.2007	Bentonit:	B2 (neu)	
	Konzentration:	7%	
	Polymer:	ohne Polymer	mit Xanthan Gum 0.5 %
<b>Dichte</b>			
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,037	1,038
<b>Fließgrenze</b>			
Fließgrenze $\tau_f$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	7,89 - 12,30	22,73 - 31,02
Bingham-Fließgrenze $\tau_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311	22,992
<b>Gelstärke</b>			
Gelstärke $\tau_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,916	11,975
Gelstärke $\tau_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	8,822	17,723
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	6,706	5,748
<b>Viskosität</b>			
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9,5	43
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5	19

Abbildung 7.37: Großversuch 2: Suspensionseigenschaften

### 7.3.2.2 Bodeneigenschaften

Abbildung 7.38 zeigt die Ergebnisse der Rammsondierung in Sand B und Sand C.

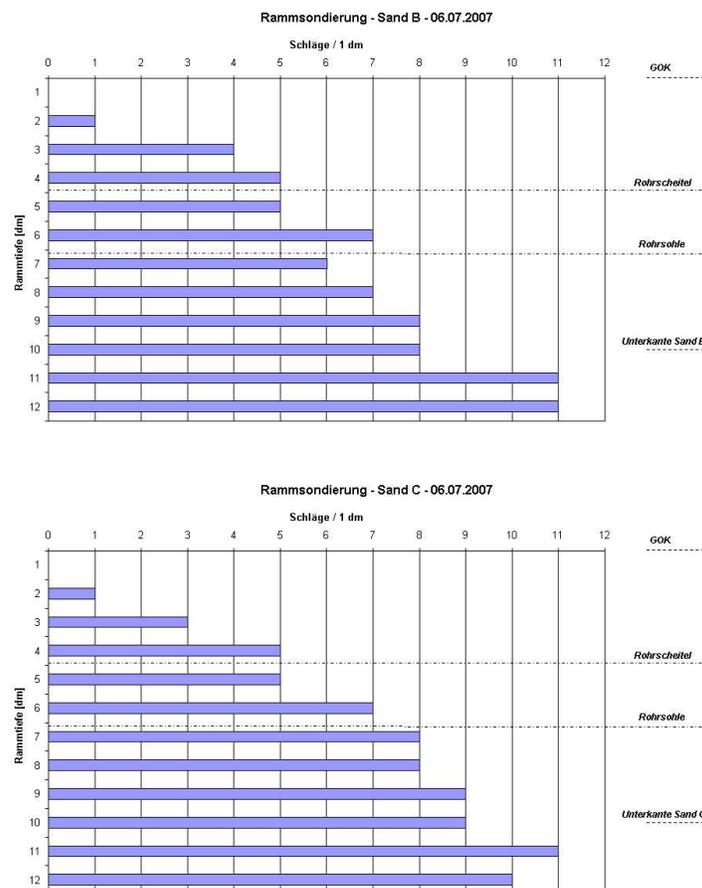


Abbildung 7.38: Großversuch 2: Ergebnisse der Rammsondierung Sand B und Sand C

### 7.3.2.3 Injektionsmesswerte

Abbildung 7.39 zeigt die Datenaufzeichnung des SDV13. Hier sind die Verläufe des Durchflusses, des Drucks in der Injektionsleitung gemessen vor dem Durchflussmesser (Druck Schacht) und des Druck in der Injektionsleitung am Bentonitventil (Druck Ventil) kurz vor dem Übergang in das Vortriebsrohr erkennbar. Der unstete Verlauf des Durchflusses und des Druckverlaufes vor dem Durchflussmesser ergab sich wiederum aus dem Einsatz der Kolbenpumpe. Am Verlauf der Durchflussmenge ließ sich die Durchfahrt des geologischen Wechsels an der ansteigenden Durchflussmenge erkennen.

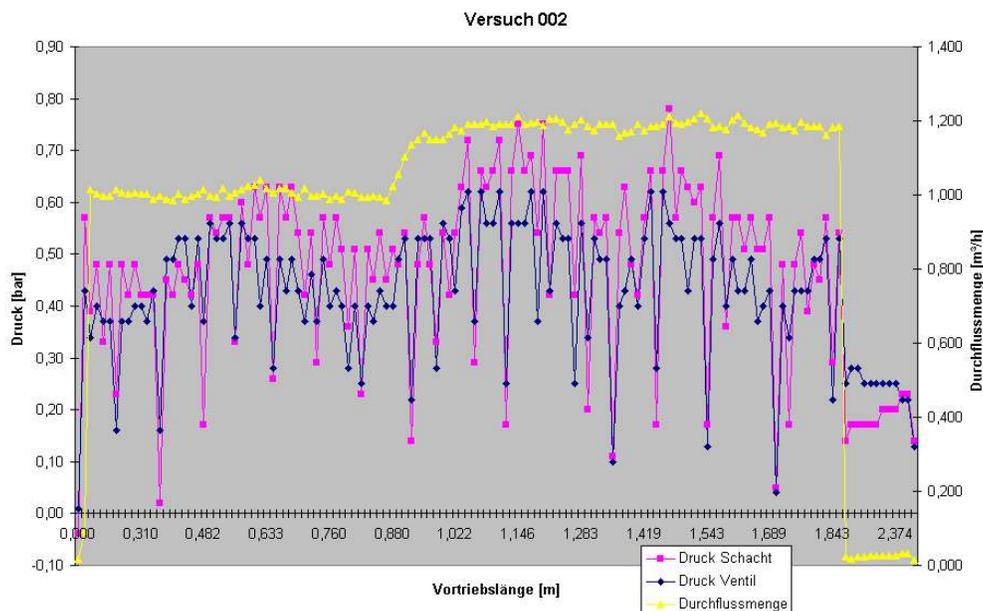


Abbildung 7.39: Großversuch 2: Aufzeichnung SDV13

### 7.3.2.4 Zugkraftverlauf

Während des Versuchs wurden die an der Seilwinde aufgebrauchten Zugkräfte mit Hilfe einer Kraftmessdose aufgenommen. Der Zugkraftverlauf ist in Abbildung 7.40 dargestellt. Für das erste Einziehen des Vortriebsrohres in den Boden wurde eine Kraft von 5886 N aufgebracht. Nach dem Hereinziehen der Injektionsstutzen in den Versuchsstand wurde der Zugvorgang für exakt drei Sekunden unterbrochen. Beim weiteren Vortrieb wurde ein Maximalwert von 9390 N erreicht bevor die Zugkraft daraufhin bis zum Erreichen des geologischen Wechsels kontinuierlich abnahm. Beim Durchfahren des grobkörnigeren Sand C nahm die Zugkraft nicht weiter ab, sie blieb annähernd konstant bei ungefähr 4800 N.

