

ABSCHLUSSBERICHT

Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung

Verfahren zur flüssigen Grabenverfüllung

Im Auftrag des:



Land
Nordrhein-Westfalen

Ministerium für Klimaschutz,
Umwelt, Landwirtschaft, Natur-
und Verbraucherschutz des
Landes NRW

Durchführung:



Dr. Pecher AG

Projektleitung:

Dr.-Ing. Klaus Hans Pecher

Bearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Quarg-Vonscheidt
Dipl.-Ing. Katharina Sosinka
Dipl.-Ing. Miriam Baukloh
Dipl.-Ing. Anna Jasmin Gropengießer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und Struktur der Dokumentation	4
3	Grundlagen der flüssigen Grabenverfüllung	6
3.1	Die Methode der flüssigen Grabenverfüllung	6
3.1.1	Aufbruch der Oberfläche	6
3.1.2	Aushub des Leitungsgrabens	7
3.1.3	Grabenverbau	8
3.1.4	Rohrverlegung	8
3.1.5	Verfüllung der Leitungszone	9
3.1.6	Rückbauzustand der Grabensicherung	11
3.1.7	Wiederherstellen der Oberflächen	11
3.2	Fließfähige Verfüllbaustoffe	13
3.2.1	Boden-Bindemittel-Gemische	14
3.2.2	Fließfähige Verfüllmaterialien mit normierten Zuschlägen	14
3.2.3	Eigenschaften fließfähiger Verfüllbaustoffe	15
3.3	Rheologie flüssiger Verfüllbaustoffe	16
3.3.1	Allgemein	16
3.3.2	Messung rheologischer Eigenschaften	16
3.3.3	Eigenschaften von Suspensionen	18
3.3.3.1	Allgemein	18
3.3.3.2	Stabilität kolloidaler Systeme	18
3.3.4	Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Suspensionen	19
3.4	Eigenschaften flüssiger Verfüllbaustoffe	22
3.4.1	Stabilität der Suspension	22
3.4.2	Die Auftriebswirkung der Suspension	22
3.4.2.1	Das Ballon-Experiment	22
3.4.2.2	Laborversuche zur Auftriebswirkung in Suspensionen	23
3.4.3	Stützwirkung auf Grabenwände	26
3.4.4	Maßgebende Parameter von Verfüllbaustoffen und deren Messung	27
3.5	Standsicherheit des offenen Grabens	33
3.5.1	Nachweis nach DIN 4126	33
3.5.2	Das Prinzip der Flüssigkeitsstützung	34
3.5.3	Ableitung eines Nachweisformates für die innere Standsicherheit suspensionsgestützter Gräben	37
3.5.4	Abschätzung des Verlustes an stützender Flüssigkeit	39
3.6	Einschätzung der wirtschaftlichen Aspekte	41
4	Untersuchungen zu fließfähigen Verfüllbaustoffen	42
4.1	Verwendete fließfähige Verfüllbaustoffe	42
4.1.1	Auswahl der Baustoffe	42
4.1.2	RSS®-Flüssigboden	42
4.2	Messung der Parameter fließfähiger Verfüllbaustoffe	43
4.2.1	Versuche zur Eignungsprüfung von Bentonitsuspensionen	43
4.2.1.1	Versuche mit dem Pendelgerät nach Weiß	43
4.2.1.2	Versuche mit der Kugelharfe nach von Soos	45

4.2.2	Versuche zur Eignungsprüfung von Frischbeton und Mörtel	46
4.2.2.1	Versuche mit dem Hägermantisch	46
4.2.2.2	Versuche mit dem Ausbreittisch	51
4.2.3	Versuche zur Eignungsprüfung von selbstverdichtenden Betonen	54
4.2.3.1	Setzfließversuch	54
4.2.3.2	Auslauftrichter-Versuch	54
4.2.3.3	L-Kasten-Versuch	55
4.2.3.4	Blockierring-Versuch	56
4.2.4	Bewertung der Versuche zur Eignungsprüfung von Betonen	57
5	Entwicklung eines Baustellengerätes	58
5.1	Erprobung des Vertikalpendelgerätes	58
5.1.1	Baustellentaugliches Pendelgerät	58
5.1.2	Vergleichende Untersuchungen mittels Flügelschergerät und Vertikal-Pendelgerät	61
5.1.2.1	Versuche mit dem Flügelschergerät	61
5.1.2.2	Versuche mit dem Vertikalpendelgerät	62
5.1.3	Ergebnisse der Parallelversuche	64
5.2	Untersuchung zur Stabilität von hochkonzentrierten Suspensionen	73
5.2.1	Berechnung der Suspensionsstabilität	73
5.2.2	Einfluss der Rezeptur auf die Suspensionsstabilität	73
6	Flüssige Grabenverfüllung im Rohrleitungsbau – Auftriebswirkung in Suspensionen	76
6.1	Beanspruchung der Rohrleitung im Einbauzustand	76
6.1.1	Grundlagen zum effektiven Auftrieb einer Rohrleitung	76
6.1.2	Aufbau und Durchführung kleinmaßstäblicher Versuche	78
6.1.3	Beobachtungen während der Versuchsdurchführungen	81
6.1.4	Auswertung der kleinmaßstäblichen Auftriebsversuche	82
6.1.4.1	Auftriebswirkung von Wasser	82
6.1.4.2	Auftriebswirkung der Bentonitsuspension	84
6.1.4.3	Auftriebswirkung von RSS [®] -Flüssigboden	86
6.1.5	Großmaßstäbliche Auftriebsversuche im Labor – RSS [®] -Flüssigboden	88
6.1.5.1	Versuchsdurchführung	89
6.1.5.2	Ergebnisse zur Auftriebsmessung	95
7	Kanalbaumaßnahme an der Schluchtstraße in Wuppertal – Praxis-Versuche	99
7.1	Einleitung	99
7.2	Anpassung des Bauablaufes an die Baustellenbedingungen	99
7.3	Verbau	101
7.3.1	Grabensicherung	101
7.3.2	Querabschottung	102
7.4	Messung der Suspensionsparameter auf der Baustelle	104
7.4.1	Messung der Wichte	104
7.4.2	Messung der Fließgrenze	104
7.4.3	Kornverteilung der Zuschlagstoffe	106
7.5	Nachweis der Suspensionseigenschaften	106
7.5.1	Nachweis der Stabilität der Suspension	106
7.5.2	Ermittlung der effektiven Auftriebskraft	107
7.5.3	Nachweis des suspensionsgestützten Grabens	108

7.6	Kraftmessung am Anker	110
7.7	Ergebnisse der Auftriebsmessung	110
7.8	Auftriebssicherung der Rohrleitung	114
7.8.1	Ballastierung der Rohrleitung	114
7.8.2	Abschirmung des Rohres vor auftriebswirksamen Suspensionsdruck	115
7.8.3	Fixierung des Rohres durch Auflagerkonstruktionen	116
7.8.4	Schraubpfähle zur Auftriebssicherung	117
7.8.5	Anordnung der Auflager und Anker	117
7.8.6	Ankerzugtest	118
7.8.7	Einbau der Anker	121
7.9	Lastplattendruckversuch	122
7.10	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit als Kontrollwert des Verfüllbaustoffes	124
8	Entwurf eines Praxisleitfadens für die Anwendung der flüssigen Grabenverfüllung	126
8.1	Einleitung	126
8.2	Messung der Fließgrenze mit dem Vertikalpendelgerät	128
8.2.1	Versuchsaufbau	128
8.2.2	Ermittlung der Wichte	129
8.2.3	Ermittlung der Fließgrenze	129
8.3	Nachweis der Suspensionseigenschaften	130
8.3.1	Nachweis der Stabilität der Suspension	130
8.3.2	Bestimmung der effektiven Auftriebskraft	130
8.4	Nachweis der Auftriebssicherung der Rohrleitung	132
8.4.1	Ballastierung der Rohrleitung	132
8.4.2	Abschirmung des Rohres vor auftriebswirksamen Suspensionsdruck	132
8.4.3	Fixierung des Rohres durch Auflagerkonstruktionen	133
8.4.3.1	RSS®-Rohrverlegehilfe	133
8.4.3.2	Rückverankerung	134
8.5	Nachweis des suspensionsgestützten Grabens	134
8.6	Anwendungsbeispiel	136
8.6.1	Messung der Suspensionswichte	136
8.6.2	Messung der Fließgrenze	137
8.6.3	Nachweis der Stabilität der Suspension und Ermittlung der auftriebswirksamen Fließgrenze	139
8.6.4	Nachweis der Auftriebssicherung	140
8.6.4.1	Auftriebssicherung durch Ballast	142
8.6.4.2	Auftriebssicherung durch Haltungsbanke	142
8.6.5	Nachweis des Suspensionsgestützten Grabens	143
9	Zusammenfassung	145
10	Literatur	147

Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Trennen der Fahrbahndecke vor Aushub des Grabens	7
Bild 2:	Aushub des Leitungsgrabens	7
Bild 3:	Endgültiger Grabenverbau	8
Bild 4:	Rohrverlegung auf Bettung bei konventioneller Grabenverfüllung	9
Bild 5:	Rohreinbau und Lagesicherung bei flüssiger Grabenverfüllung	9
Bild 6:	Konventionelle Verfüllung der Leitungszone	10
Bild 7:	Einbau des fließfähigen Verfüllmaterials	10
Bild 8:	Rückbauzustand der konventionellen Grabenverfüllung	11
Bild 9:	Rückbauzustand der flüssigen Grabenverfüllung	11
Bild 10:	E_{v2} -Werte im Erdbau nach den Anforderungen der ZTV E-StB (<i>Schade, 2010</i>).....	12
Bild 11:	Endzustand der konventionellen Grabenverfüllung	13
Bild 12:	Endzustand der flüssigen Grabenverfüllung	13
Bild 13:	Flüssigkeit zwischen zwei parallelen Platten, die sich mit der Relativgeschwindigkeit U gegeneinander bewegen (<i>Tanner, 2000</i>)	17
Bild 14:	Fließkurven von Flüssigkeiten ohne und mit Fließgrenze (<i>Hillmeier und Buchenau, 2001</i>)	17
Bild 15:	Einfluss auf das Fließverhalten hochkonzentrierter Suspensionen (<i>Ferraris und de Larrard, 1998</i>)	20
Bild 16:	Flüssigkeitsströmung in den Porenkanälen – mikroskopische Betrachtungsweise der Stabilität einer Suspension	21
Bild 17:	Angreifende Kräfte an einer in einem Bingham-Fluid befindlichen Kugel; zur besseren Übersicht wurden die angreifenden Kräfte aus dem Schwerpunkt der Kugel seitlich versetzt (<i>Wüstholtz, 2005</i>).....	22
Bild 18:	Ballon-Experiment in Newtonscher (links) und Bingham'scher (rechts) Flüssigkeit	23
Bild 19:	Versuchsanordnung zur Messung der Auftriebswirkung im Labor	24
Bild 20:	Laborversuch zur Auftriebswirkung von Wasser.....	25
Bild 21:	Laborversuch zur Auftriebswirkung von Suspensionen.....	25
Bild 22:	Niedriger Suspensionsspiegel oberhalb des Rohres	26
Bild 23:	Präzisions-Flügelschergerät (<i>Wille Geotechnik, [online]</i>)	27
Bild 24:	Pendelgerät nach Weiß zur Ermittlung der Fließgrenze von Bentonitsuspensionen (<i>DIN 4127, 1986</i>)	28
Bild 25:	Vertikalpendelgerät (Modell rechts und Konstruktionszeichnung links)	31
Bild 26:	Auswertung der Messungen mittels Schergerät und modifiziertem Pendelgerät	31
Bild 27:	Räumlicher Fließbereich einer umströmten Kugel	32
Bild 28:	Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden – Sicherheit gegen den Schlitz gefährdende Gleitflächen im Boden unter Ansatz der Membranwirkung (<i>DIN 4126</i>).....	34

Bild 29: Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden – Sicherheit gegen den Schlitz gefährdende Gleitflächen im Boden unter Berücksichtigung der Strömungskraft im Gleitkörper (<i>DIN 4126, 2008</i>)	35
Bild 30: Eindringung der Suspension und Kraftübertragung auf das Korngerüst (<i>DIN 4126, 2008</i>)	35
Bild 31: Eindringung der Suspension und Kraftübertragung auf das Korngerüst (<i>Walz, 1989</i>)	37
Bild 32: Nachweis der inneren Standsicherheit in Form des Einzelkornnachweises nach Weiß (mikroskopische Betrachtungsweise) (<i>Walz, 1989</i>)	37
Bild 33: Lockerste Lagerung der Kugelpackung als Ansatz für den ungünstigsten Gleitflächenwinkel im Boden (<i>Walz, 1989</i>)	38
Bild 34: Suspensionsspiegel nach Verfüllen des verbauten Grabens	39
Bild 35: Suspensionsspiegel nach Rückbau der Dielen des Kammerdielenverbaus	39
Bild 36: Zeitersparnis beim Einsatz von fließfähigem Verfüllmaterial (HK = Hauptkanal, HA = Hausanschluss) (<i>Günthert, 2006</i>)	41
Bild 37: Modifiziertes Pendelgerät gemäß <i>DIN 4127 (1986)</i>	44
Bild 38: Kraftwirkung auf eine in einer Suspension verschobenen Kugel (<i>Gerlach, 1999</i>)	44
Bild 39: Prinzip der Fließgrenzenmessung mit der Kugelharfe nach von Soos (<i>DIN 4126</i>)	46
Bild 40: Ausbreittisch, Hubkurve und Stampfer (<i>DIN EN 459-2</i>)	47
Bild 41: Flüssigbodenprobe nach Abziehen des Setztrichters	47
Bild 42: Flüssigbodenprobe nach Aufbringen der 15 Hubstöße	47
Bild 43: Variation des Wassergehalts (Ausbreitmaße nach Abziehen des Setztrichters) bei 100% Zementgehalt und 100% Compoundgehalt	48
Bild 44: Variation des Wassergehalts (Ausbreitmaße nach Aufbringen der 15 Hubstöße) bei 100% Zementgehalt und 100% Compoundgehalt	49
Bild 45: Wasserfilm auf einer Flüssigbodenprobe	49
Bild 46: Variation der Bindemittelzusammensetzung (Ausbreitmaße nach Abziehen des Setztrichters) bei 100% Wassergehalt	50
Bild 47: Variation der Bindemittelzusammensetzung (Ausbreitmaße nach Aufbringen der 15 Hubstöße) bei 100% Wassergehalt	50
Bild 48: Maße des Konus für den Ausbreittisch (<i>DIN EN 12350, 2009</i>)	51
Bild 49: Aufbau eines üblichen Ausbreittisches (<i>DIN EN 12350, 2009</i>)	52
Bild 50: Mit Flüssigboden gefüllter Konus auf dem Ausbreittisch	52
Bild 51: Ausbreitmaß unmittelbar nach Abziehen des Konus (30 Minuten nach dem Anmischen)	53
Bild 52: Ausbreitmaß nach 15 Schlägen (30 Minuten nach dem Anmischen)	53
Bild 53: Bodenplatte (<i>DIN EN 12350, 2010</i>)	54
Bild 54: Auslauftrichter (<i>DIN EN 12350, 2010</i>)	54
Bild 55: Typischer allgemeiner Aufbau des L-Kastens mit den erforderlichen Maßen (<i>DIN EN 12350, 2010</i>)	55

Bild 56: Lage der Stäbe im L-Kasten (DIN EN 12350, 2010)	55
Bild 57: Blockierring mit engem Spalt (DIN EN 12350, 2010).....	56
Bild 58: Blockierring mit breitem Spalt (DIN EN 12350, 2010).....	56
Bild 59: Schnitt A-A quer durch den Blockierring (DIN EN 12350, 2010).....	57
Bild 60: Das Vertikalpendelgerät	58
Bild 61: Die Ausgangssituation des Pendelgeräts – (1) = äußerer Zylinder, (2) = innerer Zylinder.....	58
Bild 62: Befüllen des äußeren Zylinders mit Wasser - Auftrieb des Gewichts.....	59
Bild 63: Zustand nach vollständiger Befüllung des äußeren Zylinders.....	59
Bild 64: Schlaggabel.....	59
Bild 65: Wasser wird abgelassen - Erreichen der maximalen Scherfestigkeit.....	59
Bild 66: Messungsende - Flügel knapp unterhalb der Oberfläche	59
Bild 67: Aufzeichnungen des Datenschreibers mit daraus resultierender Hüllkurve	60
Bild 68: Flügelschergerät für Laboruntersuchungen	61
Bild 69: Abmessungen des verwendeten Flügels	62
Bild 70: Vergleich der verschiedenen Ansätze zur Bestimmung der Scherfestigkeit	63
Bild 71: Schematische Darstellung der von Flüssigboden umgebenen Kugel.....	64
Bild 72: Vergleich von Flügelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, Originalrezept).....	65
Bild 73: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (4 mm Größtkorn, Originalrezept)....	65
Bild 74: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (2 mm Größtkorn, Originalrezept)	66
Bild 75: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, 100% Wassergehalt, 0% Zementgehalt, 100% Compoundgehalt).....	67
Bild 76: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, 100% Wassergehalt, 100% Zementgehalt, 0% Compoundgehalt).....	67
Bild 77: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, 100% Wassergehalt, 50% Zementgehalt, 100% Compoundgehalt).....	68
Bild 78: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, 100% Wassergehalt, 100% Zementgehalt, 50% Compoundgehalt).....	68
Bild 79: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, 100% Wassergehalt, 100% Zementgehalt, 25% Compoundgehalt).....	69
Bild 80: Vergleich von Flügel-, Kugelpendel und Flügelschergerät (8 mm Größtkorn, 100% Wassergehalt, 0% Zementgehalt, 0% Compoundgehalt).....	69
Bild 81: Variation der Bindemittel (Messungen mit dem Pendelgerät) mit W. = Wassergehalt, Z. = Zementgehalt, C. = Compoundgehalt	70
Bild 82: Variation des Compound-Gehalts (Messungen mit dem Pendelgerät) mit W. = Wassergehalt, Z. = Zementgehalt, C. = Compoundgehalt	71
Bild 83: Variation des Zementgehalts (Messungen mit dem Pendelgerät) mit W. = Wassergehalt, Z. = Zementgehalt, C. = Compoundgehalt	72

Bild 84: Rohr und Hüllzylinder als Modell für den Umströmungsbereich des Rohres	76
Bild 85: Eingesetztes Modell für den Auftriebsversuch.....	78
Bild 86: Technische Zeichnung des Versuchsaufbaus	79
Bild 87: Kraftmessdose.....	79
Bild 88: Staurohr	79
Bild 89: Einfüllen der Bentonitsuspension	80
Bild 90: Wanne über dem Versuchsaufbau.....	80
Bild 91: Schüttrohr	80
Bild 92: Umfließvorgang am Rohr	81
Bild 93: Rohrumströmung bei Bentonitsuspension	81
Bild 94: Rohrumströmung bei Flüssigboden	81
Bild 95: Ausgeglichene Spiegellage bei Wasser	82
Bild 96: Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Druckhöhe (Wasser).....	83
Bild 97: Laborversuche zur Auftriebswirkung von Bentonitsuspensionen	84
Bild 98: Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Druckhöhe (Bentonitsuspension).....	85
Bild 99: Laborversuche zur Auftriebswirkung von Flüssigboden	86
Bild 100: Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Druckhöhe (RSS®-Flüssigboden)	87
Bild 101: Draufsicht Versuchsfeld.....	89
Bild 102: Grundriss des Versuchsaufbaus	89
Bild 103: Schnitt des Versuchsaufbaus	90
Bild 104: Einbringen der Verankerung für die Rohraufleger	91
Bild 105: Rohraufleger zur Auftriebs- und Lagesicherung	91
Bild 106: Verbaubox in der Versuchsgrube	91
Bild 107: Kraftmessdose am Auflager.....	92
Bild 108: Druckdose (rechts hinten) und Lagemesser (mittig auf Rohr)	92
Bild 109: Befüllen der Betonbombe aus dem Fahrmischer	92
Bild 110: Verfüllen des Rohrgrabens mittels Betonbombe	92
Bild 111: Scherfestigkeitsentwicklung des RSS®-Flüssigbodens - Messung mittels Pendelgerät	93
Bild 112: Erhebung Rückstellproben für Messung der Fließgrenze im Labor	94
Bild 113: Anschlagen der Verbaubox am Portalkran	94
Bild 114: Ziehen der Verbaubox	95
Bild 115: Graben nach Ziehen des Verbaus	95
Bild 116: Messergebnisse der Kraftmessdosen über die Zeit (RSS®-Flüssigboden)	96
Bild 117: Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Druckhöhe (RSS®-Flüssigboden)	96