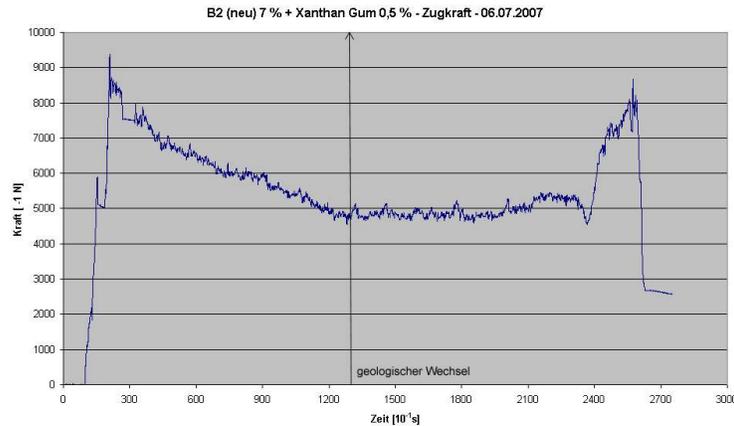


Abbildung 7.40: Großversuch 2: Aufzeichnung des Zugkraftverlaufs

### 7.3.2.5 Setzungsmessung - optisch

In der zweiten Hälfte des Versuchsstandes, in Zugrichtung gesehen, kam es zu einer minimalen Setzung ( $< 1$  cm) oberhalb des Vortriebsrohres in Sand C. Dies kann zum Teil oder auch vollständig dadurch bedingt sein, dass durch das für die Georadarermessung notwendige Weiterziehen des Vortriebsrohres nach Ende des Versuchs sowohl Bentonit (3,5 kg) als auch Boden (2,5 kg) durch die Lippendichtung aus dem Versuchsstand herausgezogen wurden (Abbildung 7.41).



Abbildung 7.41: Großversuch 2: Bodenauszug aus dem Versuchsstand (links); Setzungen an der Oberfläche (rechts)

### 7.3.2.6 Erfassung der Eindringtiefe - optisch

Nach Beendigung des Versuchs wurde der Boden lagenweise von oben nach unten wieder aus dem Versuchsstand ausgebaut und unter Zuhilfenahme eines Zollstocks das Ausbreitmaß der Bentonitsuspension im Boden erfasst. Die injizierte Bentonitsuspension und der Boden haben sowohl in Sand B als auch in Sand C ein stabiles, nahezu zylinderförmiges Gebilde erzeugt, dass auch nach dem Bodenaushub bis hin zum Zwickelbereich nicht zusammenfiel. Erst bei Ausbau der Bodenschichten im Sohlbereich brachen die Teile des Bentonit-Boden-Gemisches durch das Eigengewicht zusammen. Daher konnte die Eindringtiefe der Bentonitsuspension im Sohlbereich (6 Uhr) nicht mittels Zollstock erfasst

werden. Die Eindringtiefe der Bentonitsuspension lag im grobkörnigeren Sand C sichtlich höher als zuvor in Sand B und stieg direkt im Übergang des geologischen Wechsels sprunghaft um mehrere Zentimeter an (Abbildung 7.42).



**Abbildung 7.42:** Großversuch 2: Übergang vom feinkörnigen zum grobkörnigen Lockergestein erkennbar an größere Eindringtiefe der Suspension

Die ermittelten Eindringtiefen im Kämpfer (3 Uhr und 9 Uhr) lagen in Sand B bei 10 cm und in Sand C bei 13,5 cm, die Eindringtiefe über Rohrscheitel (12 Uhr) betrug in Sand B 6 cm und in Sand C 7,5 cm (Abbildung 7.43).

<b>Versuch 2:</b>			
	<b>9 Uhr</b>	<b>12 Uhr</b>	<b>3 Uhr</b>
<b>Sand B</b>	10 cm	6 cm	10 cm
<b>Sand C</b>	13,5 cm	7,5 cm	13,5 cm

**Abbildung 7.43:** Großversuch 2: Eindringtiefen

Sowohl in Sand B als auch in Sand C wurde der erzeugte Ringspalt über den gesamten Rohrquerschnitt durch die polymermodifizierte Bentonitsuspension aufrecht erhalten. Dies ließ sich nach vorsichtigem Anschneiden des Bentonit-Boden-Gemisches optisch als auch durch Abtasten deutlich erfassen. Der Unterschied zwischen dem durch die Bentonitsuspension gestützten Boden und der fließfähigen Suspension im Ringspalt konnte gut differenzieren werden.



**Abbildung 7.44:** Großversuch 2: Messung des standfesten Bodens (links: Sand B; rechts: Sand C)



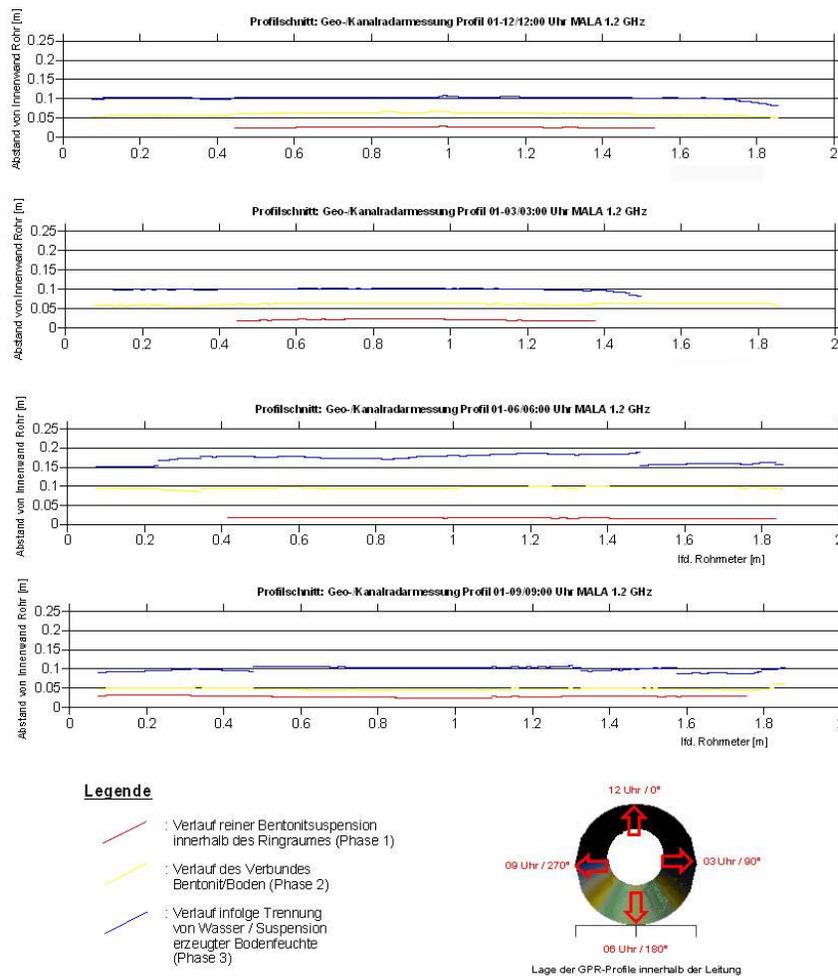
**Abbildung 7.45:** Großversuch 2: Vollständig mit polymermodifizierter Bentonitsuspension gefüllter Ringspalt

### 7.3.2.7 Erfassung der Eindringtiefe - Georadar

Die Ergebnisse der Georadar-Messungen zeigt exemplarisch für die Bereiche Scheitel (12 Uhr), Kämpfer (3 und 9 Uhr) und Sohle (6 Uhr) die Abbildung 7.46. Die ausführliche Auflistung aller Messpunkte enthält Anhang F.

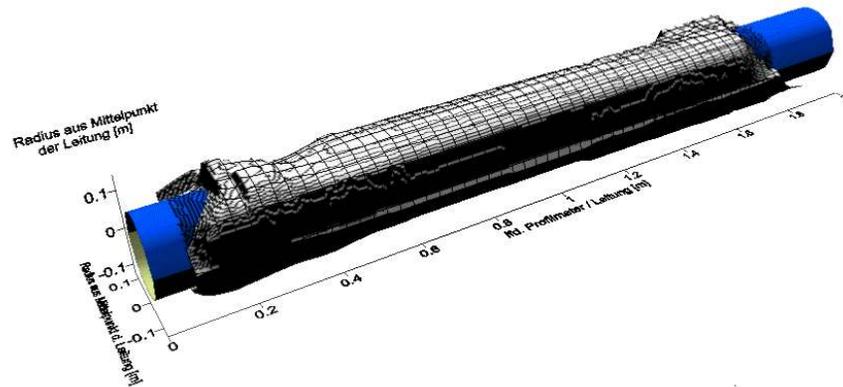
Auch hier identifizierte der Georadar drei unterschiedliche Phasen hinter der Rohrwandung des Vortriebsrohres. Die erste Phase (vollständig mit Bentonitsuspension gefüllter, standfester Hohlraum (Ringspalt)) verlief sowohl im feinkörnigeren (Sand B) als auch im grobkörnigeren Lockergestein (Sand C). Unterschiede ergaben sich in Abhängigkeit der Position im Rohrquerschnitt und der Vortriebslänge .

Die zweite Phase konnte über die gesamte Vortriebslänge gemessen werden. In diesem Bereich war das nichtbindige Lockergestein von der Bentonitsuspension durchdrungen; der Stützeffekt wurde durch die Kombination aus unvollkommener Filterkuchenbildung und verminderter Eindringung erreicht. Auch hier wurden die Bentonitpartikel aus der Suspension gefiltert, da der Georadar eine dritte Phase aufzeichnete, in der das nichtbindige Lockergestein von Wasser durchfeuchtet war.



**Abbildung 7.46:** Großversuch 2: Aufzeichnung der Georadarmessungen: GPR-Profile 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr, 9 Uhr: Tiefen des mit reiner Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts

Abbildung 7.47 zeigt die dreidimensionale Ansicht der Phase 1 (mit Bentonitsuspension gefüllter Ringspalt). Hier wird deutlich, dass der Ringspalt über die gesamte Vortriebslänge ausgeprägt war. Alle dreidimensionalen Darstellungen der einzelnen Phasen enthält Anhang F.



**Abbildung 7.47:** Großversuch 2: 3D-Ansicht Georadarmessung: Flächenverteilung des mit polymermodifizierter Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts

### 7.3.3 Großversuch 3

Bei dem Versuch 3 wurde als Injektionsmittel eine Bentonitsuspension bestehend aus dem Bentonit B2 (neu) in einer Konzentration von 7 % untersucht, die direkt vor dem Injektionsvorgang mit dem mechanischen Stopfmittel *Diamond Seal* mit einem Anteil von 1,2 % aufbereitet wurde. Die Körner des *Diamond Seal* hatten nach dem Anmischen in die Bentonitsuspension 30 Minuten Zeit, um aufzuquellen, bevor die Injektionspumpe gestartet wurde. Weitere 30 Sekunden später erreichte die Suspension die Austrittsöffnung der Injektionsstutzen und der Zugvorgang des Vortriebsrohres wurde gestartet. Entsprechend der Einsatzgrenzen dieses Injektionsmediums wurde die erste Hälfte des Versuchsstandes, in Zugrichtung gesehen, mit dem Sand C (4 - 8 mm) und die zweite Hälfte mit dem Sand D (8 - 16 mm) befüllt (Abbildung 7.48).

Die Durchflussgeschwindigkeit der Injektionspumpe wurde, solange der feinkörnigere Sand C durchfahren wurde, mit 23 l/min eingestellt, nach Erreichen des geologischen Wechsels lief die Pumpe anschließend im grobkörnigeren Sand D mit einer Durchflussgeschwindigkeit von 24 l/min bis zum Ende weiter. Die Vortriebsgeschwindigkeit wurde während des gesamten Versuches konstant bei 43 cm/min gehalten. Der Zugvorgang wurde lediglich nach dem ersten Hereinziehen der Injektionsstutzen hinter die Lippendichtung für drei Sekunden unterbrochen, um den Ringraum vollständig mit Bentonit zu füllen, bevor der Versuch dann kontinuierlich bis zum Ende weiterlief.

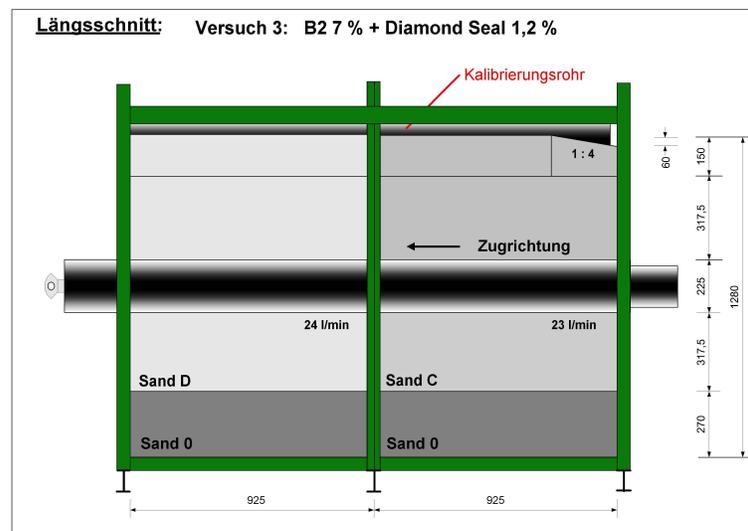


Abbildung 7.48: Großversuch 3: Versuchsaufbau

#### 7.3.3.1 Suspensionseigenschaften

Das Injektionsmittel für den Versuch 3 war eine reine Bentonitsuspension, hergestellt mit dem Bentonit B2 (neu) in einer Konzentration von 7 %, die anschließend mit dem mechanischen Stopfmittel *Diamond Seal* mit einem Anteil von 1,2 % versetzt wurde. Die reine Bentonitsuspension wurde 48 Stunden vor dem Versuch angemischt, um ein vollständiges Ausquellen der Bentonitpartikel sicherzustellen, die Zugabe des Stopfmittels erfolgte

unmittelbar vor der Versuchsdurchführung. Nach der Herstellung wurde die Suspension durch Zugabe von 0,1 % Eisenoxid zwecks besserer optischer Erfassung rot eingefärbt. Da es sich bei Diamond Seal um ein chemisch nicht wirksames Additiv handelt, hat die Modifizierung keine direkten Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften der Suspension wie z.B. Fließgrenze oder Gelstärke. In Abbildung 7.49 sind daher lediglich die Eigenschaften der reinen Bentonitsuspension aufgeführt.