Bild 118: Großmaßstäblicher Laborversuch zur Auftriebswirkung von Flüssigboden	97
Bild 119: Grabenaushub vor Kopf bei vorübergehend standfesten Bodenverhältnissen	100
Bild 120: Auffüllen des Suspensionsverlustes beim Ziehen der Verbaugeräte	102
Bild 121: Grabenverbau mit Stahlplatten als Längenausgleich und Querschott vor Kopf (links) und Rohrleitung mit Verschluss und Querschott (rechts)	102
Bild 122: Querschott mit Sand-/Kieshinterfüllung (links), Anschluss an Folgerohr (rechts)	103
Bild 123: Konventionelle Verfüllung am Haltungsanfang einer Kanalleitung	103
Bild 124: Flügelpendel im Baustelleneinsatz	104
Bild 125: Messung der Scherfestigkeit mit dem Flügelpendel unter Verwendung verschiedener Materialien	105
Bild 126: Anordnung der Ankerpfähle zur Auftriebssicherung	108
Bild 127: Eindringung der Suspension und Kraftübertragung auf das Korngerüst (Walz, 1989)	109
Bild 128: Kraftmessdose am Kopf eines Ankerpfahls	110
Bild 129: Baustellenversuch zur Auftriebswirkung von flüssigem Verfüllmaterial	111
Bild 130: Auftriebswirkung der TER-Suspension im Baustellenversuch vom 02.05.2011	111
Bild 131: Statisches System der Baustellenversuche zur Auftriebsmessung	112
Bild 132: Umströmungsvorgang des Rohres auf der Baustelle	113
Bild 133: Abwärts gerichtete Resultierende der Strömungskräfte	113
Bild 134: Ballastierung eines Rohres (Rehau, 2009)	114
Bild 135: Arbeitsablauf bei der Herstellung von Leitungsbänken (S&P GmbH)	115
Bild 136: RSS®-Rohrverlegehilfe (Hillmann, 2009)	116
Bild 137: RSS®-Rohrverlegehilfe (Stolzenburg, 2009)	116
Bild 138: Einbau des Schraubpfahls (a) und Befestigung des Rohres (b) sowie Schema-Skizze der Rückverankerung (c)	117
Bild 139: Ermittelte Ankeranordnung an der Probebaustelle	118
Bild 140: Abmessungen Kegelstumpf eines Zugpfahles	119
Bild 141: Diagramm zur Bestimmung der Geometrie des angehängten Bodenkörpers	120
Bild 142: Ankerausziehversuch	121
Bild 143: Kraftmessung während des Ankerausziehversuchs	121
Bild 144: Vorbohren mit Bohrmeißel (links) und Eindrehen der Anker (rechts)	122
Bild 145: Leichtes Fallgewichtsgerät	122
Bild 146: Lageplan der dynamischen Lastplattendruckversuche	124
Bild 147: Vertikalpendelgerät	128
Bild 148: beispielhafte Ausbildung einer Haltungsbank sowie schematische Darstellung	133
Bild 149: Gewichtsmessung der Suspension mit eingetauchtem Flügelpendel	136

Bild 150: Auswertediagramm für die Ermittlung der Suspensionswichte.....	137
Bild 151: Vertikalpendelgerät im Baustelleneinsatz.....	138
Bild 152: Auswertediagramm für die Ermittlung der Fließgrenze	138
Bild 153: Auswertediagramm für die Ermittlung der Mindest-Fließgrenze	139
Bild 154: Auswertediagramm zur Ermittlung der Rohrwichte	141
Bild 155: Schematische Darstellung einer Haltungsbank.....	142
Bild 156: Auswertediagramm zur Ermittlung der Fließgrenze	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Konsistenzklassen von Frischbeton (<i>DIN 1045, 2008</i>)	53
Tabelle 2: Dichteverteilung und Blutwasserabgabe drei verschiedener Flüssigbodenrezepturen	75
Tabelle 3: Suspensionswichten der verwendeten Verfüllbaustoffe	104
Tabelle 4: Parameter der Zuschläge der verwendeten Verfüllbaustoffe	106
Tabelle 5: Ermittlung der Mindestfließgrenze nach dem Kriterium der Suspensionsstabilität der verwendeten Verfüllbaustoffe	107
Tabelle 6: Effektive Auftriebskräfte der verwendeten Verfüllbaustoffe	108
Tabelle 7: Rechnerische Belastung der Ankerpfähle	108
Tabelle 8: Ermittlung des Größtkorns eines rolligen Bodens nach dem Kriterium der inneren Standsicherheit des Suspensionsgestützten Grabens	109
Tabelle 9: Ergebnisse der dynamischen Lastplattendruckversuche	123
Tabelle 10: Anhaltswerte für die Wiederausbaufähigkeit von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (<i>FGSV, 2010</i>)	125
Tabelle 11: Ergebnisse der Untersuchung zur einaxialen Druckfestigkeit gemäß <i>DIN 18136 (2003)</i> nach 28 bzw. 90 Tagen	125

Verzeichnis der Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m ²
a	In gleichen Abständen ($\pm 0,5$ mm) angeordnete glatte Stäbe	
A _{Boden}	Öffnungsweite des beanspruchten Bodenkörpers an der Geländeoberfläche	m
A _{Rohr}	Querschnittsfläche Rohr	m ²
d	Horizontaler Abstand zwischen zwei Platten	m
d ₁₀	Korngröße bei 10 % Siebdurchgang	m
d ₉₀	Korngröße bei 90 % Siebdurchgang	m
d ₉₅	Korngröße bei 95 % Siebdurchgang	m
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton	
DIN	Deutsches Institut für Normung	
d _{max}	Größtkorn der Suspension	m
d _{Rohr}	Außendurchmesser Rohr	m
D _{Rohr}	Durchmesser Rohr	m
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	
E _{v2}	Verformungsmodul des Bodens bei Wiederbelastung	MN/m ²
E _{vd}	Dynamisches Verformungsmodul	MN/m ²
F	Zugkraft	kN
F _A	Auftriebskraft	kN
f _{A_eff}	Effektive Auftriebswirkung	kN/m
f _{A_stat}	Statische Auftriebswirkung	kN/m
f _{A_τf}	Fließwiderstand bezüglich messbarer Fließgrenze	kN/m
f _{A_Δτf}	Fließwiderstand bezüglich auftriebswirksamer Fließgrenze	kN/m
F _{Ares}	Resultierende Auftriebskraft	kN
F _{A_stat}	Statische Auftriebskraft	kN
F _{A_τf}	Auftriebskraft infolge behinderter Umströmung	kN
f _{A_Δτf}	Fließwiderstand bezüglich auftriebswirksamer Fließgrenze	kN/m

F	Betrag der negativen Gewichtsanzeige auf einer Waage	g
F _B	Gemessene Auflagerkraft Rohr	N
F _{EG-Rohr}	Gewichtskraft Rohr	N
F _G	Gewichtskraft	kN
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen	
f _{Rohr-Füllung}	Gewichtskraft des Rohres bei Wasserfüllung des Rohrquerschnitts	N/m
f _{resultierend}	Resultierende Gewichtskraft	N/m
f _{Aresultierend}	Resultierende Auftriebskraft	N/m
f _{s0}	Druckgefälle	kN/m ³
F _W	Widerstandskraft	kN
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
G _K	Eigenlast der Kugel unter Auftrieb	kN
GOK	Geländeoberkante	
H ₁	Höhe des Frischbetons nach Einbringen	m
H ₂	Höhe des Frischbetons nach Ende der Fließbewegung	m
HA	Hausanschluss	
HK	Hauptkanal	
L	Pfahllänge im tragfähigen Boden	m
L _{Rohr}	Länge Rohr	m
M _{Rohr}	Masse Rohr	kg
NRW	Nordrhein-Westfalen	
ONR	Österreichische Norm-Reihe	
P'	Widerstandskraft	kN
PE	Polyethylen	
PVC	Polyvinylchlorid	
q _a	Streckenlast	N/m
R	Radius Kugel zzgl. der Breite des Kreisringes / Radius Hüllkugel	m
RAL	Reichsausschuss für Lieferbedingungen, heute Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.	

R_{HZ}	Radius Hüllzylinder	m
r	Radius Kugel gemäß <i>Wüstholtz (2005)</i>	m
r_{Korn}	Radius Zuschlagkorn	m
r_{Kugel}	Radius Kugel	m
r_{Pfahl}	Radius des Pfahls	m
r_{Rohr}	Radius Rohr	m
SSM	Stabilisierte Sandmischung	
SVB	Selbstverdichtender Beton	
T	Versuchstemperatur	°C
t	Verfestigungszeit	min
t_{500}	Gemessene Zeit bis der Beton auf einer Bodenplatte ein Ausbreitmaß mit einem Durchmesser von 500 mm erreicht	s
TP-BF StB	Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau	
U	Geschwindigkeit	m/s
$U_{fließ}$	Umfang von Rohr und Hüllzylinder = Grenze Fließbereich	m
WBM	Weimarer Beton-Mörtel	
X	Anteil der Rohrlänge, der abgedeckt werden muss, um die Auftriebswirkung weitestgehend zu verhindern	
$Z_{g,k}$	Grenzzugkraft	N
ZTV E-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau	
α	Winkel abwärts gerichteter Umströmung	
Δh	Differenz der Höhe zwischen Oberkante Blockring und festgelegten Punkten des Betons	m
ΔM	Massendifferenz – gemessen mit dem Vertikalpendelgerät	kg
ρ_F	Dichte Bingham-Flüssigkeit	kg/m ³
ρ_g	Dichte Kugel	kg/m ³
ρ_{Rohr}	Dichte Rohr	kg/m ³
$\rho_{Suspension}$	Dichte Suspension	kg/m ³
τ	Schubspannung	kN/m ²
τ_0	Effektive Fließgrenze	kN/m ²

$\tau_{0,\min}$	Mindestfließgrenze für den Nachweis der Suspensionsstabilität	kN/m^2
τ_f	Gemessene Fließgrenze	kN/m^2
$\tau_{F,\text{erf}}$	Erforderliche Fließgrenze für den Nachweis der inneren Standsicherheit	kN/m^2
$\tau_{f,\min}$	Mindestfließgrenze für den Nachweis der inneren Standsicherheit des suspensionsgestützten Grabens	kN/m^2
$\Delta\gamma_{\text{Korn}}$	Differenzwichte zwischen Suspension und Zuschlag	kN/m^3
$\Delta\gamma_{\text{Rohr}}$	Differenzwichte zwischen Suspension und Rohr	kN/m^3
$\Delta\tau_f$	(Auftriebs-)wirksame Fließgrenze	kN/m^2
ϕ	Relative Feststoffkonzentration	
ϕ_{\max}	Maximale relative Feststoffkonzentration	
γ	Schergeschwindigkeit	$1/\text{s}$
γ	Wichte Suspension	N/m^3
γ_{Boden}	Wichte Boden	N/m^3
γ_{Fluid}	Wichte Fluid	N/m^3
γ_{Korn}	Wichte Zuschlagkorn	N/m^3
γ_{Kugel}	Wichte Kugel	N/m^3
γ_{Pfahl}	Wichte Pfahl	N/m^3
γ_{Rohr}	Wichte Rohr	N/m^3
γ_{Sus}	Wichte Suspension	N/m^3
γ_{Wasser}	Wichte Wasser	N/m^3
η	Viskosität	m^2/s
η_{pl}	Plastische Viskosität der Bingham Flüssigkeit	m^2/s
γ_{Wasser}	Wichte Wasser	N/m^3

1 Einleitung

In den zurückliegenden Jahren wurde der Sanierung und Erneuerung der vorhandenen Entwässerungssysteme eine insgesamt zu geringe Beachtung geschenkt mit der Folge, dass durch die Versäumnisse die Bestandserhaltung gegenüber der Erweiterung vorhandener Systeme eine wachsende Bedeutung gewinnt. Für die Durchführung der erforderlichen Sanierungsmaßnahmen werden in großem Umfang auch vorhandene Oberflächen aufgebrochen und anschließend wiederhergestellt. Um Folgeschäden zu vermeiden, müssen der Bodenaushub, die Arbeitsraumverfüllung und die Wiederherstellung der Oberflächen in hoher Qualität erfolgen, wodurch die Kosten für diese Leistungen, insbesondere in innerstädtischen Bereichen, den weitaus größten Teil der erforderlichen Investitionen ausmachen können. Hieraus ergibt sich bei den Sanierungsmaßnahmen ein erhebliches wirtschaftliches Einsparpotenzial im Bereich des Tiefbaus.

Die Randbedingungen in innerstädtischen oder stark industriell geprägten Bereichen, mit einer Vielzahl kreuzender Leitungen und oftmals beengten Platzverhältnissen, tragen zu einer hohen Fehleranfälligkeit der Ausführung bei und halten die Kosten für den Kanalbau insgesamt auf einem hohen Niveau. Dies gilt sowohl für öffentliche Flächen als auch für private Grundstücke. Da grabenlose Verfahren zunehmend, aber nicht immer eingesetzt werden können, sind bei der Suche nach kostengünstigen Sanierungsverfahren auch die Innovationen im Bereich der offenen Kanalverlegung zu betrachten.

Seit einigen Jahren wird in Deutschland die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung angewendet. Dabei werden in steigendem Umfang in Baugruben und Gräben, im Einbauzustand fließfähige, selbstverdichtende und anschließend selbstverfestigende Verfüllmaterialien auf der Basis von Baustoff-Bindemittel-Gemischen oder Boden-Bindemittel-Gemischen eingesetzt. Diese Füllmaterialien werden je nach Hersteller und Literaturquelle als Flüssigboden, Boden-Verfüllmörtel oder stabilisierte Sandmischung bezeichnet und im Kanalbau überwiegend zur Verfüllung der Leitungszone, teilweise auch zur Herstellung der Hauptverfüllung, verwendet.

Im Hinblick auf die Kanalsanierung im öffentlichen und privaten Bereich sind bei konsequentem und fachgerechtem Einsatz dieser Methode folgende Vorteile gegenüber der herkömmlichen offenen Bauweise zu identifizieren:

- Durch einen optimierten Arbeitsablauf mit geringeren Grabenbreiten und einer schnelleren Grabenverfüllung sind Kosteneinsparungen möglich.
- Durch die flüssige Arbeitsraumverfüllung ergibt sich eine ideale Bettung, die einer mechanischen Schädigung des neu eingebauten Rohres während seiner Nutzungsdauer entgegenwirkt.
- Durch eine geeignete Auswahl des Verfüllmaterials kann eine zusätzliche Barriere gegenüber Abwasserexfiltration aus der Rohrleitung sowie Grundwasserinfiltration in die Rohrleitung geschaffen werden. Damit entsteht eine zusätzliche Sicherheit, die auch bei Schäden an der Rohrleitung oder ihrer Verbindungen die Systemdichtheit gewährleistet.
- Durch die flüssige Arbeitsraumverfüllung können Hohlräume im Bereich von kreuzenden Leitungen (Zwickelverfüllung) sowie beim Ziehen des Verbaus (Verbauspur) vermieden werden. Im Vergleich zu der herkömmlichen Leitungsverfüllung gibt es daher praktisch keine Nachsetzungen und keine Auswirkungen auf die Oberflächenbefestigung bzw. angrenzenden Bauwerke.

Im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise erscheint unter dem Aspekt der Kanalsanierung die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung deshalb besonders nachhaltig. Dennoch hat sie sich diese Bauweise bisher noch nicht flächendeckend durchgesetzt, was vor allem auf folgende Punkte zurückzuführen ist:

- Im Rahmen der Planung von Maßnahmen mit flüssiger Arbeitsraumverfüllung sind noch einige Fragen unbeantwortet. Dies betrifft vorrangig die ingenieurmäßigen Nachweise der auf die Rohre beim Einbau wirkenden Kräfte, die Bemessung der notwendigen Auftriebssicherung sowie die Sicherstellung der Stabilität der Rohrgräben im Einbauzustand.
- Es fehlen geeignete Methoden zur Qualitätssicherung der eingesetzten Materialien unter Praxisbedingungen auf der Baustelle.
- Es fehlt ein Praxisleitfaden, der dem planenden Ingenieur sowie der ausführenden Baufirma die Anwendung der Methode herstellerunabhängig ermöglicht.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden Lösungsansätze zu den offenen Punkten entwickelt, auf deren Grundlage erwartet werden kann, dass zukünftig eine nachhaltigere und wirtschaftlichere Sanierung von Abwasserleitungen durch eine stärkere Verbreitung der Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung möglich wird.

Die relativ „technologie-intensive“ Methode der flüssigen Grabenverfüllung ist gegenüber der konventionellen Bauweise insbesondere bei Bauaufgaben unter schwierigen Randbedingungen vorteilhaft. Bezogen auf die Grundstücksentwässerung sind solche schwierige Randbedingungen meist bei Anschlussleitungen in innerstädtischen Bereichen mit entsprechend sensiblen Oberflächenstrukturen sowie Leitungssystemen innerhalb stark verdichteter Bereiche mit vielen unterirdischen Ver- und Entsorgungsleitungen gegeben. In ländlichen Bereichen bzw. in Bereichen mit unbefestigten (natürlichen) Oberflächen und ausreichend Bewegungsraum um die zu sanierenden Entwässerungssysteme werden die wirtschaftlichen Vorteile dagegen kaum darstellbar sein. Es bleiben jedoch die qualitativen Vorteile einer besseren Leitungsbettung sowie einer zusätzlichen Barrierefunktion bei geeigneter Wahl des Verfüllmaterials.

In den einzelnen Phasen der Leitungsverlegung werden bei der Bauweise der flüssigen Grabenverfüllung sehr unterschiedliche Anforderungen an den zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoff gestellt.

Während der Grabenverfüllung...

soll das Verfüllmaterial ausreichend fließfähig sein, um die Rohrleitungen vollständig zu umschließen und kleinere Hohlräume zwischen bestehenden Leitungen zu füllen. Das Material muss selbstverdichtend sein, bei gleichzeitig hohem Widerstand gegen Entmischen. Dabei ist ein minimaler Strömungswiderstand anzustreben, ohne dass durch eine zu geringe Fließgrenze der Suspension gröbere Gesteinskörnungen absinken.

Der Vorgang der fließenden Grabenverfüllung stellt für die Rohrleitung einen maßgebenden Lastfall dar. Die Rohre sind in diesem Zustand gegen Auftrieb zu sichern, wobei die Größe der effektiven Auftriebskraft nicht ausschließlich durch die Wichte der Suspension, sondern maßgeblich durch deren Fließgrenze bestimmt wird. Hierdurch kann die effektive Beanspruchung des Rohres erheblich über dem Ansatz des statischen Auftriebs liegen. Die genaue Bestimmung dieser Kräfte ist Voraussetzung für den Nachweis der erforderlichen Auftriebssicherung (vgl. Kapitel 6) und die Ermittlung der effektiven Belastung des Rohres.

Während des Rückbaus der Grabensicherung...

soll die Verbauspur durch nachfließendes Verfüllmaterial geschlossen werden, um Auflockerungen des anstehenden Bodens und Setzungen an der Oberfläche zu vermeiden. Gleichzeitig muss das noch fließfähige Material in dieser Phase in der Lage sein, den unverbauten Graben ausreichend zu stützen und Nachbrüche in den Graben hinein zu vermeiden. Ein rechnerischer Nachweis für diesen Zustand des unverbauten, flüssigkeitsgestützten Grabens wird bisher selten gefordert und im Rahmen der Verbaustatik zumeist auch nicht berücksichtigt. Obwohl das Problem von Nachbrüchen in den flüssigkeitsgestützten Graben aus der Baupraxis bekannt ist, gibt es in den gültigen Normen und Empfehlun-

gen noch keine einheitliche Regelung für einen entsprechenden Nachweis. Sinnvollerweise sollte sich ein solcher Nachweis an den Vorgaben der *DIN 4126 (2008)* zur Schlitzwandbauweise orientieren, wobei Anpassungen an die besonderen Eigenschaften der flüssigen Verfüllbaustoffe erforderlich sind (vgl. Kapitel 3.1).