<b>B2 (neu)</b>		
<b>Datum:</b> 18.07.2007	<b>Bentonit:</b>	<b>B2 (neu)</b>
	<b>Konzentration:</b>	7%
	<b>Polymer:</b>	ohne Polymer
<b>Dichte</b>		
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichteglas	1,037
<b>Fließgrenze</b>		
Fließgrenze $\tau_F$ [N/m <sup>2</sup> ]	Kugelharte	7,93 - 12,30
Bingham-Fließgrenze $\tau_B$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	4,311
<b>Gelstärke</b>		
Gelstärke $\tau_{10^-}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	1,916
Gelstärke $\tau_{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	Rotationsviskosimeter	8,622
Thixotropiewert	Rotationsviskosimeter	6,706
<b>Viskosität</b>		
Scheinbare Viskosität $nS$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	9,5
Plastische Viskosität $nP$ [mPas]	Rotationsviskosimeter	5

Abbildung 7.49: Großversuch 3: Suspensionseigenschaften

### 7.3.3.2 Bodeneigenschaften

Abbildung 7.50 zeigt die Ergebnisse der Rammsondierung in Sand C und Sand D.

### 7.3.3.3 Injektionsmesswerte

Abbildung 7.51 zeigt die Datenaufzeichnung des SDV13. Es zeigt die Verläufe des Durchflusses, des Drucks in der Injektionsleitung gemessen vor dem Durchflussmesser (Druck Schacht) und des Druck in der Injektionsleitung am Bentonitventil (Druck Ventil) kurz vor dem Übergang in das Vortriebsrohr. Der unstete Verlauf des Durchflusses und des Druckverlaufes vor dem Durchflussmesser ergab sich wiederum aus dem Einsatz der Kolbenpumpe. Der unstete Verlauf der Durchflussmenge war auf die in der Bentonitsuspension transportierten Diamond Seal-Partikel zurückzuführen. Da keine homogene Suspension durch den magnetisch induktiven Durchflussmesser lief, traten große Verlaufsprünge auf.

### 7.3.3.4 Zugkraftverlauf

Aufgrund eines technischen Fehlers (plötzlicher Ausfall des Rechners zur Datenerfassung) beim Versuch 3 konnten die aufgebrachten Zugkräfte während des Vortriebs nicht aufgezeichnet werden.

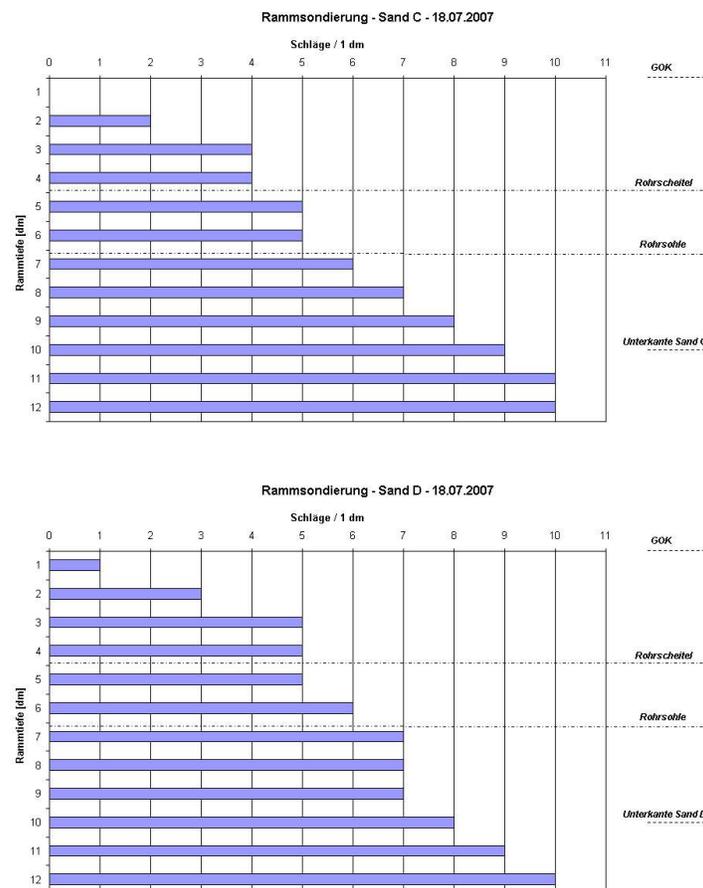


Abbildung 7.50: Großversuch 3: Ergebnisse der Rammsondierung in Sand C und Sand D

### 7.3.3.5 Setzungsmessung - optisch

An der Oberfläche des eingebauten Bodens waren keine Veränderungen gegenüber der Markierung der Geländelinie zu erkennen. Es sind keine mit bloßem Auge wahrnehmbaren Setzungen oder Hebungen aufgetreten.

### 7.3.3.6 Erfassung der Eindringtiefe - optisch

Nach Beendigung des Versuchs wurde der Boden lagenweise von oben nach unten wieder aus dem Versuchsstand ausgebaut und unter Zuhilfenahme eines Zollstocks die Eindringtiefe der Bentonitsuspension im Boden erfasst. Die injizierte Bentonitsuspension und der Boden haben in Sand C und in Sand D ein nahezu zylinderförmiges Gebilde erzeugt. Das Bentonit-Boden-Gemisch war aufgrund der niedrig dosierten Bentonitsuspension nicht sehr stabil und fiel relativ schnell durch sein Eigengewicht zusammen (Abbildung 7.52).

Der Zusammenbruch des Ringspalts war im grobkörnigeren Sand D noch stärker ausgeprägt als im Sand C. Die Eindringtiefe der Bentonitsuspension war daher im Sohlbereich