Nach dem Ziehen des Verbaus...

soll das Verfüllmaterial möglichst zeitnah eine für die weiteren Arbeiten ausreichende Festigkeit entwickeln. Eine einfache Begehbarkeit des Materials ist hierbei oftmals nicht hinreichend, da spätestens bis zur Freigabe der Oberflächen für den Verkehr oder sonstige Nutzungen die Sollfestigkeit der Grabenfüllung erreicht sein muss, um Schäden und irreversible Verformungen in einer frühen Phase nach Fertigstellung zu vermeiden.

Im Endzustand...

sollen die Eigenschaften der Grabenverfüllung im Idealfall denen des anstehenden Bodens entsprechen, so dass ein unterschiedliches Last-Verformungsverhalten von Boden und Grabenfüllung keine negativen Auswirkungen auf die Rohrleitungen und die Oberflächen hat.

Eine ausgeprägte Nacherhärtung ist, auch für spätere Aufgrabungen, ungünstig. In diesem Zusammenhang wird oftmals die Spatenlösbarkeit als Maßstab herangezogen. Für die Einhaltung dieses Kriteriums werden z. B. im Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (*FGSV, 2010*) Maximalwerte für die einzuhaltenden Druckfestigkeiten in Abhängigkeit des Probenalters angegeben.

Aus den verschiedenen Bauphasen der Leitungsverlegung ergeben sich somit teilweise konkurrierende Anforderungen an das Material. Aufgabe der Planung ist es, die maßgebenden Parameter des Baustoffes so zu wählen, dass ein für die Baumaßnahme optimal geeignetes Verfüllmaterial zur Verfügung steht. Die Bauüberwachung hat die Einhaltung der vorgegebenen Parameter zu kontrollieren und für den Hersteller besteht die besondere Herausforderung in der gezielten Beeinflussung der Fließfähigkeit, bei gleichzeitig hohem Widerstand gegen Entmischen und einer schnellen Festigkeitsentwicklung bei beschränkter Endfestigkeit. Konkrete Angaben und Entscheidungshilfen sollen als Leitfaden formuliert, die bisherigen Vorschriften und Empfehlungen ergänzen.

Insgesamt bietet die Methode der flüssigen Grabenverfüllung bei optimaler Anwendung ein erhebliches Potenzial an wirtschaftlichen Vorteilen, wobei nicht nur die Kosten der Kanalverlegung betrachtet werden sollten. Zu den positiven Auswirkungen auf Kanal und Oberflächen, die sich durch die ideale Bettung der Rohrleitungen bei der Verwendung fließfähiger Verfüllmaterialien ergeben, finden sich in der Literatur bereits umfangreiche Untersuchungen, die belegen, dass dieses Bauverfahren insbesondere unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit und somit einer Reduzierung des zukünftigen Sanierungsbedarfs zu bewerten ist.

Mit der Zielsetzung, bestehende Unsicherheiten bei der Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung abzubauen und dem Verfahren insgesamt zu einer breiteren Akzeptanz zu verhelfen, hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW), vormals ‚Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW‘, die Dr. Pecher AG mit der federführenden Bearbeitung des Teilauftrages Nr. 5 ‚Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung‘ des Untersuchungs- und Entwicklungsvorhabens ‚Kanalsanierung: Entwicklung innovativer Konzeptionen und Verfahren zur Sanierung von öffentlichen und privaten Kanälen mit dem Schwerpunkt Grundstücksentwässerung‘ beauftragt.

2 Zielsetzung und Struktur der Dokumentation

Im Rahmen zahlreicher Veröffentlichungen (z. B. *Triantafyllidis und Arsic, 2009*) wurde die Eignung fließfähiger Verfüllbaustoffe als Bettungsmaterial untersucht, wobei die Eigenschaften des noch flüssigen Materials bisher verhältnismäßig wenig Beachtung fanden. Diese Lücke können teilweise Untersuchungen zum Verhalten von Frischbetonen, vor allem von selbstverdichtenden Betonen (z. B. *Wüstholz, 2005* und *Saak et al., 2001*) schließen. Die besonderen Randbedingungen und Anforderungen bei der Verwendung des Materials im Rohrleitungsbau finden hier jedoch – erwartungsgemäß – keine ausdrückliche Berücksichtigung.

Bestrebungen eine hohe Qualität bei der Herstellung und der Verarbeitung von selbstverdichtenden Verfüllmaterialien zu gewährleisten, sind insbesondere aus dem Bereich der als Flüssigboden bezeichneten Materialien bekannt. Dementsprechend beziehen sich die vorgeschlagenen bzw. bereits eingeführten Regelungen zum Teil auf die spezifischen Eigenschaften dieser Materialgruppe. Die grundsätzliche Eignung auch weiterer Materialien belegen u. a. Untersuchungen von *Günther (2006)* und *Kisselbach (1999)*. Daher sollte die prinzipiell begrüßenswerte Einführung eines Gütezeichens des Instituts für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL-Gütezeichen) speziell für Flüssigboden noch nicht als Argument gegen andere Materialien betrachtet werden und kann somit nicht als universeller Maßstab für die Qualität aller fließfähiger Verfüllbaustoffe gelten.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich generell auf die Methode der flüssigen Grabenverfüllung ohne Wertung oder Ausschluss einzelner Produkte. Die bisherigen Erkenntnisse hierzu werden zusammengefasst, einige notwendige Ergänzungen geleistet und schließlich in einer baupraktisch nutzbaren Form (Entwurf von praxisnahen Empfehlungen zur Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung) dargestellt.

Bei der baupraktischen Verwendung fließfähiger Verfüllmaterialien ergibt sich insbesondere beim Einbauvorgang eine erhöhte Fehleranfälligkeit. Gleichwohl sind die Eigenschaften des verfestigten Materials ebenfalls von großer Bedeutung, stehen aber nicht im Fokus der vorliegenden Ausarbeitung. In dieser Hinsicht wird auf die umfangreiche Literatur zum Themenbereich verwiesen.

Zielsetzung des Projektes ist die Minderung vorhandener Unsicherheiten bei der Verwendung fließfähiger Verfüllmaterialien im Grabenbau. Hierzu werden Untersuchungen insbesondere zur Stabilität der Suspensionen, zur effektiven Auftriebssicherung, zur Belastung der Rohre beim Einbau und zur Stützwirkung der Verfüllbaustoffe im Rückbauzustand des unverbauten Grabens durchgeführt.

Eine quantitative Beschreibung der Eigenschaften fließfähiger Verfüllmaterialien und der genannten Effekte setzt die Kenntnis der maßgebenden Parameter des Baustoffes voraus. Als einer der wichtigsten Parameter der untersuchten Suspensionen erweist sich die Fließgrenze τ_f , für deren zuverlässige Bestimmung auch unter Baustellenbedingungen ein neues Messverfahren entwickelt und das zugehörige Messgerät erprobt wurde.

Die im Zuge der Methode der flüssigen Grabenverfüllung durchgeführten Laborversuche, klein- und großmaßstäblichen Modellversuche sowie die baustellenbegleitenden Untersuchungen im Rahmen der Versuchsbaustelle „Schluchtstraße“ in Wuppertal werden im vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert und ausgewertet. Das neu entwickelte Messverfahren wird eingehend beschrieben und das Messgerät in Vergleichsversuchen mit geeigneten Laborgeräten sowie im Baustelleneinsatz erprobt.

Für die Labor- und Modellversuche sowie teilweise für die Baustellenversuche wird zunächst ein Flüssigbodenmaterial der Firma ENREBA Neuss GmbH verwendet, dessen spezielle Eigenschaften kurz beschrieben werden. Im Rahmen der Versuchsbaustelle werden schließlich neben dem genannten Flüssigbodenmaterial noch zwei weitere fließfähige Verfüllbaustoffe der Firmen TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG (Sprockhövel) und CEMEX Deutschland AG (Düsseldorf) verwendet.

In klein- und großmaßstäblichen Versuchen wird die Auftriebswirkung von Suspensionen bei der flüssigen Grabenverfüllung untersucht. Im Rahmen der messtechnischen Begleitung der Kanalbaumaßnahme „Schluchtstraße“ in Wuppertal werden die Baustellentauglichkeit der Messverfahren und die tatsächlichen Krafteinwirkungen auf die zu verlegenden Rohre während der Einbauphase ermittelt.

Aufbau und Struktur der Dokumentation

Die Dokumentation des Projektes kann insgesamt in 3 Bereiche mit den nachfolgend beschriebenen Hauptthemen eingeteilt werden:

Bereich 1: Zielsetzung und Systematik der Untersuchungen sowie grundlegende Ausführungen zur Methode der flüssigen Grabenverfüllung (Kapitel 3)

- Grundlagen der flüssigen Grabenverfüllung und der Rheologie sowie Eigenschaften flüssiger Verbaustoffe (Kapitel 3.1 bis 3.4)
- Standsicherheitsnachweis des offenen Grabens (Kapitel 3.5)
- Wirtschaftliche Aspekte (Kapitel 3.6)

Bereich 2: Laboruntersuchungen – Entwicklung sowie Erprobung eines Baustellenmessgerätes und Versuche zum Materialverhalten von fließfähigen Verfüllbaustoffen (Kapitel 4 bis 7)

- Fließfähige Verfüllbaustoffe – Anwendungsfall und Messung relevanter Parameter (Kapitel 4.1 bis 4.2)
- Erprobung des Vertikalpendelgerätes und Untersuchungen zur Stabilität sowie Auftriebswirkung von Suspensionen – Anwendung im Rohrleitungsbau (Kapitel 5 bis 6)
- Praxis-Versuche: Kanalbaumaßnahme an der Schluchtstraße in Wuppertal (Kapitel 7)

Bereich 3: Zusammenfassende Darstellung (Kapitel 8)

- Entwurf eines Praxis-Leitfadens

3 Grundlagen der flüssigen Grabenverfüllung

3.1 Die Methode der flüssigen Grabenverfüllung

In Österreich werden fließfähige Verfüllmaterialien bereits seit den 1980er Jahren zur Grabenverfüllung eingesetzt. In einer Vielzahl von Untersuchungen (z. B. *Kisselbach, 1999*) wurde die Methode der flüssigen Grabenverfüllungen untersucht, mit dem Ergebnis, dass die Verwendung fließfähiger Verfüllmaterialien gegenüber der konventionellen Grabenverfüllung eine Reihe von Vorteilen aufweist. Einer der bedeutendsten Vorteile der flüssigen Einbringung der Grabenverfüllung ist die Gewährleistung einer weitgehend gleichmäßigen Bettung der Leitungen, wodurch später eine ideale Lastabtragung der Rohre ermöglicht und zukünftigen Schäden vorgebeugt wird. Des Weiteren kann durch den Entfall einer Verdichtung der Grabenverfüllung in der Leitungszone die Belastung der Rohre im Einbauzustand reduziert werden und es besteht die Möglichkeit, geringere Grabenbreiten auszuführen, wodurch neben den technischen Vorteilen auch Kosteneinsparungen möglich sind. Voraussetzung hierfür sind allerdings günstige Randbedingungen für den Einsatz von Flüssigmaterial und optimale Bauabläufe.

Für den Straßenoberbau stellt insbesondere die nachträglich durchzuführende, offene Verlegung von Leitungen, z. B. im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen, eine Störung des „Boden-Fahrbahn“-Systems dar. Gleiches gilt für andere Oberflächengestaltungen, wie z. B. Hofflächen, Wege etc. Dabei birgt die konventionelle Variante gegenüber der flüssigen Grabenverfüllung grundsätzlich ein höheres Schadensrisiko (*Kisselbach, 1999*). Durch Unsicherheiten im Umgang mit fließfähigem Verfüllmaterial auf der Baustelle kann es jedoch zu vermeidbaren Fehlern mit der Folge einer generellen Diskreditierung dieses innovativen Bauverfahrens kommen.

Die wesentlichen Arbeitsschritte der konventionellen und der flüssigen Grabenverfüllung können in sieben nachfolgend erläuterten Phasen zusammengefasst werden.

3.1.1 Aufbruch der Oberfläche

Beim Trennen der asphaltierten Oberfläche von Straßen, Wegen und Plätzen vor Aushub des Leitungsgrabens wird die Asphaltdecke in nicht biegesteif miteinander verbundene Abschnitte unterteilt, was eine maßgebliche Änderung des Tragverhaltens der Asphaltdecke zur Folge hat (Bild 1). Die auf den Unterbau gebettete Decke verliert im Bereich des Eingriffs die Fähigkeit, (Rad-)Lasten großflächig zu verteilen und gleichmäßig in den Unterbau einzuleiten. Durch die frei verformbaren Ränder der Deckenabschnitte entsteht ein im Vergleich zu den ungestörten Bereichen wesentlich ungünstigerer Lastübertragungsmechanismus. Das Ausmaß dieser Beeinträchtigung wird bei der Betrachtung deutlich, dass die Mehrzahl der Leitungsgräben in Fahrbahnlängsrichtung unmittelbar neben den Radspuren verläuft (*Kisselbach, 1999*).

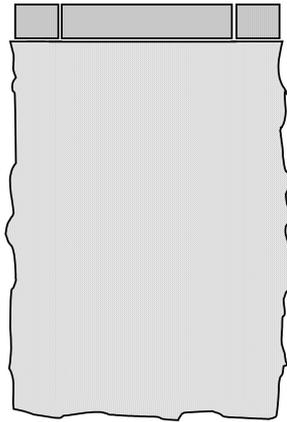


BILD 1: TRENNEN DER FAHRBAHNDECKE VOR AUSHUB DES GRABENS

3.1.2 Aushub des Leitungsgrabens

Der Bodenaushub im Bereich des Leitungsgrabens erfolgt in der Regel voreilend zur Grabensicherung und führt zu einer Störung des Spannungszustandes im Boden (Bild 2). Durch die Abgrabung kommt es zu irreversiblen Lastumlagerungen und Auflockerungen im Bereich der Grabenwände und in der Folge zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Bodens. Die Ausdehnung der Störzone ist abhängig von der Aushubtiefe, der Grabengeometrie, der Art und dem Zeitpunkt der Grabensicherung sowie der konstruktiven Ausbildung der Oberflächenbefestigung.

Die Störung des Bodengefüges durch den Leitungsgraben kann bei unbefestigten Oberflächen oder bei biegeweichen Oberflächenbefestigungen unter der Beeinflussung von unmittelbar neben dem Leitungsgraben einwirkenden Verkehrs- und sonstigen Lasten zu Rissbildungen parallel zur Grabenrichtung und Bodenausbrüchen führen. Art und Umfang der möglichen Schäden hängen von den Eigenschaften des anstehenden Bodens ab.

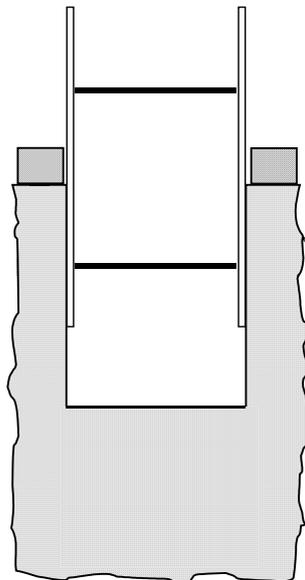


BILD 2: AUSHUB DES LEITUNGSGRABENS

3.1.3 Grabenverbau

Auch Gräben in zeitweise standfestem Boden sind nach den maßgebenden Vorschriften normgerecht zu sichern. Von unverbauten oder unsachgemäß gesicherten Baugruben und Gräben geht ein erhebliches technisches und wirtschaftliches Risiko aus. Bei Planung und Ausführung des Verbaus sind neben dem Endzustand (Bild 3) auch Vor- und Rückbauzustände zu beachten. Insbesondere bei der Verwendung von flüssigem Verfüllmaterial gibt es noch erheblichen Konkretisierungsbedarf der einschlägigen Normen und Richtlinien.

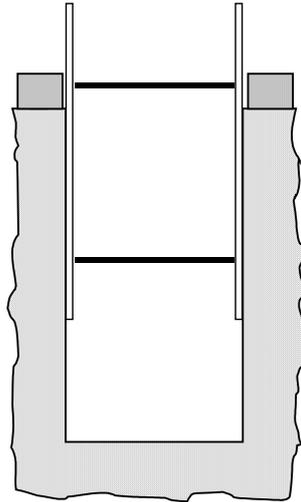


BILD 3: ENDGÜLTIGER GRABENVERBAU

3.1.4 Rohrverlegung

Die Verlege- und Einbaubedingungen für Rohre in offener Bauweise sind für die konventionellen Verfahren in den maßgebenden Regelwerken sowie Richtlinien eindeutig und detailliert festgelegt. Darin wird im Allgemeinen gefordert, dass die Leitung entsprechend ihrer ganzen Länge auf einer geeigneten Bettung aufliegt (Bild 4). Die Bettung ist so auszubilden, dass Längsbiegungen der Leitung und Punktlasten auf die Leitung vermieden werden (*Kisselbach, 1999*).

Die flüssige Grabenverfüllung wird in den allgemeingültigen Vorschriften und Regelwerken teilweise immer noch als Sonderbauweise behandelt. Die Vorgaben sind dementsprechend allgemein gehalten und wenig konkret, so wird beispielsweise darauf hingewiesen, dass im Einbauzustand der Lagesicherung des Rohres, insbesondere zur Sicherung gegen Auftrieb, eine entscheidende Bedeutung zukommt (Bild 5). Verbindliche Angaben zu wirksamen Kräften und Vorgaben zur konstruktiven Gestaltung der Auftriebssicherungen sind in den aktuellen Vorschriften allerdings nicht enthalten.

Bezüglich der Stoffgruppe der Boden-Bindemittel-Gemische sei an dieser Stelle auf die zahlreichen Veröffentlichungen, z. B. von *Stolzenburg (2009)* oder *Berger (2009)*, verwiesen, die sich mit der Qualitätssicherung und den Anwendungsrichtlinien für Flüssigböden befassen. Neben vielen wichtigen und grundsätzlichen Erkenntnissen bleiben zahlreiche Aussagen auf die besonderen Eigenschaften von Flüssigböden beschränkt, so dass für die Methode der flüssigen Grabenverfüllung keine Allgemeingültigkeit abgeleitet werden kann. Gleiches gilt auch für die Regelwerke hinsichtlich der stabilisierten Sandmischungen (SSM), die bereits Eingang in die Österreichische Normung (*ONR 23131, 2005*) gefunden haben. Auch diese Empfehlungen nehmen auf spezielle Eigenschaften der betrachteten Stoffgruppe Bezug.

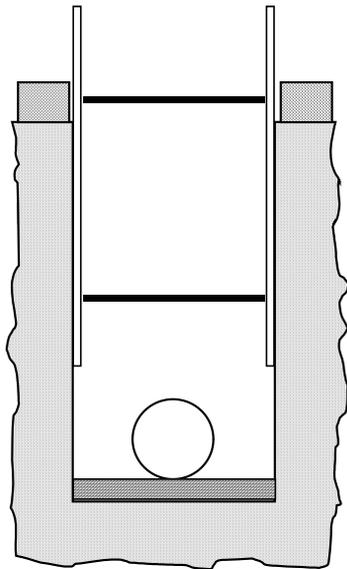


BILD 4: ROHRVERLEGUNG AUF BETTUNG BEI KONVENTI-
ONELLER GRABENVERFÜLLUNG

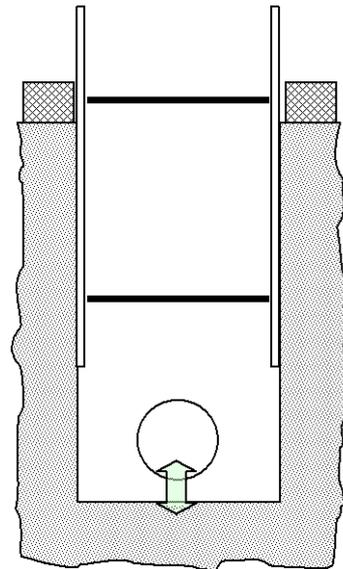


BILD 5: ROHREINBAU UND LAGESICHERUNG BEI FLÜSSIGER
GRABENVERFÜLLUNG

3.1.5 Verfüllung der Leitungszone

Die Verfüllung der Leitungszone hat gemäß den gültigen Vorschriften, Empfehlungen und Richtlinien mit geeignetem Material zu erfolgen, wobei im Allgemeinen gefordert wird, dass Leitungen grundsätzlich in steinfreiem Material einzubetten sind. Die sachgerechte Verfüllung der Leitungszone ist dabei von wesentlicher Bedeutung für eine lange Lebensdauer bzw. langsame Alterungsgeschwindigkeit der Leitung.