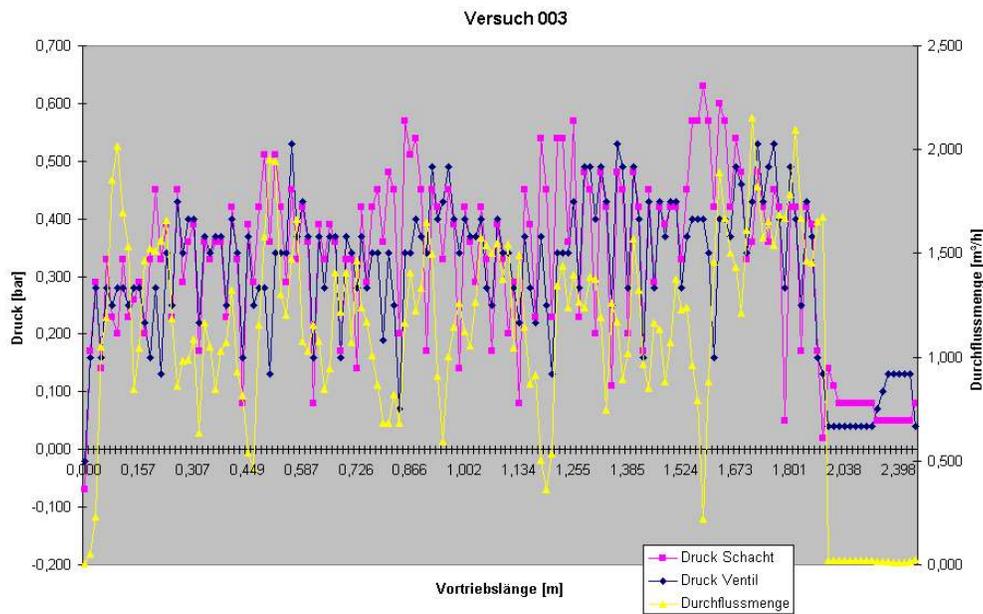


Abbildung 7.51: Großversuch 3: Aufzeichnung SDV13



Abbildung 7.52: Großversuch 3: Feigelegter Rohrstrang

(6 Uhr) nicht mittels Zollstock zu erfassen. Die ermittelten Eindringtiefen im Kämpfer lagen in Sand C bei 8 cm (9 Uhr) und 7,5 cm (3 Uhr) sowie in Sand D bei je 7 cm (3 Uhr und 9 Uhr), die Eindringtiefe über Rohrscheitel (12 Uhr) betrug in Sand C sowie Sand D jeweils 64 cm (Abbildung 7.53).

Versuch 3:			
	9 Uhr	12 Uhr	3 Uhr
Sand C	8 cm	4 cm	7,5 cm
Sand D	7 cm	4 cm	7 cm

Abbildung 7.53: Großversuch 3: Eindringtiefen

Sowohl in Sand C als auch in Sand D war der erzeugte Ringspalt vollständig über den gesamten Rohrquerschnitt mit aufgequollenen Partikeln Diamond Seal gefüllt und aufrecht

erhalten worden (Abbildungen 7.54 und 7.55). Die injizierte Bentonitsuspension war hier kaum noch vorhanden; das Rohr war an seiner Oberfläche nahezu trocken. Die Diamond Seal Partikel waren - wenn überhaupt - nur wenige Zentimeter in den Boden eingedrungen und dann an den Porenengstellen des Bodens hängen geblieben. Die Bentonitsuspension war weiter ohne das Diamond Seal bis zu der in Abbildung 7.53 angegebenen Tiefe in den Boden eingedrungen.



**Abbildung 7.54:** Großversuch 3: Messung des standfesten Bodens (links: Sand D; rechts: Sand C)



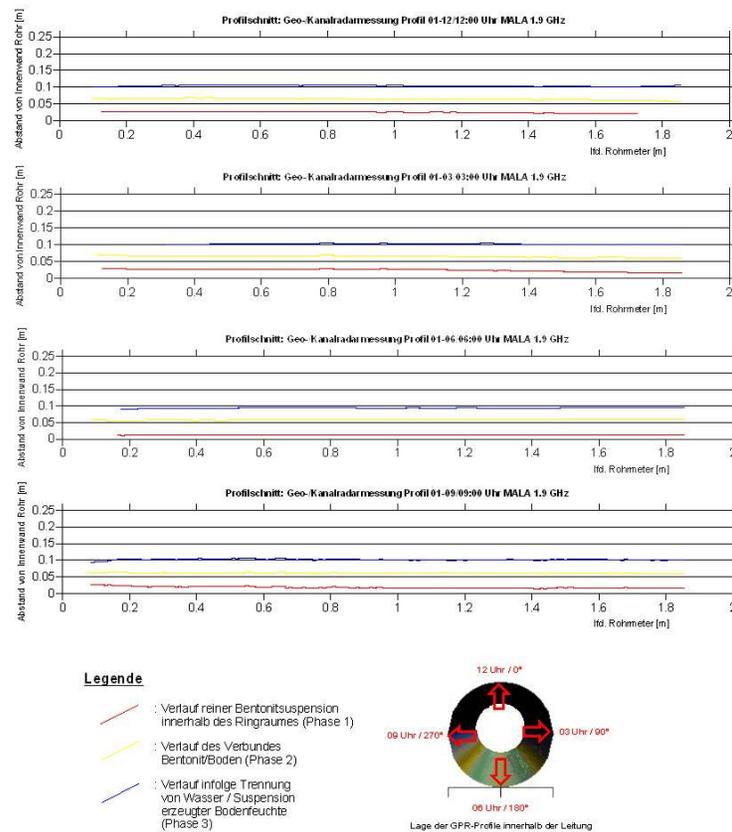
**Abbildung 7.55:** Großversuch 3: Mit mechanischem Stopfmittel gefüllter Ringspalt

### 7.3.3.7 Erfassung der Eindringtiefe - Georadar

Die Ergebnisse der Georadar-Messungen zeigt exemplarisch für die Bereiche Scheitel (12 Uhr), Kämpfer (3 und 9 Uhr) und Sohle (6 Uhr) die Abbildung 7.56. Die ausführliche Auflistung aller Messpunkte enthält Anhang F.

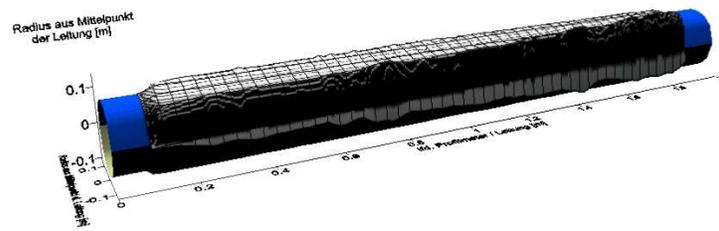
Auch hier identifizierte der Georadar drei unterschiedliche Phasen hinter der Rohrwandung des Vortriebsrohres, allerdings beschreibt die erste Phase hierbei den vollständig mit Bentonitsuspension, vor allem mit mechanischen Stopfmitteln gefüllten und dadurch stabilisierten Ringspalt. Auffallend war, dass die Ausprägung aller drei Phasen über die Vortriebslänge gesehen annähernd konstant verlief. Der Stützeffekt wurde vermutlich über die im Ringspalt ausgequollenen Stopfmittel erreicht, da bei der optischen Erfassung der Eindringtiefe keine stabile Umhüllende um das Vortriebsrohr aufgetreten war.

Trotzdem wurde die zweite Phase gemessen, in der das nichtbindige Lockergestein von der Bentonitsuspension durchdrungen wurde. Die dritte Phase beschrieb den Verlauf des vom Wasser durchfeuchteten Bodens.



**Abbildung 7.56:** Großversuch 3: Aufzeichnung der Georadarmessungen: GPR-Profile 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr, 9 Uhr: Tiefen des mit mechanischen Stopfmitteln und Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts

Abbildung 7.57 zeigt die dreidimensionale Ansicht des mit Bentonitsuspension und mechanischen Stopfmitteln gefüllten Ringspalts (Phase 1). Hier wird deutlich, dass der Ringspalt über die gesamte Vortriebslänge annähernd konstant war. Alle dreidimensionalen Darstellungen der einzelnen Phasen enthält Anhang F.