Für kleine Rohrdurchmesser und schmale Gräben erfolgt die Verfüllung meist bis zum Planum der Überdeckungszone. Eine Verdichtung des Füllmaterials in der Leitungszone und insbesondere im Zwickelbereich ist hierbei, wenn überhaupt, nur mit leichtem Gerät von Hand möglich. In größeren Gräben und bei entsprechend großen Rohrdurchmessern erfolgt die Verfüllung und Verdichtung der Leitungszone lagenweise.

Aufgrund der Verdichtung wird der Anteil der aus der losen Einbindung resultierenden sowie vorhandenen Hohlräume im Füllmaterial reduziert und eine gleichmäßige Lagerungsdichte geschaffen. Die Verdichtung stellt somit die durch den Aushub des Grabens verloren gegangene horizontale Verspannung teilweise wieder her.

Im konventionellen Tiefbau erfolgt die Verdichtung mechanisch unter Aufwendung einer den Anforderungen entsprechenden Verdichtungsenergie, die im Allgemeinen mit entsprechenden Geräten erzeugt wird. Schäden an Straßenoberflächen im Bereich vorangegangener Leitungsverlegungen oder an den Rohrleitungen selbst sind oftmals auf eine fehlerhafte Verdichtung zurückzuführen.

Schäden resultieren aber nicht ausschließlich aus einer zu geringen Verdichtung der Grabenverfüllung. Eine übermäßige Verdichtungsarbeit kann ebenfalls zu einer Beschädigung der verlegten Leitung führen, was insbesondere bei flexiblen Rohren zu beachten ist.

Bei fehlerhafter Grabenverfüllung können Inhomogenitäten im Bodenaufbau entstehen, die vor allem bei biegeweichen Fahrbahndecken und regelmäßiger Verkehrsbelastung zu Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche führen können. Solche Unebenheiten verursachen eine erhöhte Belastung der Fahr-

zeuge, der Fahrbahn und schließlich auch der erdverlegten Leitungen, da dynamische Beanspruchungen eine Erhöhung der effektiven Radlasten bewirken.

Die erforderliche Verdichtung der eingebrachten Grabenverfüllung wird auch von der Steifigkeit der anstehenden Böden beeinflusst. Je geringer die Steifigkeit des gewachsenen Bodens ist, umso größer wird die erforderliche Verdichtungsarbeit sein, um den Verformungsmodul am Planum der Wiederverfüllzone entsprechend den Vorgaben zu erfüllen (*Kisselbach, 1999*).

Die abschließende Überprüfung der Grabenverfüllung erfolgt in der Regel am Planum der obersten Schicht der Wiederverfüllzone durch Lastplattendruckversuche. In diesen Prüfungen sind die Vorgabewerte für den Verformungsmodul nachzuweisen.

Aus analytischen Simulationen und experimentellen Untersuchungen (*Kammerdiener, 2010*) ist bekannt, dass durch die Verdichtung der Grabenverfüllung beträchtliche Verspannungen des Verfüllmaterials in der Leitungszone auftreten können. Diese Verspannungen führen gegebenenfalls bereits beim Einbau zu Beanspruchungen und entsprechenden Verformungen der Rohre, welche erheblich über den zu erwartenden Werten infolge der Verkehrslasten im Betriebszustand der Leitung liegen können.

Gegenüber den Belastungen im Einbauzustand der konventionellen Rohrverlegung (Bild 6) sind die Einbaubelastungen bei der flüssigen Grabenverfüllung (Bild 7) potenziell geringer, was sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt. Wie die in diesem Bericht dokumentierten Untersuchungen zeigen, können die Belastungen der Rohre durch den Einbauvorgang der fließfähigen Verfüllmaterialien jedoch unterschätzt werden. Um trotz der grundsätzlich schonenderen Einbaumethode Schäden durch eine falsch dimensionierte Lagesicherung der Rohre oder zu hohe Auflagerlasten der Auftriebssicherungen zu vermeiden, sollte in jedem Fall die effektive Auftriebswirkung des Verfüllmaterials auf die Rohre ermittelt werden.

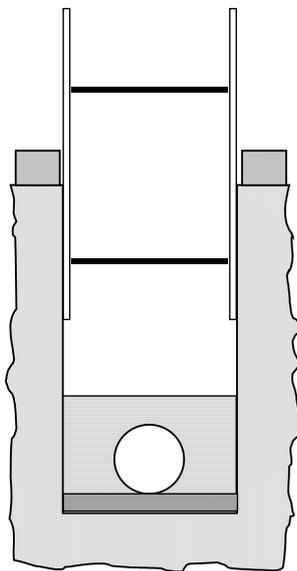


BILD 6: KONVENTIONELLE VERFÜLLUNG DER LEITUNGSZONE

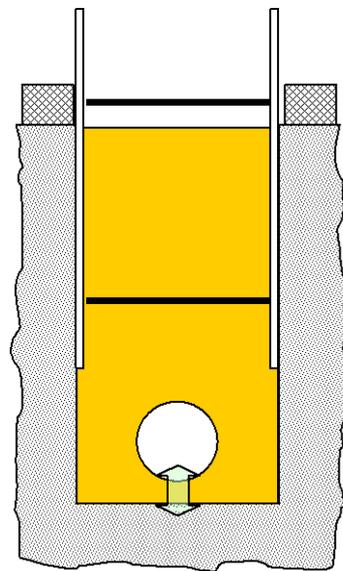


BILD 7: EINBAU DES FLIEßFÄHIGEN VERFÜLLMATERIALS

3.1.6 Rückbauzustand der Grabensicherung

Im Vergleich zur konventionellen Bauweise, bei der sich die Rückbauzustände aus der Rückabwicklung der Vorbauzustände der Grabensicherung ergeben (Bild 8), gibt es bei der Methode der flüssigen Grabenverfüllung einen Zustand, in dem die Grabenwände ganz oder teilweise unverbaut sind und nur durch das noch fließfähige Verfüllmaterial gestützt werden (Bild 9). Ein Nachweis dieses Verbauzustandes wird gegenwärtig in einigen Regelwerken erwähnt, in der Praxis aber nicht gefordert und ist in den einschlägigen Normen auch nicht eindeutig geregelt.

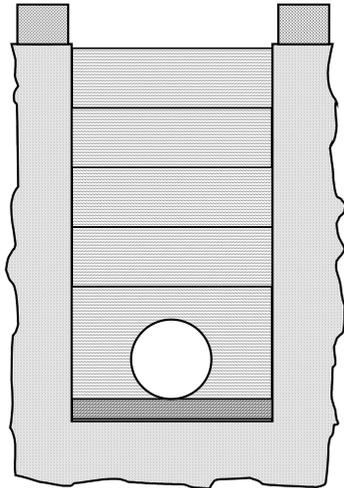


BILD 8: RÜCKBAUZUSTAND DER KONVENTIONELLEN GRABENVERFÜLLUNG

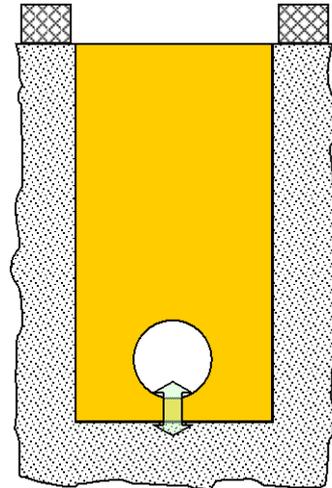


BILD 9: RÜCKBAUZUSTAND DER FLÜSSIGEN GRABENVERFÜLLUNG

3.1.7 Wiederherstellen der Oberflächen

Vor der Wiederherstellung der Oberfläche, insbesondere des Straßenoberbaus, sind die Mindestanforderungen an die Tragfähigkeit der Grabenverfüllung nachzuweisen.

Die Überprüfung der Verfüllung und Verdichtung erfolgt im Allgemeinen am Planum der obersten Schicht der Wiederverfüllzone durch Lastplattendruckversuche. Bei Verwendung fließfähiger Verfüllbaustoff können die einzuhaltenden Werte für den Verformungsmodul dem Merkblatt ‚Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen‘ der *FGSV (2010)* entnommen werden, wobei diese Vorgaben den Anforderungen der zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB) entsprechen.

Nachfolgend sind die Anforderungen für den Verformungsmodul in bestimmten Ebenen des Rohrgrabens nach ZTV E-StB zur Überprüfung der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung mit dem Lastplattendruckversuch angegeben, wobei sich die Werte des Verformungsmoduls E_{V2} auf die Wiederbelastung beziehen (Bild 10).

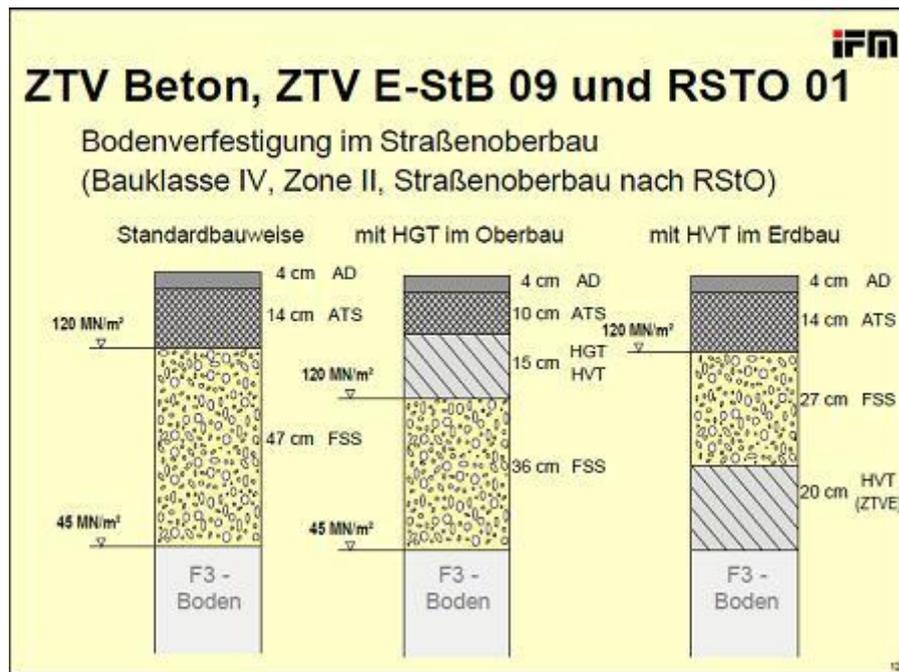


BILD 10: E_{v2} -WERTE IM ERDBAU NACH DEN ANFORDERUNGEN DER ZTV E-STB (SCHADE, 2010)

Bei der konventionellen Grabenverfüllung können die Vorgabewerte unmittelbar nach dem Einbau des Füllmaterials überprüft werden. Bei der flüssigen Grabenverfüllung ist zunächst eine ausreichende Verfestigung des Materials abzuwarten.

Die Festigkeitsentwicklung der flüssigen Verfüllstoffe kann je nach Stoffgruppe und Hersteller stark variieren, das Entwässerungsverhalten wird zusätzlich von den Eigenschaften des anstehenden Bau- grounds bestimmt. Hieraus ergeben sich Zwangspunkte für den Bauablauf, die bei der Planung der Bauphasen zu berücksichtigen sind.

Die Annahme gleichmäßiger Umgebungsbedingungen der Rohre in der Leitungszone ist ein Idealzustand, der im Allgemeinen nicht erreicht wird. Die Abweichungen der Bettungsbedingungen von den idealen, gleichmäßigen Verhältnissen werden als Imperfektionen bezeichnet, die bereits von der Verlegung an in der Leitungszone vorhanden sind. Belastungen, die sich aus solchen Imperfektionen ergeben, werden in der Literatur als indirekte Lasten bezeichnet (Kisselbach, 1999).

Die Wahrscheinlichkeit indirekter Lasten ist bei konventionell verlegten Rohren wesentlich größer einzuschätzen als bei Rohren, die nach der Methode der flüssigen Grabenverfüllung eingebaut werden. Daraus resultiert eine grundsätzlich höhere Schadensanfälligkeit für Rohrleitungen, die konventionell verlegt werden. Die Erneuerung von Rohrleitungen mit der Methode der flüssigen Grabenverfüllung lässt dagegen erwarten, dass die Anforderungen an Standsicherheit und Dichtheit besser und über einen längeren Zeitraum (geringere Alterungsgeschwindigkeit) erfüllt werden können.

In Bild 11 und Bild 12 werden der Endzustand nach Wiederherstellung der Oberfläche der konventionellen respektive der flüssigen Grabenverfüllung gezeigt.

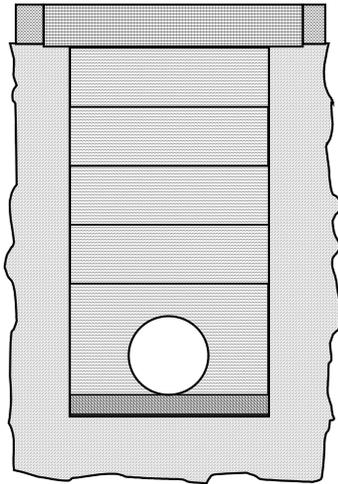


BILD 11: ENDZUSTAND DER KONVENTIONELLEN GRABENVERFÜLLUNG

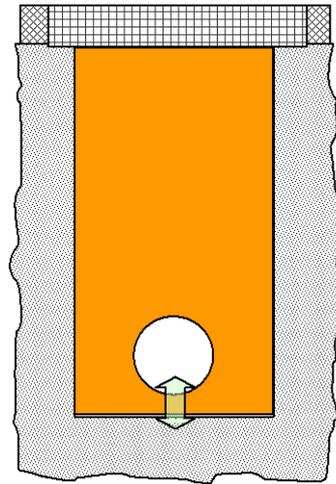


BILD 12: ENDZUSTAND DER FLÜSSIGEN GRABENVERFÜLLUNG

Wichtige Einflussfaktoren für die mechanische Beanspruchung erdverlegter Rohrleitungen und die Belastung der Oberflächenbefestigung sind:

- die Querschnittsgeometrie des ausgehobenen Grabens (geböschte Wände, Stufengraben oder parallele Wände)
- die Abmessungen des Grabens (Grabenbreite und Grabentiefe)
- die Art des Grabenverbaus und dessen Einbringung bzw. Rückbau
- die Ausführung der Bettung
- die Eigenschaften des gewählten Verfüllmaterials in der Leitungszone
- die Art und Weise der Verdichtung des Füllmaterials der Leitungszone
- die Höhe der Leitungsüberdeckung
- die Verfüllung des Arbeitsraums oberhalb der Leitungszone sowie deren Verdichtung
- die Art der Oberflächenbefestigung und der Aufbau des Oberbaus

3.2 Fließfähige Verfüllbaustoffe

Fließfähige Verfüllbaustoffe werden in unterschiedlichen Bereichen zur Verfüllung von Hohlräumen bspw. bei alten Tankanlagen, Tunneln, Stollen, stillgelegten Wasser-, Abwasser- und Gasleitungen eingesetzt.

Für die flüssige Grabenverfüllung im Rohrleitungsbau eignet sich jedoch nur eine Auswahl dieser Materialien, die nachfolgend in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden. Bei der Einteilung werden – im Vergleich zu Publikationen anderer Autoren, wie z. B. der Gütegemeinschaft Flüssigboden e.V. – keine produktspezifischen Eigenschaften berücksichtigt.

3.2.1 Boden-Bindemittel-Gemische

Das erste selbstverdichtende Verfüllmaterial auf Basis eines Boden-Bindemittel-Gemisches ist der seit 1996 auf dem deutschen Markt eingeführte WBM Weimarer Boden-Mörtel bez. WBM Flüssigboden. Seit 2003 ist ein weiterer Verfüllbaustoff, der RSS[®]-Flüssigboden, ebenfalls auf dem deutschen Markt verfügbar (Feickert, 2008).

Der Bekanntheitsgrad der Baustoffe Flüssigboden/Bodenmörtel ist insbesondere auf die Aktivität der beiden Lizenzgeber RSS Leipzig und Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V. sowie ihrer Marktpartner in Form von Ingenieur-Büros, Mischanlagenbetreibern und Bauunternehmen, zurückzuführen (Feickert, 2008). Durch Verbandstätigkeit, Entwicklungs- und Öffentlichkeitsarbeit hat sich in den letzten Jahren der Begriff Flüssigboden als Synonym für zeitweise fließfähige Verfüllmaterialien im Tiefbau weitgehend etabliert.

Die Ausgangsstoffe der Boden-Bindemittel-Gemische bestehen überwiegend aus dem anfallenden Bodenaushub oder geeignetem Recyclingmaterial. Dabei liegt der Anteil des Bodens bei über 90% und kann je nach Bodenart in Bezug auf die Anteile von Ton, Schluff, Sand und Kies stark variierende Kornverteilungskurven aufweisen.

Um die zeitweise Fließfähigkeit dieser Baustoffe zu gewährleisten, werden neben Wasser auch Zusätze verwendet, deren Hauptbestandteile Bentonit und weitere rezepturabhängige Stoffe sind, die aufgrund ihrer quellenden und elektrostatischen Eigenschaften geeignet sind, eine Gleitschicht zwischen den Gesteinskörnern des Zuschlagbodens auszubilden und auf diese Weise dessen Scherfestigkeit temporär herabzusetzen.

Zur Stabilisierung der Suspension und Unterstützung der Verfestigung werden meist in geringen Mengen hydraulische Bindemittel in Form von Zement oder auch Kalk eingesetzt. Die Funktion der Stabilisatoren soll sich darauf beschränken, freies Wasser durch Hydratation zu binden und so die Strukturfestigkeit des Verfüllbaustoffes nach dem Einbringen in den Graben wieder zu erhöhen.

Da sich der Vorgang der Hydratation über einen längeren Zeitraum erstreckt, was zu einer Nacherhärtung des Materials führen kann, werden z. B. dem RSS[®]-Flüssigboden sogenannte Konditioner hinzugefügt. Konditioner können u. a. aus Zellulose bestehen, welche durch Quellen zusätzlich Wasser binden kann. Diese Bindungsform hat den Vorteil, dass sie im Gegensatz zur Wasserbindung infolge Hydratation keine starren Strukturen ausbildet. Auf diese Weise kann die Spatenlösbarkeit der Produkte gewährleistet werden.

Aus ökologischer Sicht besteht ein wesentlicher Vorteil dieser Stoffgruppe in der Wiederverwendung von Aushub- oder Recyclingmaterial, was im Sinne der Kreislaufwirtschaft anzustreben ist.

3.2.2 Fließfähige Verfüllmaterialien mit normierten Zuschlägen

Im Gegensatz zu den Boden-Bindemittel-Gemischen werden bei diesen fließfähigen Verfüllmaterialien, ähnlich wie bei der Betonherstellung, normierte Zuschläge meist in Form von Sand und/oder Kies verwendet. Zu diesen Produkten zählen u. a. der Erdbeton, der Porenleichtbeton, Füma[®] und die ‚Stabilisierte Sandmischung‘ (SSM).

Die SSM wurde Anfang der 80er Jahre in Österreich patentiert. Es handelt sich hierbei um ein fließfähiges Verfüllmaterial aus Sand, Wasser, diversen Betonzusatzstoffen, Zement und einem Fließmittel aus alkalibeständigen Proteinen, die mit Druckluft und Wasser aufgeschäumt werden (Österreichisches Patent AT Nr. 374163, 1984).

Die Wiederverfestigung der Verfüllmaterialien mit normierten Zuschlägen wird in erster Linie durch hydraulische Bindemittel erzielt, die je nach Zugabemenge unterschiedliche Endfestigkeiten bewirken. Teilweise werden die Wichten des Materials durch den Zusatz von Porenbildnern herabgesetzt.

Vorteilhaft bei der Verwendung dieser Verfüllmaterialien ist die Möglichkeit, nahezu konstante Qualitäten und Eigenschaften beliebig reproduzieren zu können. Durch das definierte Ausgangsmaterial sind eine gezielte Steuerung der Eigenschaften der Frischsuspension und eine Vorhersage der Feststoffeigenschaften einfacher als bei der Aufbereitung gewachsener Böden. Nachteilig wirkt sich die Temperaturabhängigkeit einiger Zusatzmittel, wie z. B. der Porenbildner, aus, die witterungsbedingte Schwankungen des Materialverhaltens beim Einbau verursachen.

3.2.3 Eigenschaften fließfähiger Verfüllbaustoffe

Die Fließfähigkeit und die Stabilität aller Verfüllmaterialien wird durch die Zugabe von Wasser und ihre anschließende Wiederverfestigung durch die Zugabe hydraulischer Bindemittel beeinflusst. Dennoch bestehen zwischen den einzelnen Rezepturen sowohl bei den verwendeten Ausgangsmaterialien als auch bei den späteren Feststoffeigenschaften teilweise große Unterschiede.

Generell sollten bei der Wahl eines geeigneten fließfähigen Verfüllbaustoffes folgende Aspekte abgewogen werden:

- Sind dynamische Lasten vorhanden, welche abgedämpft werden sollten, bevor sie bspw. das gebettete Rohr erreichen?
- Welche Anforderungen werden an die Volumenbeständigkeit und Festigkeit gestellt?
- Überschreiten die einwirkenden Kräfte die Festigkeit, wird gegebenenfalls das Gefüge des Materials zerstört und es kommt zu einer Verringerung des Porenvolumens und somit des Gesamtvolumens.
- Befindet sich der Baubereich in einer Wasserschutzzone? Werden andere Anforderungen an die Umweltverträglichkeit gestellt?
- Muss das Material bspw. aufgrund mangelnder Zugangsmöglichkeit pumpfähig sein?
- Welche Anforderungen stellt der zu verfüllende Raum an die Fließfähigkeit? Handelt es sich um einen schmalen Ringraum oder eine vergleichsweise große Baugrube?
- Fällt Aushubmaterial an und wenn ja, in so großen Dimensionen, dass eine Wiederverwertung sinnvoll erscheint?

Konkrete Entscheidungshilfen zur Auswahl des optimalen Materials für die jeweilige Anwendung können im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht gegeben werden. An dieser Stelle wird auf die zahlreichen Veröffentlichungen von Herstellern und Anwendern sowie auf die weiterführende Literatur unabhängiger Autoren verwiesen. Gegenstand der weiteren Betrachtungen sind die Eigenschaften der Verfüllbaustoffe im Zustand des Einbaus.

Allen fließfähigen Verfüllmaterialien ist gemeinsam, dass ihr Fließverhalten und ihre Stabilität maßgeblich von den Eigenschaften einer tragenden Mehlkornsuspension sowie der Kornverteilung und der Kornform ihrer groben Zuschlagstoffe bestimmt werden. Quantifiziert wird das Fließverhalten im Wesentlichen durch die beiden Parameter der plastischen Viskosität (Zähigkeit) sowie der Fließgrenze

und kann am einfachsten mit dem Modell einer Bingham-Flüssigkeit beschrieben werden, die erst dann fließt, wenn eine Mindestschubspannung (Fließgrenze) überschritten wird.

Die Fließgrenze einer Suspension ist dabei der entscheidende Parameter zur Beurteilung der Entmischungseigung, der effektiven Auftriebswirkung und der Stabilisierung des offenen, unverbauten Grabens. Da die Fähigkeit zur vollständigen Umschließung der Rohrleitungen und zur Füllung der Verbauspur nicht maßgeblich von den im Einbauzustand auftretenden Fließgeschwindigkeiten abhängt, reicht zur Beurteilung der Verfüllbaustoffe unter Baustellenbedingungen zunächst die Kenntnis der Fließgrenze, der Wichte der Suspension sowie der Kornverteilung der Zuschläge.

Einfache Methoden zur Bestimmung der Fließgrenze sind aus der Geotechnik bekannt und werden bspw. im Schlitzwandbau angewendet. Für die Messung der Eigenschaften von flüssigen Verfüllbaustoffen wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen das in der Schlitzwand-Norm *DIN 4126 (2008)* beschriebene Pendelgerät nach Weiß modifiziert, da es in der ursprünglichen Form für die Verwendung mit hochkonzentrierten Suspensionen nur bedingt geeignet ist.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die wichtigsten Grundlagen der Rheologie flüssiger Verfüllbaustoffe zusammengefasst und anschließend die Eigenschaften dieser Stoffe sowie die Methoden zur Messung ihrer maßgebenden Parameter beschrieben.

3.3 Rheologie flüssiger Verfüllbaustoffe

3.3.1 Allgemein

Der Begriff Rheologie leitet sich vom griechischen Wort ‚rew‘ ab und bezeichnet die Lehre vom Fließen.

Die rheologischen Eigenschaften eines Fluids lassen sich anhand von charakteristischen Fließkurven beschreiben, welche den Zusammenhang zwischen den in der Flüssigkeit herrschenden Schubspannungen und der daraus resultierenden Schergeschwindigkeit darstellen. Die Aufzeichnung solcher Fließkurven erfolgt mittels Viskosimetern bzw. Rheometern unter Laborbedingungen. Wegen der vergleichsweise teuren Messausstattung eignen sich diese Verfahren nicht für eine einfache Überprüfung unter Baustellenbedingungen.

Im folgenden Abschnitt werden einige wichtige Begriffe und Methoden der Rheologie erläutert. Die Darstellung der Grundlagen bleibt dabei auf den Umfang beschränkt, der für das Verständnis der weiteren Untersuchungen erforderlich ist. Für eine Vertiefung der theoretischen Grundlagen steht umfangreiche Literatur, z. B. *Barnes et al. (1989)* und *Tanner (2000)*, zur Verfügung.

3.3.2 Messung rheologischer Eigenschaften

Die Messung der Fließeigenschaften eines Fluids erfolgt in allen rheologischen Verfahren durch die Aufbringung einer Scherbeanspruchung, die in der zu untersuchenden Flüssigkeit ein Geschwindigkeitsgefälle erzeugt. In Bild 13 befindet sich die Flüssigkeit zwischen zwei Platten, die in einem Abstand von d parallel zueinander angeordnet sind. Die obere Platte bewegt sich relativ zur unteren Platte mit einer Geschwindigkeit U . Die sich hieraus ergebende Schergeschwindigkeit ist definiert als $\dot{\gamma} = U/d$. Die Schubspannung τ innerhalb der Flüssigkeit ist an jeder Stelle gleich groß und kann aus der Kraft berechnet werden, die erforderlich ist, um die Platte der Fläche A mit der konstanten Geschwindigkeit U zu bewegen.

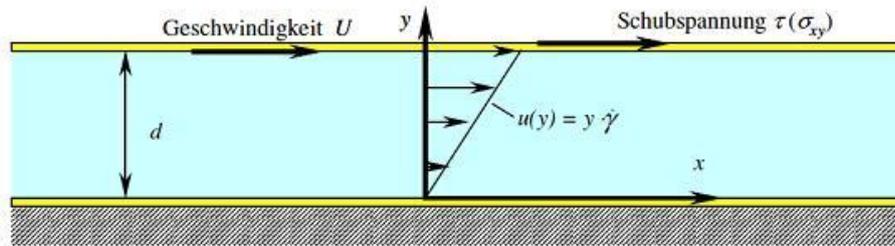


BILD 13: FLÜSSIGKEIT ZWISCHEN ZWEI PARALLELEN PLATTEN, DIE SICH MIT DER RELATIVGESCHWINDIGKEIT U GEGENEINANDER BEWEGEN (TANNER, 2000)

Die Viskosität η einer Flüssigkeit gibt das Verhältnis der Schubspannung τ zur Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ an. Abhängig von der untersuchten Flüssigkeit ist die Viskosität eine Funktion der Schergeschwindigkeit und stellt nicht in jedem Fall eine Stoffkonstante dar.

Ein Diagramm, das die Schubspannung über die Schergeschwindigkeit darstellt, bezeichnet man als Fließkurve (Bild 14), die im einfachsten Fall – für Newton'sche Flüssigkeiten – einer Geraden durch den Ursprung entspricht.

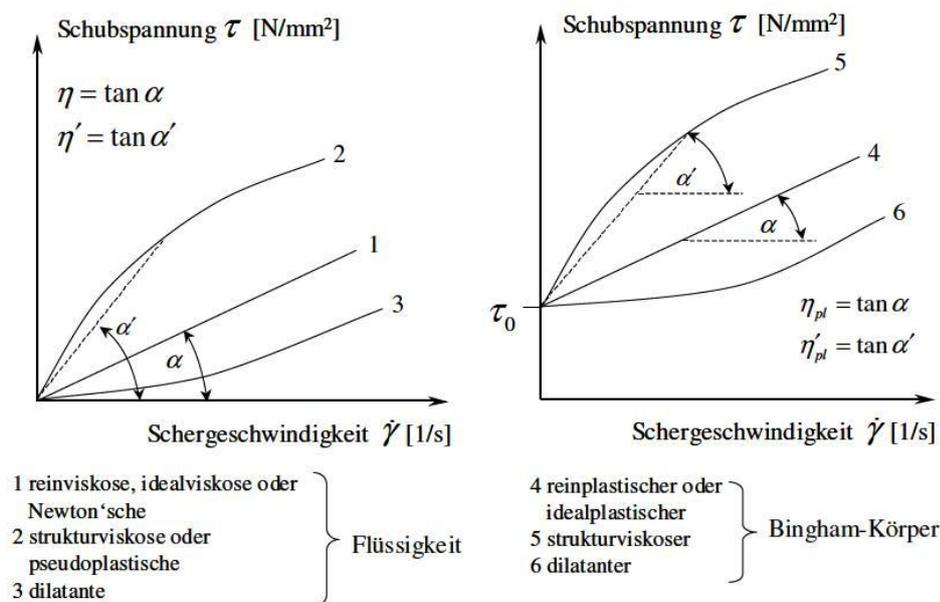


BILD 14: FLIEßKURVEN VON FLÜSSIGKEITEN OHNE UND MIT FLIEßGRENZE (HILLMEIER UND BUCHENAU, 2001)

Flüssigkeiten, die erst anfangen zu fließen, wenn eine definierte Schubspannung überschritten wird, bezeichnet man als Bingham'sche Flüssigkeiten und den Grenzwert der Schubspannung als effektive Fließgrenze τ_0 (vgl. Bild 14 rechts).

Die Fließkurven von feststoffreichen Suspensionen, wie Beton oder fließfähigen Verfüllmaterialien, lassen sich durch das idealisierte Modell eines idealplastischen Bingham-Körpers beschreiben (Haist, 2005). In diesem Modell genügt die Kenntnis der beiden physikalischen Größen Fließgrenze τ_f und Viskosität η zur Beschreibung des Fließverhaltens.

3.3.3 Eigenschaften von Suspensionen

3.3.3.1 Allgemein

Bei fließfähigen Verfüllbaustoffen handelt es sich, wie auch bei Frischbetonen, definitionsgemäß um Suspensionen, also um eine Verteilung von Feststoffen in einer flüssigen Phase. Ein wichtiges Merkmal zur Charakterisierung von Suspensionen ist der Dispersionsgrad, der den Grad der Zerteilung des Feststoffes angibt. Je größer der Dispersionsgrad ist, desto kleiner ist der Stoff in der flüssigen Phase zerteilt. Die Teilchengröße hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Suspension, weshalb abhängig von der Partikelgröße der dispersen Phase unterschieden wird zwischen

- feindispersen Systemen,
- kolloiddispersen Systemen und
- grobdispersen Systemen.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass es sich bei den fließfähigen Verfüllbaustoffen um eine Mischung aus kolloiddispersen und grobdispersen Systemen handelt.

Bei kolloiddispersen Systemen beträgt die Größe der dispergierten Teilchen zwischen 0,001 μm und 1 μm und liegt damit im unteren Korngrößenbereich von Zement, der bei der Herstellung von Flüssigboden verwendet wird. Das Verhalten dieser Kolloide wird maßgeblich von der großen Oberfläche der sehr feinen Partikel bestimmt. Die wirksamen Oberflächenkräfte entsprechen in ihrer Größe etwa der Schwerkraft (*Haist, 2005*), werden bei zunehmender Partikelgröße jedoch geringer. Diese kolloiden Partikel bestimmen durch ihre gegenseitigen Anziehungs- und Abstoßungskräfte maßgeblich das Fließverhalten der Zementsuspension und damit der flüssigen Phase des grobdispersen Systems.

Die Partikel des grobdispersen Systems sind mit einem Durchmesser von mehr als 1 μm wesentlich größer als die Teilchen der flüssigen Phase. Grobdisperse Suspensionen zeigen eine deutliche Trübung und ihre Feststoffe lassen sich durch Abfiltrieren vom Dispersionsmittel trennen. Bei den fließfähigen Verfüllstoffen bilden Aufschlämmungen von fein zermahlenem Sand und Ton – der ein wesentlicher Bestandteil des Compounds bei der Flüssigbodenherstellung ist – ein solches grobdisperses System.

3.3.3.2 Stabilität kolloidaler Systeme

Bleibt der Dispersionsgrad, also die Verteilung der Feststoffe in der flüssigen Phase des kolloidalen Systems, über die Zeit unverändert, kommt es somit zu keiner Zusammenballung (Koagulation) von kolloiden Teilchen und sinken die festen Bestandteile unter der Einwirkung der Schwerkraft nicht ab, so wird ein solches System als stabil bezeichnet (*Bendix, 1999*). Für die Stabilität kolloidaler Systeme sind im Wesentlichen zwei stabilisierende Eigenschaften maßgebend, die bei hydrophoben und hydrophilen Kolloiden unterschiedlich wirksam werden.

Hydrophobe Kolloide

Werden bestimmte, in der Lösung vorhandene Ionenarten adsorptiv an der Oberfläche der kolloiden Teilchen angelagert, so handelt es sich hierbei um hydrophobe Kolloide. Eine gegenseitige Abstoßung aufgrund der gleichsinnigen Aufladung der Teilchen verhindert den Zusammenschluss der kolloiden Teilchen zu größeren Aggregaten und ist somit verantwortlich für die Stabilität des Sols (der kolloiden Dispersion). Die Aufladung kann durch Hydroniumionen (z. B. bei kolloiden Hydroxiden) bzw. Hydroxidionen (z. B. bei kolloiden Sulfiden) des Wassers oder Ionen eines Fremdelektrolyten stattfinden. Der Ladungsausgleich erfolgt durch die Gegenionen, welche Ionenwolken um die kolloiden Teilchen ausbilden (*Bendix, 1999*). Kolloide Lösungen neigen bei Zugabe besonders leicht adsorbierbarer Ionen

entgegengesetzter Ladung wieder zum Ausflocken. Daher sind Lösungen hydrophober Kolloide generell empfindlich gegenüber Elektrolytzusatz, da hierdurch die Teilchenabstoßung kompensiert werden kann.

Hydrophile Kolloide

Anders als bei der Stabilisierung der Teilchen durch elektrische Aufladung beruht die Stabilisierung hydrophiler Kolloide im Wesentlichen auf der Hydratation der dispergierten Teilchen. Die hydrophilen Kolloide sind bestrebt, Hydrathüllen aufzubauen, indem Wassermoleküle adsorptiv angelagert werden. Diese Hydrathüllen stoßen sich gegenseitig ab und verhindern einen Zusammenschluss der Teilchen zu größeren Partikeln, wodurch die kolloide Lösung stabilisiert wird. Die Bildung der Hydrathülle durch die Anlagerung von Wasser kann so effektiv sein, dass das Sol zu einer gallertartigen Masse (einem Gel mit hohem Wassergehalt) erstarrt. Beispiele hierfür sind konzentrierte Polykieselsäure bzw. Aluminiumhydroxidlösungen (*Bendix, 1999*).

3.3.4 Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Suspensionen

Bei den zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen handelt es sich um feststoffreiche Suspensionen mit einer vorwiegend weitgestuften Kornverteilung, die abhängig vom Ausgangsmaterial von weniger als einem μm im Mehlkornbereich bis zu einigen cm im Bereich der größten Kornfraktionen reichen kann.

Die wichtigsten Parameter in Bezug auf die Fließeigenschaften einer Suspension sind deren Feststoffgehalt sowie die Viskosität und die Fließgrenze der flüssigen Phase. Bevor auf das Fließverhalten der Verfüllbaustoffe näher eingegangen wird, werden zunächst die allgemeinen Begriffe und Abhängigkeiten erläutert, die im Zusammenhang mit der rechnerischen Modellierung von Suspensionen verwendet werden.

Der Feststoffanteil einer Suspension wird in den meisten Fachbeiträgen als volumenbezogener Anteil der Feststoffe an dem Gesamtvolumen von flüssiger und fester Phase definiert. Neben dem Anteil an Feststoffen hat auch die Kornform der granularen Stoffe einen wesentlichen Einfluss auf das Fließverhalten der Suspension. *Einstein (1906, 1911)* geht in seinem Modell von der Kugel als ideale Form der Partikel aus. Je größer die Abweichung von dieser idealen Kugelform ist, desto stärker wirkt sich die Partikelgestalt auf die Viskosität der Suspension aus.

Steigt der Feststoffgehalt einer Suspension an, ist hiermit auch ein überproportionaler Anstieg der Viskosität verbunden, wobei der Einfluss der Kornform auf die Fließfähigkeit zunimmt. Ursächlich hierfür ist die steigende Anzahl an Kornkontakten bei zunehmender Festkörperkonzentration bis hin zur Ausbildung eines kompakten Korngerüsts mit entsprechenden Porenkanälen.

Anhand der Darstellung in Bild 15 kann anschaulich das Fließverhalten hochkonzentrierter Suspensionen erläutert werden. Der Reibungswiderstand unter Scherbeanspruchung setzt sich aus einem Anteil infolge der Korn-zu-Korn-Reibung (intergranularer Anteil) und einem viskosen Reibungsanteil der flüssigen Phase zusammen (*Ferraris und de Larrard, 1998*).

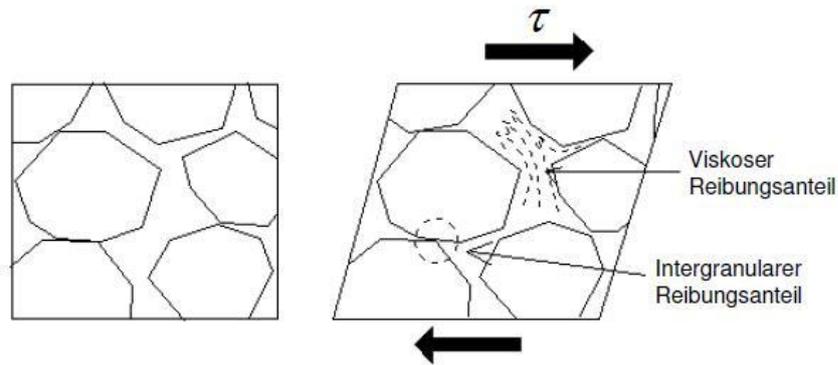


BILD 15: EINFLUSS AUF DAS FLIEßVERHALTEN HOCHKONZENTRIERTER SUSPENSIONEN (FERRARIS UND DE LARRARD, 1998).

Dieser Ansatz kann auch zur anschaulichen Erklärung der Fließgrenze von Suspensionen dienen, bei denen eine Fließbewegung erst nach Überschreiten der Reibung im Korngerüst möglich ist. Handelt es sich bei der flüssigen Phase um eine Newton'sche Flüssigkeit – z. B. Wasser – wird die Fließgrenze der Suspension ausschließlich durch die Reibung (viskos und intergranular) bestimmt. Ist ein ausreichend großer Anteil der flüssigen Phase vorhanden und handelt es sich bei dem Fluid um eine Bingham'sche Flüssigkeit, so werden zusätzlich zur Reibung auch Kräfte entsprechend der Fließgrenze des Fluids auf die Partikel übertragen, da bei einer Bewegung der Suspension auch ein Fließvorgang innerhalb der beengten Porenräume initiiert wird. Die Größe und die Verteilung dieser Porenkanäle wird ebenfalls maßgeblich von der Kornform bestimmt, so dass die effektive Fließgrenze τ_0 der Suspension insgesamt eine Funktion der relativen Feststoffkonzentration ϕ/ϕ_{max} ist (Gl. 3.1) (Ferraris und de Larrard, 1998).

$$\tau_0 = f \frac{\phi}{\phi_{max}} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Auch die Stabilität der Suspension wird maßgeblich von der Kornform bestimmt, so dass eine beginnende Sedimentation zu einer raschen Konsolidierung im sedimentierten Bereich führt und die Kornreibung überproportional ansteigt. Dieser Effekt kann als Ursache für das schnelle Abklingen der maximalen Auftriebswirkung einiger fließfähiger Verfüllbaustoffe angesehen werden. Bei steigendem Feststoffgehalt gewinnt die Reibung innerhalb des Korngerüsts zunehmend an Bedeutung (Bild 16). Die Viskosität der Suspension steigt mit ihrer Wichte überproportional an, bis sich schließlich aufgrund des steigenden Feststoffgehaltes ein geschlossenes Korngefüge ausbildet und die Eigenschaften des granularen Materials maßgebend werden.