**Abbildung 7.57:** Großversuch 3: 3D-Ansicht Georadarmessung: Flächenverteilung des mit mechanischen Stopfmitteln und Bentonitsuspension gefüllten Ringspalts

## 7.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Versuches 1 sind als positiv zu bewerten. Es konnte der Nachweis geführt werden, dass bei Injektion einer an die geologischen Bedingungen angepassten reinen Bentonitsuspension die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens gegenüber dem Injektionsmittel vermindert, somit die Standfestigkeit des Bodens erhöht und der Ringspalt offen gehalten werden kann. Beim Durchfahren des geologischen Wechsels vom feinkörnigeren zum grobkörnigeren nichtbindigen Lockergestein wurde die Injektionsmenge erhöht, da die Bentonitsuspension aufgrund der größeren Porenräume eine höhere Eindringtiefe erreichte als im feinkörnigeren Material. An der Geländeoberkante waren keine Senkungen aufgetreten. Der Zugkraftverlauf nahm mit steigender Vortriebslänge ab und lag unter den Werten der Referenzmessungen der Zugkraft.

Die Ergebnisse des Versuches 2 sind ebenfalls als positiv zu bewerten, da der Nachweis geführt werden konnte, dass bei Injektion einer an die geologischen Bedingungen angepassten polymermodifizierten Bentonitsuspension die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens gegenüber dem Injektionsmittel vermindert, somit die Standfestigkeit des Bodens erhöht und der Ringspalt offen gehalten werden kann. Beim Durchfahren des geologischen Wechsels vom feinkörnigeren zum grobkörnigeren nichtbindigen Lockergestein wurde die Injektionsmenge erhöht, da die Bentonitsuspension aufgrund der größeren Porenräume eine höhere Eindringtiefe erreichte als im feinkörnigeren Material. Dieser sprunghafte Anstieg der Eindringtiefe war gut erkennbar. An der Geländeoberkante waren aufgrund des Bodenverlustes an der Austrittsöffnung des Versuchsstands Senkungen aufgetreten. Generell nahm der Zugkraftverlauf mit steigender Vortriebslänge ab und liegt unter den Werten der Referenzmessungen der Zugkraft.

Der Versuch 3 brachte zwar nicht den gewünschten Injektionserfolg, jedoch konnten aus den Ergebnissen wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Bei der Injektion waren die Partikel des mechanischen Stopfmittels nicht bzw. nicht weit genug in das nichtbindige Lockergestein eingedrungen und hatten stattdessen den Ringspalt vollständig ausgefüllt. Bei einer Vortriebsmaßnahme kann hierdurch der unerwünschte Effekt ausgelöst werden, dass die Mantelreibung durch die am Umfang des Rohrstranges eng anliegenden und bei Flüssigkeitszufuhr weiter quellenden Partikel stark ansteigen und bis zum Festsetzen des Vortriebs führen könnten. Grundsätzlich sollten die mechanischen Stopfmittel in die großen Poren- bzw. Hohlräume im Boden eindringen und erst dort aufquellen. Diesen Zeitfaktor beim Anmischen und Injizieren der Bentonitsuspension zu berücksichtigen,

verlangt ausreichend Erfahrung.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Ergebnisse aus der optischen Ermittlung der Eindringtiefe in das anstehende nichtbindige Lockergestein und die Ergebnisse der Georadarmessungen nicht direkt miteinander vergleichbar waren. Während die Georadarmessungen direkt nach dem Ende des Durchzugversuches durchgeführt wurden, konnte die manuelle Messwerterfassung erst etwa 3 Stunden nach dem Versuchsende vorgenommen werden. Diese Zeit war erforderlich, um im Versuchstand das Bodenmaterial vorsichtig und lagenweise wieder auszubauen und den Rohrstrang freizulegen. Insofern erfassen die Ergebnisse der Georadarmessungen den Injektionserfolg direkt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Ziel der Großversuche erreicht wurde. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass bei Einsatz eines geeigneten, d.h. an die geologischen Bedingungen angepassten Injektionsmittels eine effektive Ringspaltstützung und somit auch Rohrstrangschmierung erreicht werden kann.

# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein umfassendes Versuchsprogramm mit der Zielstellung absolviert, die Eigenschaften von Bentoniten, Polymeren und den daraus hergestellten Suspensionen zu untersuchen und zusammenzufassen sowie deren Eignung als Mittel zur Ringspaltstützung in definierten nichtbindigen Lockergesteinen nachzuweisen.

Eine Ringspaltinjektion mit geeigneten Bentonitsuspensionen dient beim Rohrvortrieb im nicht standfesten Baugrund (insbesondere nichtbindiges Lockergestein) dazu den Boden dahingehend zu verbessern, dass

- eine **Erhöhung** der temporären, d.h. zumindest für die Dauer des Vortriebs wirkenden, **Standfestigkeit** des aufgefahrenen Hohlraums (Ringspalt) sowie
- auf eine **Verringerung** der **Durchlässigkeit** des Bodens gegenüber der eingesetzten Bentonitsuspension erreicht wird.

Durch eine effektive Ringspaltstützung während der Vortriebsmaßnahme kann die zum Vorschub des Rohrstranges erforderliche Vortriebskraft merklich reduziert werden. Die Auswahl geeigneter Bentonitsuspensionen zur Ringspaltstützung basiert dabei auf den im Rahmen des Bodengutachtens verifizierten Parametern des anstehenden Baugrunds, wie z.B. Bodenart, Sieblinie und Durchlässigkeit.

Die theoretischen Grundlagen zu Bentoniten und Polymeren werden in den Kapiteln 2 und 3 zusammengefasst. Eine Übersicht der auf dem deutschen Markt erhältlichen Bentonit- und Polymerprodukte zeigt Kapitel 4. Hierbei wurden die jeweiligen Suspensionseigenschaften von reinen und durch die Zugabe von Polymeren modifizierten Bentonitsuspensionen durch den Einsatz ausgewählter und DIN-konformer Messmethoden systematisch bestimmt und übersichtlich dargestellt. Diese Aufstellungen zeigen, dass die gezielte und auf die vorhandenen Baugrundbedingungen abgestimmte Veränderung bestimmter Suspensionseigenschaften zum einen durch die Variation des Bentonitgehalts in der Suspension und/oder durch die Zugabe von Polymeren erreicht werden kann.