Anhand dieses Modells kann auch die effektive Auftriebswirkung von Suspensionen beschrieben werden, zwischen deren Feststoffpartikeln sich Porenkanäle und Fließwege bilden (Bild 16-a). Damit sich ein Korn aus diesem Gefüge unter Einwirkung der Schwerkraft abwärts bewegen kann (Bild 16-b), muss die flüssige Phase der Suspension durch die Porenkanäle hindurch gepresst werden (Bild 16-c). Mit den Schubspannungen, die auf den Oberflächen der Porenkanäle übertragen werden, steigt auch das Druckgefälle an, das erforderlich ist, um die Flüssigkeit durch die Porenkanäle zu bewegen.

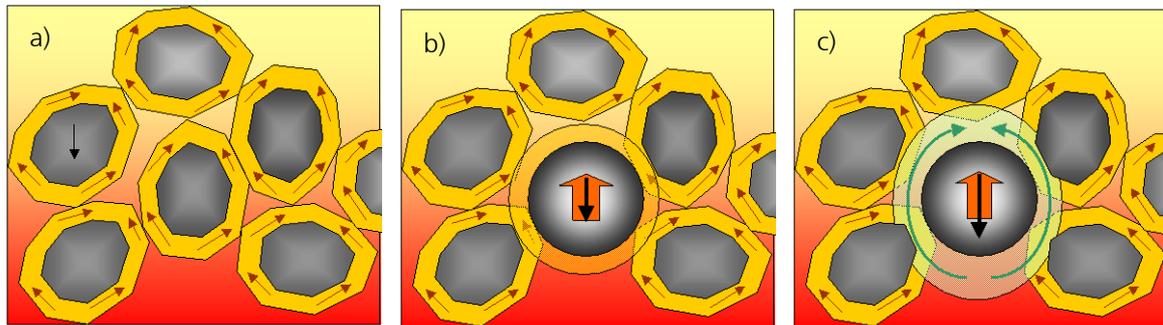


BILD 16: FLÜSSIGKEITSSTRÖMUNG IN DEN PORENKANÄLEN – MIKROSKOPISCHE BETRACHTUNGSWEISE DER STABILITÄT EINER SUSPENSION

Der Flüssigkeitsdruck in den Porenkanälen einer stabilen Suspension entspricht schließlich der Wichte der Suspension und ist abhängig von der Feststoffkonzentration, der Kornform und der Kornverteilung sowie der Fließgrenze der flüssigen Phase. Die Betrachtung des Fließvorganges in den Porenkanälen entspricht einer eher mikroskopischen Betrachtungsweise und ist geeignet die Stabilität einer Suspension zu beschreiben. Daneben kann der Effekt auftreten, dass bei wesentlich größeren Körpern als den durchschnittlichen Zuschlagkörnern eine räumliche Umströmung durch die gesamte Suspension stattfindet, die durch einen Schervorgang auf den Oberflächen, die den Fließbereich begrenzen, beschrieben werden kann. Dieser Ansatz entspricht einer eher makroskopischen Betrachtungsweise.

Sinkt also ein Körper aufgrund seines Gewichtes in einer Suspension nach unten ab, muss er durch sein Gewicht den Druck auf die flüssige Phase der Suspension so weit erhöhen, dass eine entsprechende Fließbewegung des Fluids in den Porenkanälen initiiert wird (mikroskopische Betrachtungsweise) oder - bei eher großvolumigen Körpern – eine Suspensionsströmung in einem räumlichen Fließbereich stattfindet. Liegt der für die Umströmung erforderliche Flüssigkeitsdruck wesentlich über dem Porenflüssigkeitsdruck der stabilen Suspension, so wirkt auf den Körper eine größere Auftriebskraft, als der Ansatz nach Archimedes (verdrängtes Volumen mal Wichte) ergibt.

Drängt der Körper aufgrund seiner relativ geringen Wichte an die Oberfläche der Suspension, so ist auch in diesem Fall der Flüssigkeitsdruck in den Porenkanälen entsprechend zu erhöhen. Dieser erhöhte Druck wirkt der Aufwärtsbewegung des Körpers entgegen, wodurch die effektive Auftriebswirkung geringer erscheint als durch den Ansatz über die Wichte der Suspension (makroskopische Betrachtungsweise) ermittelt wird.

Für die Ermittlung der Stabilität einer Suspension (mikroskopische Betrachtungsweise) gibt es in der Literatur Berechnungsansätze, von denen nachfolgend jener von *Saak et al. (2001)* erläutert wird. Für den effektiven Auftrieb großvolumiger Körper in Suspensionen wird in Kapitel 3.4.2 ein entsprechender Berechnungsansatz vorgeschlagen.

Prinzipiell sind zwei verschiedene Vorgänge zu unterscheiden:

- Die Umströmung der Kugel durch die Suspension (makroskopische Betrachtungsweise zur Beschreibung des Auftriebs)
- Die schleichende Umströmung als Voraussetzung für den Ansatz von *Saak et al. (2001)* (mikroskopische Betrachtungsweise zur Berechnung der Stabilität der Suspension)

3.4 Eigenschaften flüssiger Verfüllbaustoffe

3.4.1 Stabilität der Suspension

Nach Saak *et al.* (2001) sinkt eine Kugel (Dichte ρ_g mit Radius r) in einer Bingham-Flüssigkeit (Dichte ρ_F , effektive Fließgrenze τ_0 , plastische Viskosität η_{pl}) dann ab, wenn wie in Bild 17 dargestellt, die Gewichtskraft F_G größer ist als die Summe von Auftriebskraft F_A und Widerstandskraft F_W .

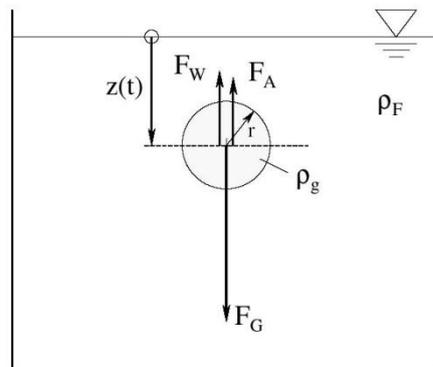


BILD 17: ANGREIFENDE KRÄFTE AN EINER IN EINEM BINGHAM-FLUID BEFINDLICHEN KUGEL; ZUR BESSEREN ÜBERSICHT WURDEN DIE ANGREIFENDEN KRÄFTE AUS DEM SCHWERPUNKT DER KUGEL SEITLICH VERSETZT (WÜSTHOLZ, 2005)

$$F_W = \pi \cdot r^2 \cdot \tau_0 \quad \text{Gl. 3.2}$$

$$F_G > F_A + F_W \Rightarrow \rho_g \cdot g \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 > \rho_{Fluid} \cdot g \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 + \pi \cdot r^2 \cdot \tau_0 \quad \text{Gl. 3.3}$$

$$\tau_0 < \frac{4}{3} \cdot g \cdot r \cdot \rho_g - \rho_{Fluid} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\tau_0}{\rho_g - \rho_{Fluid}} < \frac{4}{3} \cdot g \cdot r \quad \text{Gl. 3.4}$$

Saak *et al.* (2001) gehen davon aus, dass eine Kugel nur dann absinkt, wenn die Widerstandskraft F_W , die eine Bingham-Flüssigkeit auf eine schleichend umströmte Kugel gemäß Gl. 3.2 ausübt, kleiner ist als die Gewichtskraft F_G abzüglich der Auftriebskraft F_A und damit die Bedingung der Gl. 3.3 erfüllt ist. Mit ρ_g wird hierbei die mittlere Korndichte und mit ρ_{Fluid} die mittlere Dichte des Fluids, also der tragenden Mehlkornsuspension, bezeichnet. Durch Vereinfachung ergibt sich hieraus schließlich die Bedingung 3.4 (Saak *et al.*, 2001).

Die von Saak *et al.* (2001) beschriebene, schleichende Umströmung der Kugel entspricht der Strömung des Fluids in den Porenkanälen gemäß der zuvor erläuterten mikroskopischen Betrachtungsweise.

Eine wichtige Folgerung aus Gl. 3.4 ist, dass es zu jedem Kornradius eine auf den Dichteunterschied bezogene Mindestfließgrenze $\tau_{0,min}$ gibt, bei deren Unterschreitung erst ein Absinken des Kornes möglich wird.

3.4.2 Die Auftriebswirkung der Suspension

3.4.2.1 Das Ballon-Experiment

Ein wassergefüllter Ballon ist in Wasser annähernd gewichtslos, da die wirksamen Auftriebskräfte infolge des verdrängten Volumens der Gewichtskraft des Ballons entsprechen. Der Ballon taucht in das

Wasser ein ohne aufzusteigen oder abzusinken (links in Bild 18). Bei dieser Betrachtung werden das Gewicht und das Volumen der Ballonhülle vernachlässigt.

Wird das gleiche Experiment in einer Bingham'schen Flüssigkeit durchgeführt, so taucht der mit der Bingham'schen Flüssigkeit gefüllte Ballon trotz gleicher Wichte von Ballon und Flüssigkeit nicht vollständig ein (rechts in Bild 18), da durch die Fließgrenze der Suspension beim Eintauchvorgang unterhalb des Körpers ein höherer als der primäre Flüssigkeitsdruck entsteht. Ein Ausgleich der Druckdifferenz ist aufgrund der Fließgrenze der Suspension behindert und es entsteht eine effektive Auftriebskraft.

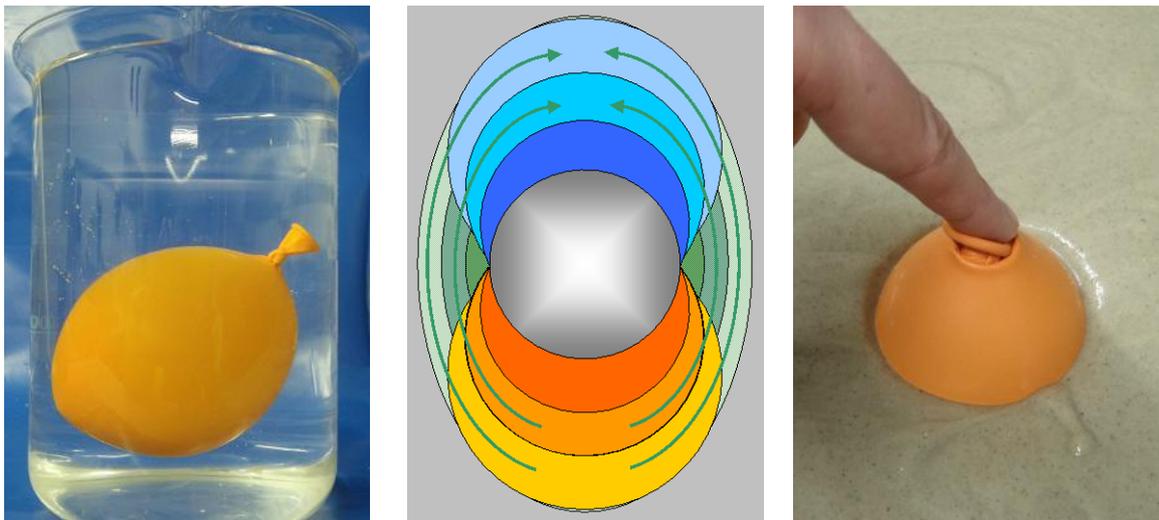


BILD 18: BALLON-EXPERIMENT IN NEWTONSCHER (LINKS) UND BINGHAM'SCHER (RECHTS) FLÜSSIGKEIT

Soll der Ballon, der im Sinne des Archimedischen Prinzips auftriebslos ist, in die Flüssigkeit eingetaucht werden, so ist hierzu eine Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich, welche die Fließgrenze der Suspension überwindet. Die Eintauchbewegung stagniert, wenn die wirksame Kraft so weit reduziert wird, dass diese mit dem Druckunterschied in der Flüssigkeit oberhalb und unterhalb des eingetauchten Körpers (bei lotrechter Bewegungsrichtung) im Gleichgewicht steht.

Wird die auf den Ballon wirkende Kraft weiter reduziert, so bewirkt der Druckunterschied eine Umkehrung der ursprünglichen Krafrichtung. Die Resultierende ist nun in Richtung des geringeren Druckes oberhalb des Ballons gerichtet. Es wirkt eine Auftriebskraft auf den Ballon, wodurch der Körper nun die Bestrebung hat, in der Flüssigkeit aufzusteigen. Die Suspension kann den Körper aber erst umfließen, wenn die Fließgrenze innerhalb der Suspension überschritten wird. Um den Ballon in Richtung Oberfläche zu bewegen, ist somit wieder eine Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich.

Mit diesem Tauchballon-Prinzip können auch die Ergebnisse der nachfolgend beschriebenen Auftriebsversuche an Rohren anschaulich erklärt werden.

3.4.2.2 Laborversuche zur Auftriebswirkung in Suspensionen

Bei den Laborversuchen zur Auftriebswirkung in Suspensionen wird ein an beiden Stirnseiten verschlossenes Rohr an einer Haltevorrichtung befestigt. Das Rohr wird in waagerechter Lage innerhalb eines Glasbeckens fixiert, die Haltevorrichtung ist über eine Kraftmessung an einem äußeren Rahmen zur Lastabtragung befestigt (Bild 19).

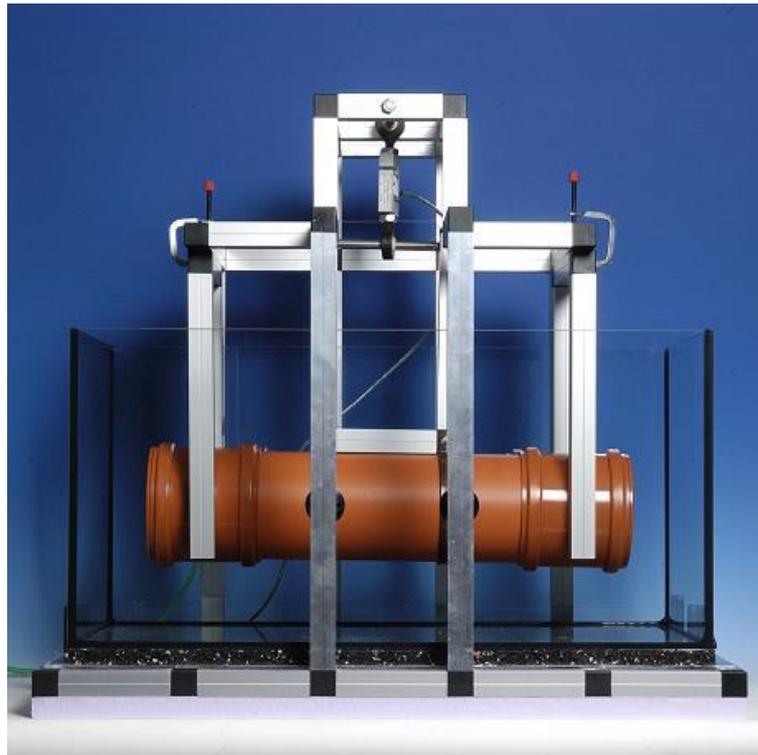


BILD 19: VERSUCHSANORDNUNG ZUR MESSUNG DER AUFTRIEBSWIRKUNG IM LABOR

Die Funktion des Versuchsaufbaus wird zunächst in einem Vorversuch getestet. Hierzu wird über eine Kreiselpumpe Wasser in das Becken gefördert. Die Öffnung der Förderleitung befindet sich unmittelbar oberhalb des Beckenbodens, der Flüssigkeitsspiegel im Becken wird über eine Druckmessung kontrolliert.

Für die Durchführung der Versuche wird das Becken kontinuierlich befüllt, während der Füllstand und die Kraft an der Aufhängevorrichtung des Rohres gemessen werden. Die ersten Versuche mit Wasser dienen der Überprüfung der Versuchstechnik und zeigen die erwartungsgemäßen Ergebnisse, welche im Nachfolgenden kurz dargestellt werden.

Zu Beginn der Versuche wird an der Aufhängung eine Zugkraft gemessen, die dem Eigengewicht des Rohres einschließlich der Befestigungsvorrichtung entspricht. Mit steigendem Wasserstand ändert sich die gemessene Krafttrichtung. Sobald die effektiven Auftriebskräfte das Eigengewicht der eingetauchten Konstruktion übersteigen, werden Druckkräfte gemessen. Aufgrund des kreisförmigen Querschnitts des Rohres entspricht der Kraftverlauf über die Eintauchtiefe einer Sinuskurve im Bereich von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$. Geringfügige Abweichungen ergeben sich aus der resultierenden Verdrängung durch die ebenfalls eingetauchte Befestigungsvorrichtung. Nachdem das Becken vollständig gefüllt ist, wird die Laufrichtung der Kreiselpumpe umgekehrt und das Wasser aus dem Glasbecken gepumpt. Beim Entleeren des Beckens weist die Kurve einen annähernd analogen Verlauf im Vergleich zum Befüllvorgang auf. Auch hier ergeben sich geringe Abweichungen durch die Befestigungskonstruktion, da teilweise Wasser in die Hohlprofile eindringt, das - zeitverzögert zum Entleeren des Beckens - aus den Profilen entweicht.

In Bild 20 ist der an der Aufhängung gemessene Kraftverlauf über die Füllstandhöhe im Becken aufgetragen.

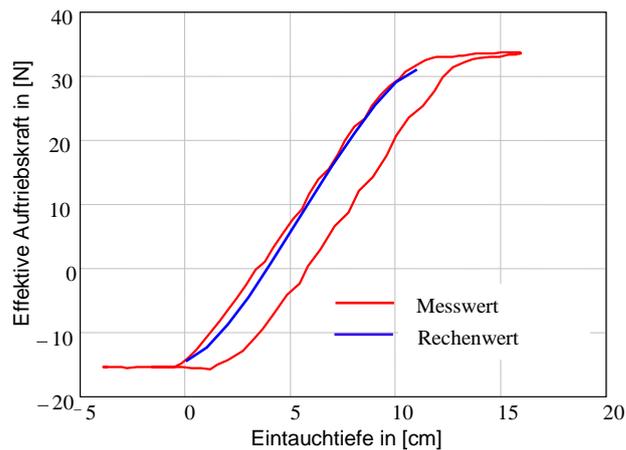


BILD 20: LABORVERSUCH ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON WASSER

Dieser Versuch wird anschließend unter Verwendung einer Bentonitsuspension wiederholt.

Die Ergebnisse dieser Versuche lassen sich durch den unter 3.4.2.1 beschriebenen Tauchballon-Effekt anschaulich erläutern. Im Unterschied zum gefüllten Ballon ist das luftgefüllte Rohr leichter als die umgebende Suspension, wodurch der Druckunterschied oberhalb und unterhalb des Rohres nicht mehr allein durch die äußere Kraft und die behinderte Fließbewegung bestimmt wird.

Die gemessene Auftriebskraft bei zunehmender Eintauchtiefe des Rohres übersteigt die Gewichtskraft des verdrängten Suspensionsvolumens um ca. 30% (Bild 21). In Bild 22 wird der Effekt der behinderten Umströmung des Rohres erkennbar. Hierdurch ergibt sich auf der Unterseite des Rohres ein höherer Flüssigkeitsdruck als oberhalb des Rohres und somit eine erhöhte effektive Auftriebskraft.

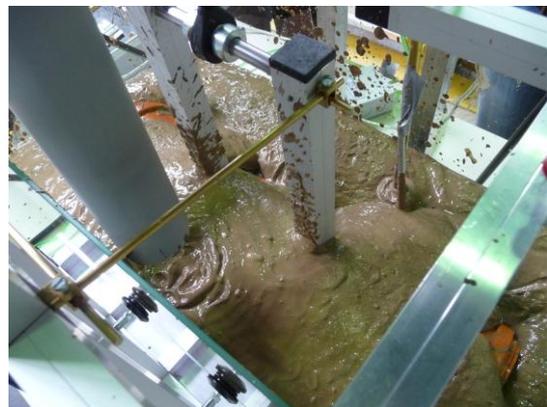
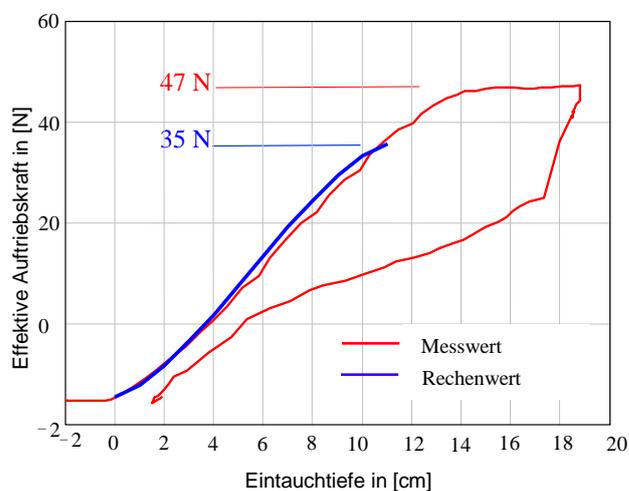


BILD 21: LABORVERSUCH ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON SUSPENSIONEN

Diese erhöhte Auftriebskraft bleibt erhalten, wenn der Flüssigkeitsspiegel bei vollständig getauchtem Rohr konstant bleibt. Die Auftriebskräfte infolge der Druckverteilung in der Suspension und die Haltekräfte befinden sich im Gleichgewicht. Eine Strömung in der Suspension zum Ausgleich der Druckunterschiede wird durch die Fließgrenze behindert.

Wird anschließend der Suspensionsspiegel im Glasbecken wieder gesenkt, ist zunächst ein schneller Abfall der Druckkraft in der Rohraufhängung zu beobachten. Dies entspricht dem Effekt der Strö-

mungsumkehr, wodurch sich der partielle Überdruck an der Unterseite des Rohres schnell abbauen kann, bis sich schließlich beim weiteren Absinken des Suspensionsspiegels die Druckverhältnisse innerhalb der Suspension im Bereich des Rohres umkehren. Der hierbei entstehende, partielle Überdruck oberhalb des Rohres kann sich jedoch nicht wie bei dem Tauchballon auswirken und die Krafrichtung in der Rohraufhängung umkehren. Hierzu ist die Auswirkung des geringen Rohrgewichtes gegenüber dem Gewicht der Suspension zu groß, so dass die Auftriebswirkung erhalten bleibt. Jedoch ist hierdurch die ausgeprägte Hysterese bei sinkendem Flüssigkeitsspiegel zu erklären.



BILD 22: NIEDRIGER SUSPENSIONSSPIEGEL OBERHALB DES ROHRES

Aus diesen Versuchen wird der Zusammenhang zwischen der effektiven Auftriebskraft und der Wichte der Suspension ersichtlich. Der Druckunterschied in Strömungsrichtung, der für den Auftrieb eines Tauchkörpers ursächlich ist, hängt von dem verdrängten Flüssigkeitsvolumen, dem Unterschied der Wichten von Körper und Flüssigkeit sowie der Fließgrenze ab, welche bewirkt, dass sich ein zusätzlicher Druckunterschied infolge behinderter Strömung einstellen kann.

3.4.3 Stützwirkung auf Grabenwände

Bei Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung sollte der Grabenverbau gezogen werden, solange das Verfüllmaterial fließfähig ist und sich die entstehende Verbauspur schließen kann (vgl. z. B. Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen, *FGSV, 2010*). Hierbei ist die Standsicherheit des Grabens gemäß DIN 4126 in jedem Bauzustand und in allen Rückbauzuständen zu gewährleisten. Das noch fließfähige Verfüllmaterial muss daher in der Lage sein, während und nach dem Ziehvorgang, die Grabenwand zu stützen.

Bei der Beschreibung der Stützwirkung auf Grabenwände sowie der Stabilität von Suspensionen einerseits und bei der Berechnung der effektiven Auftriebskräfte andererseits werden zwei unterschiedliche Effekte berücksichtigt. So wird beim Vorgang des Absinkens einzelner Zuschlagkörner in der Suspension idealisierend von einer schleichenden Umströmung – entsprechend dem Fließvorgang des Fluids in den Porenkanälen – ausgegangen, bei welcher Schubspannungen in der Größe der Fließgrenze auf die Kugel übertragen werden (*Saak et al., 2001*). Der Effekt der tatsächlich wirksamen Auftriebskräfte hingegen wird maßgeblich von einem behinderten Fließvorgang der Suspension in einem Fließbereich um die Kugel bestimmt, bei dem sich ein Druckgefälle in Fließrichtung ausbildet.

Die maßgebenden Parameter für beide Vorgänge sind die Fließgrenze und die Wichte der tragenden Mehlkornsuspension (Fluid). Der Begriff der tragenden Mehlkornsuspension beschreibt die flüssige Phase der Suspension, deren Feststoffe so klein sind, dass diese vorwiegend durch elektrostatische

Kräfte in Schwebelage gehalten werden. Diese Mehlkornsuspension trägt über die bereits beschriebenen Effekte die groben Zuschlagkörner der Suspension.

3.4.4 Maßgebende Parameter von Verfüllbaustoffen und deren Messung

Die wichtigsten Eigenschaften der noch flüssigen Verfüllbaustoffe sind:

- Stabilität der Suspension
- Effektive Auftriebswirkung auf das Rohr, wodurch sich die Belastung auf das Rohr und die Anforderungen an eine ausreichende Lagesicherung ergeben
- Stützwirkung der Suspension im offenen, unverbauten Graben

Die wichtigsten Parameter zur Quantifizierung der Eigenschaften einer Suspension sind:

- Wichte der Suspension
- Kornverteilung der Zuschläge
- Fließgrenze der Suspension

Während die Messung der Suspensionswichte und der Kornverteilung der Zuschläge nur einen geringen Aufwand erfordert, ist eine zuverlässige Messung der Fließgrenze τ_f bisher nur in Laborversuchen, z. B. mit dem Präzisions-Flügelschergerät (Bild 23), möglich.



BILD 23: PRÄZISIONS-FLÜGELSCHERGERÄT (WILLE GEOTECHNIK, [ONLINE])

Die bekannten einfachen Messverfahren, z. B. aus der Geotechnik (Kugelharfe, Pendelgerät) oder aus der Betontechnologie (z. B. Ausbreitmaßversuch), liefern bei Versuchen mit flüssigen Verfüllbaustoffen keine verwertbaren Ergebnisse für die Fließgrenze. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen sind im zweiten Bereich der Ausführungen „Laboruntersuchungen – Entwicklung und Erprobung eines Baustellenmessgerätes und Versuche zum Materialverhalten von fließfähigen Verfüllbaustoffen“ (Kapitel 4 bis 7) näher beschrieben. Im Zuge einer detaillierten Erläuterung des Entwicklungsprozesses eines baustellentauglichen Messverfahrens zur Bestimmung der maßgeblichen Parame-

ter bezüglich einer Charakterisierung der fließfähigen Verfüllbaustoffe wird auf diese Kapitel des Forschungsvorhabens verwiesen. An dieser Stelle sollen die aus den Versuchen gewonnen Erkenntnisse zur Praktikabilität anhand des entwickelten Baustellenmessgerätes aufgezeigt werden.

In den Versuchen mit Kugelharfe und Pendelgerät wird der Widerstand einer in der Suspension befindlichen Kugel gegen den Bewegungsbeginn gemessen. Hierzu wird bei dem Pendelgerät nach Weiß (1971) eine Kugel an einem Faden befestigt und in einen suspensionsgefüllten Versuchsbehälter getaucht. Die Kugel wird aus der lotrechten Position ausgelenkt und beschreibt anschließend eine kreisförmige Bewegung um den Befestigungspunkt des Fadens (Bild 24). Unter Einwirkung der Schwerkraft bewegt sich die Kugel in der Suspension wieder auf ihre Ausgangsposition zu. Entlang der Kreisbahn wird die Komponente der Gewichtskraft, die in Bewegungsrichtung orientiert ist, stetig kleiner, bis die Kugel schließlich in einer Position verharrt. Bei der Auswertung des Versuches wird davon ausgegangen, dass durch die Umströmung der Kugel an der Kugeloberfläche Schubspannungen übertragen werden, die schließlich zur Stagnation der Bewegung führen, sobald die Fließgrenze der Suspension der Komponente der Gewichtskraft entspricht.

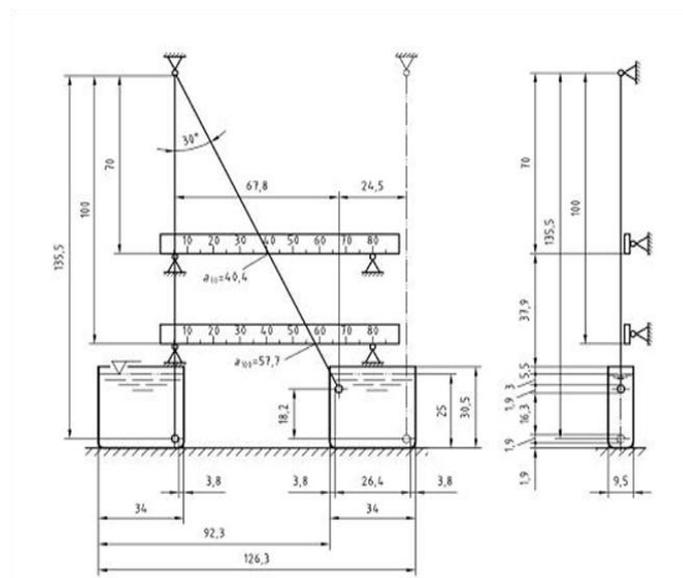


BILD 24: PENDELGERÄT NACH WEIß ZUR ERMITTLUNG DER FLIEßGRENZE VON BENTONITSUSPENSIONEN (DIN 4127, 1986)

Die Widerstandskraft der Kugel wird anschließend auf deren Oberfläche bezogen und somit die effektive Fließgrenze τ_0 als Oberflächenspannung bestimmt (Gerlach, 1999).

Der mathematische Ansatz für die Widerstandskraft P' lautet:

$$P' = \frac{\pi^2 \cdot d^2}{4} \cdot \tau_0 \quad \text{Gl. 3.5}$$

Setzt man für P' die Eigenlast der Kugel unter Auftrieb ein:

$$G_K = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid} \quad \text{Gl. 3.6}$$

So erhält man:

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot d \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid}}{3 \cdot \pi} = 0,21 \cdot d \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid} \quad \text{Gl. 3.7}$$

Nach *Weiß (1971)* gilt zwischen der Fließgrenze τ_f , die für eine Verfestigungszeit von $t = 1$ min bei einer Versuchstemperatur von $T = (20 \pm 2) \text{ °C}$ definiert ist, und der effektiven Fließgrenze τ_0 der Zusammenhang $\tau_f \approx 0,7 \cdot \tau_0$.

Damit ergibt sich:

$$\tau_f = 0,15 \cdot d \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid} \quad \text{Gl. 3.8}$$

Dieser von *Weiß (1971)* empirisch ermittelte Korrekturfaktor gilt zunächst nur für typische Stützsuspensionen des Schlitzwandbaus und kann als Bestätigung des zuvor beschriebenen Ansatzes des Druckausgleiches infolge räumlicher Umströmung der Kugel in einer Suspension betrachtet werden. Würde man den gemessenen Widerstand ohne Abminderung als Effekt der oberflächlich auf der Kugel wirksamen Schubspannung interpretieren, würde sich durch die Vernachlässigung der behinderten Strömung eine zu große Fließgrenze errechnen.

Insgesamt scheint die Anwendbarkeit des Messverfahrens von *Weiß (1971)* zunächst auf die Untersuchung von Tonsuspensionen beschränkt zu sein. So hat sich in eigenen Versuchen herausgestellt, dass weder die Bauart des Gerätes noch der empirische Ansatz zur Auswertung der Messergebnisse für eine Verwendung mit fließfähigen Verfüllmaterialien geeignet sind.

Um den Parameter Fließgrenze der flüssigen Verfüllbaustoffe dennoch in einer einfachen baustellen-tauglichen Weise messen zu können, wurde das nachfolgend beschriebene modifizierte Pendelgerät entworfen, das in nahezu allen Versuchen Messwerte liefert, die den Laborwerten weitgehend entsprechen. Größere Abweichungen treten nur bei Verwendung hoher Konzentrationen bestimmter Zuschlagstoffe auf, die eine maßgebliche Reduzierung der Oberflächenspannung bewirken. Ersetzt man bei diesem Gerät den Flügel durch eine Kugel, so ergeben sich ebenfalls zutreffende Messwerte, wenn bei der Auswertung eine räumliche Umströmung der Kugel vorausgesetzt wird. Diese Ergebnisse können auch als Bestätigung für den Berechnungsansatz der effektiven Auftriebskräfte betrachtet werden.

Bei seinen Untersuchungen zur Stabilität von Frischbetonen bezieht sich *Wüstholtz (2005)* auf den Berechnungsansatz von *Saak et al. (2001)*, wobei dieser die Fließgrenze der Frischbetonsuspensionen mittels Rheometer bestimmt. Die Überlegungen zur Wichte von Suspensionen legen jedoch den Schluss nahe, dass für die auf den Wichteunterschied bezogene Fließgrenze, die ein Kriterium für das Absinken des Zuschlagkornes im Zementleim darstellt (*Saak et al., 2001*), nicht unmittelbar mit der im Rheometer gemessenen Fließgrenze vergleichbar ist. Eine stabile Suspension hoher Wichte weist einen hohen Flüssigkeitsdruck in der Suspensionsmatrix zwischen den Zuschlagkörnern auf. Ein Absinken der Zuschlagkörner wird durch die Behinderung der Fließbewegung in den Porenräumen verhindert. Wird durch einen eingetauchten Körper der Druck in der flüssigen Phase partiell weiter erhöht, so beginnt die Flüssigkeit den Körper zu umströmen, sobald die Fließgrenze überschritten wird. In einer konzentrierten Suspension großer Wichte beginnt das Absinken des Tauchkörpers somit eventuell schon bei einer geringen zusätzlichen Erhöhung des Partialdruckes in der Suspension, also bereits vor dem Erreichen der gemessenen Fließgrenze, da Fließgrenze und Wichte nicht getrennt voneinander betrachtet werden dürfen. Dies gilt auch für den Nachweis der inneren Standsicherheit eines offenen suspensionsgestützten Schlitzes gemäß *DIN 4126 (2008)*. Sobald die Wichte der Suspension erheblich von dem Wert für Wasser abweicht, sollte die zur Verfügung stehende Fließgrenze entsprechend reduziert, also eine wirksame Fließgrenze ermittelt werden.

Für die Ermittlung der wirksamen Fließgrenze $\Delta\tau_f$ einer Suspension wird die gemessene Fließgrenze τ_f um die Mindestfließgrenze $\tau_{0,min}$ für den Nachweis der Stabilität der Suspension (Saak et al., 2001) vermindert.

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} \quad \text{Gl. 3.9}$$

Es folgt:

$$\tau_{0,min} = \frac{4}{3} \cdot (\gamma_{Korn} - \gamma_{Fluid}) \cdot r_{Korn} \quad \text{Gl. 3.10}$$

mit

$$\begin{aligned} \gamma_{Korn} &= \text{Wichte des Zuschlagskorns} \\ \gamma_{Fluid} &= \text{Wichte des Fluid (tragende Mehlkorn-Suspension)} \\ r_{Korn} &= \text{Radius des Zuschlagskorns} \end{aligned}$$

Für die nachfolgenden Versuche zur Ermittlung der Fließgrenze werden Versuche an einem Präzisions-Flügelchergerät und dem neu entwickelten modifizierten Pendelgerät durchgeführt (Bild 25). Der Entwicklungsprozess dieses modifizierten Pendelgeräts sowie die begleitenden Versuchsdurchführungen zur Bestimmung der Scherfestigkeit von fließfähigen Verfüllbaustoffen sind im weiteren Verlauf des Abschlussberichtes näher erläutert. Auf eine detaillierte Beschreibung dieses Prozesses sowie der entsprechenden Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet.

Das Pendelgerät besteht im Wesentlichen aus einem Traggestell und einem Tauchkörper (Kugel oder Flügel), welcher über einen Kunststofffaden und zwei Umlenkrollen mit einem Gewichtskörper verbunden ist.

Der Gewichtskörper ist ein geschlossener, wassergefüllter Zylinder, der sich als Kolben in einem offenen äußeren Zylinder bewegt. Der äußere Zylinder wird ebenfalls mit Wasser gefüllt, wodurch der Kolben bei steigendem Wasserspiegel im Zylinder auftreibt, da seine Wichte aufgrund eines geringen Restvolumens an Luft im Kolben geringer ist als die des Wassers.

Der Tauchkörper am anderen Ende des Kunststofffadens wird in einem mit Suspension gefüllten Probebehälter abgesenkt.

Der Probebehälter, einschließlich Tauchkörper, befindet sich auf einer Waage, die das Gesamtgewicht von Behälter und Suspension anzeigt, während die Gewichtskraft des Tauchkörpers über den Kunststofffaden auf den Kolben wirkt. Wird nun der Wasserstand im Zylinder reduziert, verringert sich die Eintauchtiefe des Kolbens, wodurch sich die Auftriebswirkung auf den Kolben ebenfalls reduziert. Das Gewicht des Kolbens, das über den Kunststofffaden auf den Tauchkörper wirkt, nimmt zu. Der nur noch teilweise eingetauchte Kolben hat nun das Bestreben, den Tauchkörper aus der Suspension herauszuziehen. Aufgrund ihrer Fließgrenze können in der Suspension Scherkräfte mobilisiert werden, die der Vertikalbewegung des Tauchkörpers in der Suspension entgegenwirken.

Die Größe der mobilisierten Scherkräfte entspricht der Abnahme der gemessenen Gewichtskraft des gefüllten Probenbehälters während der Versuche.

Bei dem Pendelgerät kann alternativ eine Kugel oder ein Flügel als Tauchkörper benutzt werden. Die Ergebnisse des Kugelpendels (Bild 26) liegen konstant oberhalb der Messerwerte des vergleichbaren Flügelpendels, dessen Werte weitgehend mit den Werten des Labor-Flügelchergerätes übereinstimmen. Anders als bei den Versuchen mit der Kugel können sich bei Verwendung eines Flügels aufgrund der geringen Kantenflächen des Flügels keine ausgeprägten Druckunterschiede über die Höhe des Flügels ausbilden. Der Fließvorgang findet somit im Wesentlichen entlang der senkrechten Flügelflächen statt. Bei der Kugel erfolgt der Fließvorgang wegen der räumlichen Ausdehnung des Druckbe-

reichs nicht ausschließlich an der Oberfläche der Kugel, sondern auch noch in einem Abstand zur Kugeloberfläche. Der effektive Radius des Fließbereiches ist somit um einiges größer als der tatsächliche Kugelradius. Berücksichtigt man einen entsprechend vergrößerten Fließkanal, so lassen sich auch die Versuche mit der Kugel zutreffend auswerten.