Die Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen dieser Suspensionen wurden in über die Bodenart, die Sieblinie und den Durchlässigkeitsbeiwert definierten, nichtbindigen Lockergesteinen

experimentell untersucht. Hierzu wurden die in Kapitel 6 vorgestellten kleinformatischen Injektionsversuche durchgeführt, bei denen die hinsichtlich ihrer Eigenschaften definierten Bentonitsuspensionen in die Modellböden, bestehend aus nichtbindigem Lockergestein, injiziert wurden. Als Einsatzbereich war in diesem Zusammenhang das eingangs erläuterte Ziel zur **Verringerung der Durchlässigkeit** des Bodens gegenüber dem eingesetzten Injektionsmittel definiert. Auf welchem Weg diese verringerte Bodendurchlässigkeit erreicht werden kann, beschreibt Kapitel 5. Anhand der Ergebnisse der kleinformatischen Injektionsversuche war es möglich, für die jeweils eingesetzte Bentonitsuspension die Einsatzbereiche sowie die Einsatzgrenzen im nichtbindigen Lockergestein anzugeben.

Abschließend wurden die in Kapitel 7 beschriebenen Großversuche mit der Zielstellung durchgeführt, den Nachweis zu erbringen, dass die durch die spezifische Injektion angestrebte und eingangs definierte Zielstellung der **Standfestigkeitserhöhung** des aufgefahrenen Hohlraums (Ringspaltstützung) bei Einsatz einer an die geologischen Verhältnisse angepassten Bentonitsuspension erreicht werden kann. Hierbei wurden im praktischen Versuch die Verfahrenstechnik der Ringspaltherstellung im Zuge des Vortriebs simuliert und vortriebsbegleitend eine an das anstehende nichtbindige Lockergestein angepasste Bentonitsuspension in den Ringspalt injiziert.

Diese Forschungsergebnisse sind in Arbeitshilfen für die im Rohrvortrieb Tätigen mit folgendem Inhalt zusammengefasst worden:

- A Die Eigenschaften von Bentoniten und Bentonitsuspensionen werden zusammenfassend dargestellt sowie die fachgerechte Herstellung und Verwendung erläutert.
- B Es werden die Grundlagen zu Polymeren beschrieben, die eine Modifizierung von Bentonitsuspensionen sinnvoll unterstützen und somit den jeweiligen Einsatzbereich erweitern können.
- C Eine erste Übersicht fasst die spezifischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen bestehend aus verschiedenen Produkten in unterschiedlicher Konzentration und teils durch die Zugabe von ausgewählten Polymeren modifiziert zusammen. Diese Übersicht schafft eine Katalogisierung der mit unterschiedlichen Produkten erreichbaren Suspensionseigenschaften. Es muss an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen werden, dass diese Übersicht nicht die Formulierung der Anforderungen an eine Bentonitsuspension für den spezifischen Anwendungsfall ersetzen kann. Es wird daher empfohlen, gemeinsam mit den Herstellern der Bentonit- und/oder Polymerprodukte eine projektspezifische Suspensionsrezeptur zu erarbeiten.
- D Für jede der hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersuchten und katalogisierten Bentonitsuspensionen werden im Rahmen einer zweiten Übersicht der Einsatzbereich und die Einsatzgrenzen dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den Böden um Einkornböden aus dem Bereich der nichtbindigen Lockergesteine handelt. Einkornböden in unterschiedlichen Korngrößenbereichen weisen im Vergleich zu einem Boden mit gut gestufter Sieblinie in ähnlichen Korngrößenbereichen jeweils den größtmöglichen Porenraum und somit die größtmögliche Durchlässigkeit auf. Die Ergebnisse der Injektionsversuche liegen somit vom theoretischen Ansatz her

auf der *sicheren Seite*, so dass beispielsweise die definierte Eindringtiefe bei einem vergleichbaren, gut gestuften Boden immer geringer sein wird als die in den Versuchen im Einkornboden ermittelte. Die Versuchsergebnisse können eine grundlegende Einordnung der Wirksamkeit einer Bentonitsuspension in einem Boden aufzeigen; sie befreien den Planer und Ausführenden einer Vortriebsmaßnahme nicht von der Verantwortung, ein qualifiziertes und auf die Vortriebsmaßnahme zugeschnittenes Baugrundgutachten heranzuziehen und die Bentonitsuspension(en) den Anforderungen entsprechend zu konzipieren.

# Literaturverzeichnis

American Petroleum Institute (Hrsg.): Recommended Practise Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, API Recommended Practise 13B-1, 2. Auflage (September 1997).

Bentonit Kompendium. <http://www.erbsloeh.com> (Juli 2006).

BOLKER, H.I.: Natural and Synthetic Polymers, an Introduction Carothers, (1971)

CAMBEFORT, H.: Bodeninjektionstechnik. Deutsche Bearbeitung, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1969.

DARLEY, H.C.H., and Gray, G.R.: Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, 5th Edition, Gulf Publishing Company, Houston 1988.

DIN 1342-2: Viskosität. Teil 1: Rheologische Begriffe (November 2003).

DIN 1342-2: Viskosität. Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten (November 2003).

DIN 18121-1: Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung (April 1998).

DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung (November 1996).

DIN 18124: Baugrund, Bestimmung der Kornrohddichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer (Juli 1997).

DIN 18125-1: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 1: Laborversuche (August 1997).

DIN 18126: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung (1996).

DIN 18130-1: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes: Laborversuche (November 1989).

DIN 18196: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke (Oktober 1988).

DIN 4022-1: Baugrund und Grundwasser - Benennen und Beschreiben von Boden und Fels: Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels (September 1987).

DIN 4093: Baugrund - Einpressen in den Untergrund - Planung, Ausführung, Prüfung (September 1987).

- DIN 4126-100 V: Schlitzwände, Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten (April 1996). Vornorm.
- DIN 4127: Erd- und Grundbau; Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten - Anforderungen, Prüfverfahren, Lieferung, Güteüberwachung (August 1986).
- DIN EN 1538: Ausführungen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau): Schlitzwände (Juli 2000).
- DONEL, M.: Bodeninjektionstechnik. Studienunterlagen für das Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik. Hrsg. Nendza, H., Verlag Glückauf GmbH, Essen 1990.
- DVGW-Merkblatt W 116: Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten in Grundwasser (April 1998).
- ELBE, L.: Bohrspülungen im HDD. Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, Band 26, Vulkan Verlag, Essen 2003.
- FAHN, R.: Was ist Bentonit? Vortrag bei einer Schlitzwandtagung. Sonderdruck der Süd-Chemie AG, München (1967).
- Firmeninformationen Friedrich Leutert GmbH & Co.KG, Adendorf, Deutschland.
- Firmeninformationen Phrikolat Drilling Specialities GmbH.
- FLORY, P.J.: Principles of Polymer Chemistry, Cornell University Press, Ithaca, New York, (1953)
- FÖRSTER, W.: Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1996.
- FRANK, H.: Bodenmechanik und Erddruckberechnung, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, FH Giessen - Friedberg
- GEIL, M.: Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig, 1987.
- GREWE, H.: Die stabilisierenden Eigenschaften thixotroper Flüssigkeiten im Grundbau. Bautechnik-Archiv (1965), Heft 17, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München.
- GRIM, R.: Clay Mineralogy. McGraw-Hill Book Company, 2. Auflage, 1968.
- Handbuch für die Einkapselung von Altlasten. Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 4, <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de> (Juli 2006).
- HOFMANN, U.: Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Thixotropie, insbesondere bei tonhaltigen Gelen. Kolloid-Zeitschrift (1952), Heft 2, S. 86 - 99.
- IBECO Bentonit-Technologie GmbH (Hrsg.): Bentonit für Tunnelbau und unterirdische Bauverfahren - Ein Handbuch für die Baupraxis. Mannheim, 1999.

- IBECO Bentonit-Technologie GmbH (Hrsg.): Bentonit im Tiefbau - Ein Handbuch für die Baupraxis. 2. Auflage. Mannheim, 1998.
- IDEL, K.-H.: Injektionsverfahren. Grundbau-Taschenbuch, Teil 2. Hrsg. Smolczyk, U., Verlag Ernst & Sohn, 5. Auflage, 1996.
- IKO MINERALS GMBH. Einfluss von Temperatur und Wasserhärte auf eine Bentonitsuspension. <http://www.ikominerals.com> (Juli 2006).
- IKO MINERALS GMBH. Empfehlungen zur Herstellung von Bentonitsuspensionen. <http://www.ikominerals.com> (Juli 2006).
- Internet: <http://www.wissen.de> (Juli 2006).
- Internet: Viskosität. <http://www.wikipedia.de> (Juli 2006).
- Internet: Was ist Bentonit? <http://www.bentonit.de> (Juli 2006).
- Internet: Herbst Handel + Transport GmbH, <http://www.tonmehle.de> (Januar 2002).
- JASMUND, K.; LAGALY, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone, Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag, Darmstadt 1993.
- KILCHERT, M.; KARSTEDT, M.: Schlitzwände als Trag- und Dichtungswände, Band 2: Standsicherheitsberechnungen von Schlitzwänden nach DIN 4126. Beuth-Verlag, Berlin/Köln 1984.
- KLEIST, F., STROBL, T.: Die Fließgrenze von Schmalwandsuspensionen und die Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter. Geotechnik 21 (2) (1998), S. 97-102.
- KUTZNER, C.: Injektionen im Baugrund. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1991.
- LOTZWICK, G.-U.: Die Bohrspülung- Ein Leitfaden für Studierende und Praktiker, Verlag Wissenschaftliche Skripten, (1997)
- MÖBIUS, C.H.: Bentonit-Suspensionen - Eigenschaften, Herstellung und Prüfung. Österreichische Ingenieurzeitschrift (1977), Heft 3, S. 73 - 82.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H.: Stability of Slurry Trenches in inhomogeneous Subsoil, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engeneering. Tokyo Vol 2, S.125-132. (1977).
- PERBIX, W., TEICHERT. H.-D.: Feinstbindemittel für Injektionen in der Geotechnik und im Betonbau. Taschenbuch Tunnelbau, Verlag Glückauf GmbH, Essen 1995.
- PLANK, J.: Feldergebnisse mit einem neuen Filtratreduzierer für Bohrspülungen. Erdöl, Erdgas, Kohle Nr. 4 (1990).
- PULSFORT, M., Walz, B.: Spezialgrundbau - Teil A: Schlitzwandbauweise. Skript zur Vorlesung, Fachgebiet Unterirdisches Bauen, Grundbau, Bodenmechanik, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, (WS 2000/2001)

- PULSFORT M., Walz, B.: Spezialgrundbau - Teil B: Injektionen. Skript zur Vorlesung, Fachgebiet Unterirdisches Bauen, Grundbau, Bodenmechanik, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, (WS 1997/1998)
- RIZKALLAH, V.: Einführung in die praktische Bodenmechanik, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) Universität Hannover, 1995
- RUPPERT, F.-R.: Bentonitsuspensionen für die Schlitzwandherstellung. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau (1980), Heft 8, S. 684-686.
- RUPPERT, F.-R.: Mischen von Bentonitsuspensionen. Baumaschinen und Bautechnik (1978), Heft 10.
- SAVIDIS, S.: Sonderkonstruktionen von Gründungen und Stützbauwerken, Skriptentwurf, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, TU Berlin (2005)
- SCANELEY, C.S.: Fluid Loss controlled by Acrylic polymers as drilling mud additives; World Oil, (1959)
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, 15. Auflage, Berlin/Heidelberg 2002.
- SCHERLE, M.: Rohrvortrieb. Band 1: Technik, Maschinen Geräte. Bauverlag, Wiesbaden / Berlin 1977.
- SCHMIDT, H.G.; SEITZ, J.: Grundbau. Beton-Kalender 1998, Teil 2, Hrsg. J. Eibl, Ernst & Sohn, Berlin 1998.
- SCHULTZE, E., MUHS, H.: Bodenuntersuchung für Ingenieurbauten. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York 1967.
- SCHULZE, B.: Injektionssohlen - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Univ. Karlsruhe, Heft 126, 1992.
- SCHULZE, B.: Neuere Untersuchungen über die Injizierbarkeit von Feinstbindemittelsuspensionen, Grouting in Rock and Concrete, Balkema, Rotterdam, 1993.
- SCHULZE, B.; BRAUNS, J.; SCHWALM, I.: Neuartiges Baustellenmessgerät zur Bestimmung der Fließgrenze von Suspensionen. Geotechnik 14 (1991), S. 125-131.
- SEMPRICH S., STADLER G.: Injektionen. Grundbau-Taschenbuch, Teil 2 - Geotechnische Verfahren. Hrsg. Smoltczyk, U., Verlag Ernst & Sohn, 6. Auflage, 2001.
- SILVEIRA, A.: An analysis of the problem of washing through in protective filters. Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., University of Toronto, Vol. 2., (1965).
- SOOS v., P.: Eigenschaften von Boden und Fels - ihre Ermittlung im Labor. Grundbau-Taschenbuch Teil 1 - Geotechnische Grundlagen. Hrsg. Smoltczyk, U., Verlag Ernst & Sohn, 6. Auflage, 2001.

- 
- STEIN, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Auflage. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1999.
- STEIN, D.: Der begehbare Leitungsgang. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2002.
- STEIN, D.: Grabenloser Leitungsbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2003.
- SZWARC, M.: Carbanions, Living Polymers and Electron Transfer Processes, Wiley-Interscience, New York, (1968)
- TRIANAFYLLIDIS, T.: Arbeitsblätter für Bodenmechanik, Skript zur Vorlesung, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum (2002)
- TRIANAFYLLIDIS, T.: Arbeitsblätter für Grundbau, Skript zur Vorlesung, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum (2002)
- TRIANAFYLLIDIS, T.: Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, Teil 1: Schlitzwand- und Dichtwandtechnik, Ernst Sohn
- VORABUTR, P.: Developments in Petroleum Science 11- Drilling and Drilling Fluids, Elsevier
- W.H.: J.Am.Chem.Soc.; 51, 2548, (1929)
- WEISS, F.: Die Standfestigkeit flüssigkeitgestützter Erdwände. Bauingenieur-Praxis, Heft 70. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1967.
- ZIESMER, S.: Das Fließverhalten von Montmorillonitdispersionen unter dem Einfluß ionisch modifizierter Polyethylenglycole, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, (2002).