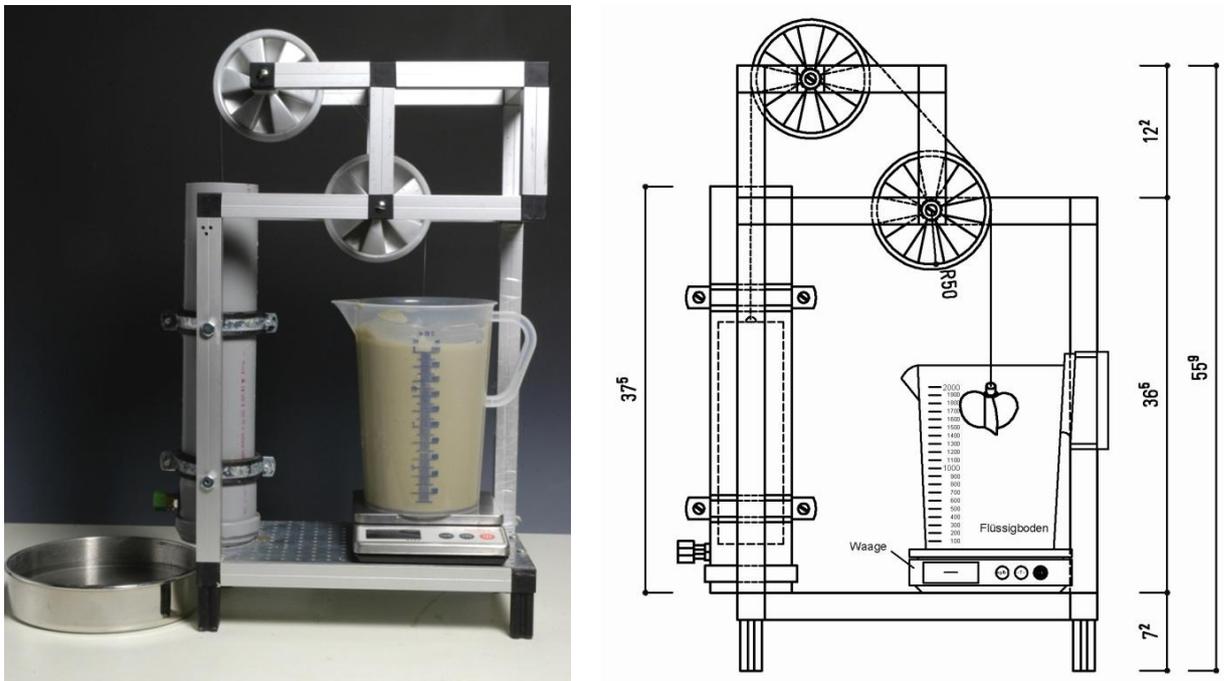


BILD 25: VERTIKALPENDELGERÄT (MODELL RECHTS UND KONSTRUKTIONSZEICHNUNG LINKS)

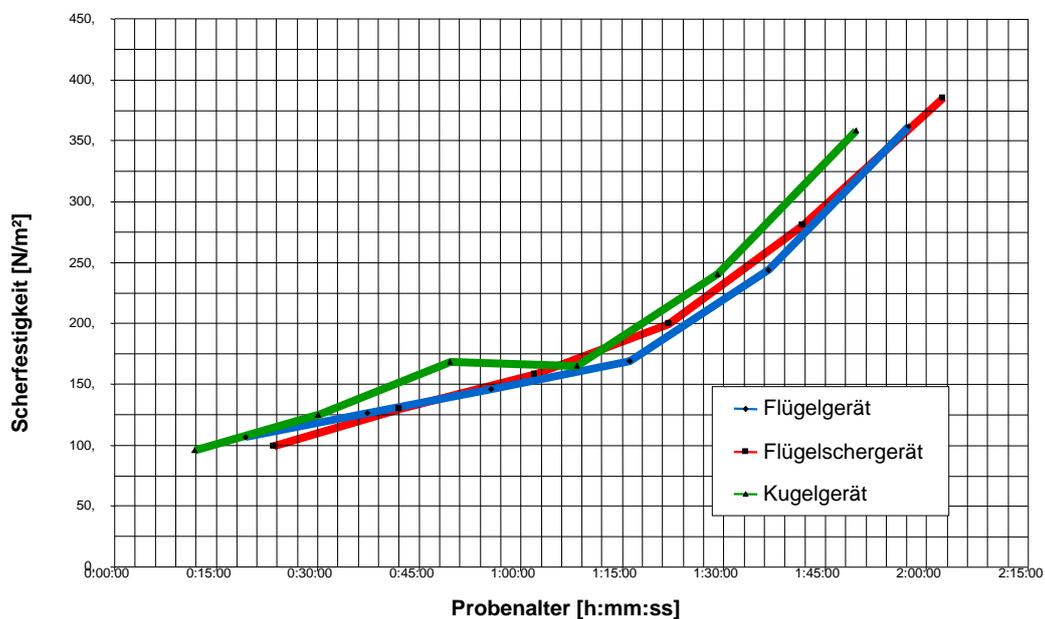


BILD 26: AUSWERTUNG DER MESSUNGEN MITTELS SCHERGERÄT UND MODIFIZIERTEM PENDELGERÄT

Bei der Umströmung der Kugel, wie sie z. B. beim Kugelgerät stattfindet, muss die flüssige Phase aus dem Bereich hohen Druckes in den Bereich niedrigeren Druckes fließen. Dieser notwendige Druckausgleich ermöglicht erst die Bewegung der Kugel in der flüssigen Phase, setzt aber gleichzeitig eine räumliche Umströmung der Kugel voraus. Als Näherungsansatz für diesen Fließbereich wird eine Hüllkugel mit dem Radius $R = r \cdot \sqrt{2}$ gewählt. Die Fläche des Kreisringes im Querschnitt durch Hüllkugel und Kernkugel entspricht dabei der Querschnittsfläche der Kernkugel (Bild 27). Schubspannungen,

die den Volumenstrom behindern, wirken auf beiden, den Strömungskanal begrenzenden Kugeloberflächen.

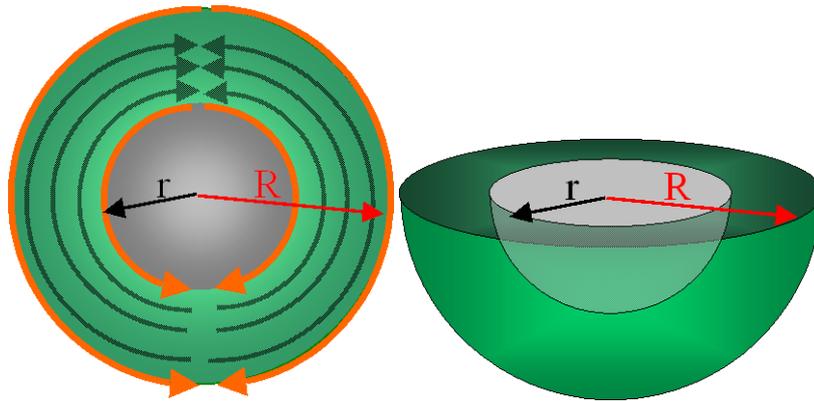


BILD 27: RÄUMLICHER FLIEßBEREICH EINER UMSTRÖMTEN KUGEL

Aus der Bedingung, dass die Kreisringfläche der Kreisfläche entsprechen soll, ergibt sich für den Radius der Hüllkugel:

$$r^2 \cdot \pi = (R^2 - r^2) \cdot \pi \quad \text{Gl. 3.11}$$

$$R^2 = 2 \cdot r^2 \quad \text{Gl. 3.12}$$

$$R = \sqrt{2} \cdot r \quad \text{Gl. 3.13}$$

Der Fließbereich wird durch die Oberflächen der inneren Kugel und der Hüllkugel begrenzt. Auf beiden Kugeloberflächen können Schubspannungen bis zur Größe der Fließgrenze übertragen werden.

Die Fließgrenze kann somit aus der im Versuch gemessenen maximalen Zugkraft F ermittelt werden.

$$\tau_f = \frac{F}{4 \cdot \pi \cdot r^2 + 4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \text{Gl. 3.14}$$

Mit Gl. 3.12 folgt:

$$\tau_f = \frac{F}{12 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{Gl. 3.15}$$

3.5 Standsicherheit des offenen Grabens

Bei Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung sollte der Grabenverbau gezogen werden, solange das Verfüllmaterial fließfähig ist und die entstehende Verbauspur schließen kann (vgl. z. B. Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen - FGSV). Hierbei ist die Standsicherheit des Grabens gemäß *DIN 4126 (2008)* in jedem Bauzustand und in allen Rückbauzuständen zu gewährleisten. Das noch fließfähige Verfüllmaterial muss daher in der Lage sein, während und nach dem Ziehvorgang, die Grabenwand stützen.

In den aktuellen Regelwerken und Vorschriften sind allgemeine Hinweise auf den Rückbauzustand zu finden, konkrete Vorgaben zum Nachweis des offenen, flüssigkeitsgestützten Grabens fehlen jedoch. Aus bodenmechanischer Sicht ist das Prinzip der Stützung des offenen Grabens durch fließfähige Verfüllmaterialien mit der Suspensionsstützung im Schlitzwandbau prinzipiell vergleichbar, daher werden zunächst die Regelungen und die Nachweisführung der Schlitzwandnorm näher betrachtet.

Die Materialeigenschaften der im Schlitzwandbau üblichen Stützsuspensionen und der flüssigen Verfüllmaterialien unterscheiden sich jedoch teilweise erheblich, so dass in einem weiteren Schritt ein eigenständiges Nachweisformat für den offenen Graben in Anlehnung an die Schlitzwandnorm entwickelt wird.

3.5.1 Nachweis nach DIN 4126

Für die flüssigkeitsgestützte Erdwand sind nach E DIN 4126:2004-08 („Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden“) die folgenden Nachweise zu führen:

- Zunächst muss für den Nachweis der Standsicherheit sichergestellt sein, dass der angesetzte, statisch erforderliche Flüssigkeitsspiegel im offenen Schlitz nicht unterschritten wird. Hierzu ist der Verlust an stützender Flüssigkeit, der beim Anschneiden von Hohlräumen, wie z. B. Rohrleitungen, entstehen kann, abzuschätzen. Auch der Flüssigkeitsverlust durch Infiltration von Bodenschichten mit großen Durchlässigkeiten ist zu berücksichtigen und ein entsprechendes Volumen an Ersatzmaterial ist vorzuhalten.
- „Sicherheit gegen den Zutritt von Grundwasser in den Schlitz und Verdrängen der stützenden Flüssigkeit“: Der hydrostatische Druck der stützenden Flüssigkeit muss an jeder beliebigen Stelle größer als der 1,05-fache Druck des Grundwassers sein.
- „Sicherheit gegen Abgleiten von Einzelkörnern und Korngruppen“: Der Nachweis dient der Prüfung einer ausreichenden Übertragung der Flüssigkeitsdruckdifferenz auf das Korngerüst, ohne dass Einzelkörner, Korngruppen oder dünne Bodenschollen aus der Grabenwand abgleiten (Nachweis der inneren Standsicherheit).
- „Sicherheit gegen den Schlitz gefährdende Gleitflächen im Boden“: Das Abgleiten eines monolithischen Erdkörpers in den offenen Schlitz hinein ist durch eine ausreichend große Stützkraft der Suspension auszuschließen. Der rechnerische Nachweis ist erbracht, wenn in jeder Tiefe der suspensionsgestützten Erdwand die verfügbare Stützkraft größer ist als die durch Gleitflächen im Boden hervorgerufene Erddruckkraft (Nachweis der äußeren Standsicherheit).

Die sichere Anwendung der Berechnungsansätze zu den beiden letztgenannten Nachweisen erfordert das Verständnis des Prinzips der Übertragung des Stützdruckes der Suspension auf das Korngerüst des Bodens. Aus diesem Grund wird nachfolgend kurz auf das Prinzip der Flüssigkeitsstützung eingegangen.

3.5.2 Das Prinzip der Flüssigkeitsstützung

Nach DIN 4126 „Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden“ steht zur Stützung einer Erdwand durch Suspensionsdruck nur die Differenz zwischen der hydrostatischen Druckkraft der Stützflüssigkeit im Schlitz und der des Grundwassers im Boden zur Verfügung (Bild 28). Die Übertragung der Stützkraft auf das Korngerüst erfolgt dabei nach zwei prinzipiell unterschiedlichen Mechanismen, entweder durch Normalspannungen, die auf eine oberflächennahe Membran wirken, oder über Schubspannungen, die auf die Oberfläche von Fließkanälen im Boden einwirken.

Die Übertragung des Stützdruckes auf das Korngerüst über Normalspannungen bedarf der Ausbildung einer nur schwer wasserdurchlässigen Membran auf der Oberfläche der zu stützenden Erdwand. Zur Ausbildung einer solchen Membran müssen in der Stützflüssigkeit ausreichend Feststoffpartikel suspendiert sein, die größer sind als der Durchmesser der Porenkanäle des Bodens. Auf der Oberfläche der Erdwand bildet sich dann durch das Abfiltrieren von festen Bestandteilen ein äußerer Filterkuchen, der weitestgehend wasserundurchlässig ist. Da sich die Filterkuchenmembran vor dem Korngerüst des anstehenden Bodens bildet, wirkt das Gefälle zwischen Suspensionsdruck und Erddruck als horizontale Flächenpressung über die Membran direkt auf den Boden. Bei dieser Art der Stützkraftübertragung ist allein der Feststoffgehalt, nicht aber die Fließgrenze der Suspension maßgebend.

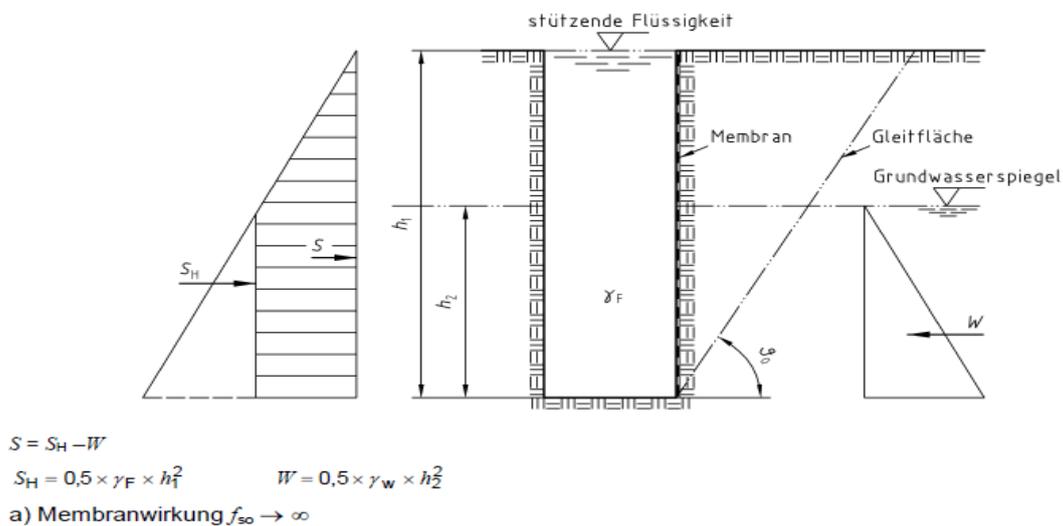


BILD 28: NACHWEIS DER STANDSICHERHEIT VON SCHLITZWÄNDEN – SICHERHEIT GEGEN DEN SCHLITZ GEFÄHRDENDE GLEITFLÄCHEN IM BODEN UNTER ANSATZ DER MEMBRANWIRKUNG (DIN 4126)

Abweichend von den Stützsuspensionen, die im Schlitzwandbau vorwiegend verwendet werden, wird der Feinkornanteil der meisten fließfähigen Verfüllbaustoffe ausreichend groß sein, um den Effekt der Membranbildung sicher zu gewährleisten. Der Nachweis kann in Form eines einfachen Abgleichs der Kornverteilungskurven des anstehenden Bodens und des Verfüllmaterials erfolgen. Ein zusätzlicher Nachweis der Eindringtiefe der Suspension in den Boden ist dann nur noch in Ausnahmefällen erforderlich.

Lasten aus Baufahrzeugen und Aushubgeräten brauchen gemäß *DIN 4126 (2008)* bei der Erddruckermittlung nicht berücksichtigt zu werden, wenn die Leitwände und deren Aussteifung für diesen Erddruck bemessen sind. Diese Regelung kann sinngemäß auf die Methode der flüssigen Grabenverfüllung angewendet werden, wenn die Funktion der Leitwände z. B. von den Kammerplatten eines entsprechenden Systemverbaus übernommen werden.

Grobkörnige Böden können die Bildung einer Membran behindern, die Übertragung der Stützkraft kann dann über Schubspannungen zwischen Suspension und Kornoberfläche erfolgen. Hierbei dringt die Suspension zunächst in das Korngerüst ein. Die Stagnation des Fließvorgangs und die Übertragung der Flüssigkeitsdruckdifferenz auf das Korngerüst setzen voraus, dass die Stützflüssigkeit eine Scherfestigkeit besitzt. Zum Ausgleich des hydrostatischen Druckunterschiedes zwischen Suspensions- und Grundwasserspiegel dringt die Suspension so weit in den Boden ein, bis ein Ausgleich zwischen Suspensionsdruckkraft und Druckkraft des Grundwassers erreicht wird. Beim Eindringen der Suspension in den Boden wird jedes Einzelkorn im Eindringbereich von der Suspension umflossen. Da die Oberfläche jedes Einzelkorns gleichzeitig Wandung eines Porenkanals ist, werden auf die Kornoberflächen Schubspannungen von der Größe der Fließgrenze ausgeübt, die eine Kraft in Fließrichtung erzeugen. Die Kraft, die sich über das Integral der Schubspannungen auf den Oberflächen der umströmten Körner berechnet, wird innerhalb des Korngerüsts durch Kornkontakt auf die benachbarten Körner weiter gegeben (Bild 29).

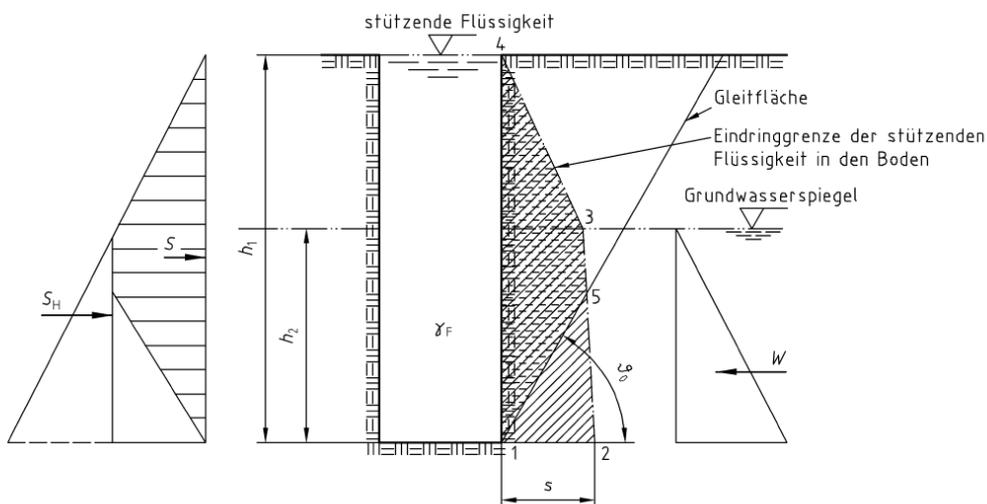


BILD 29: NACHWEIS DER STANDSICHERHEIT VON SCHLITZWÄNDEN – SICHERHEIT GEGEN DEN SCHLITZ GEFÄHRDENE GLEITFLÄCHEN IM BODEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER STRÖMUNGSKRAFT IM GLEITKÖRPER (DIN 4126, 2008)

Die Differenzdruckkraft zwischen dem Suspensionsspiegel und Grundwasser wird über die Schubspannung gleichmäßig über die Eindringlänge an das Korngerüst abgegeben und steht in der Summe der Kräfte als effektive Horizontalspannung im Korngerüst zur Stützung der Erdwand zur Verfügung (Bild 30).

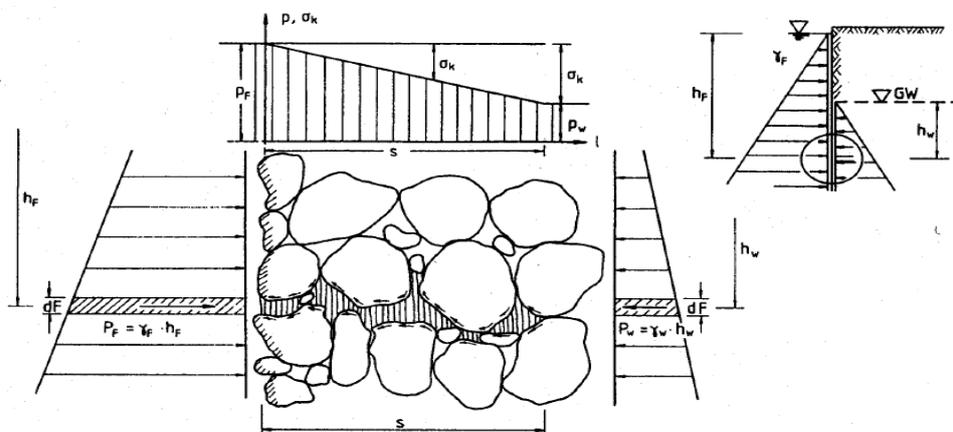


BILD 30: EINDRINGUNG DER SUSPENSION UND KRAFTÜBERTRAGUNG AUF DAS KORNGERÜST (DIN 4126, 2008)

Die Flüssigkeit dringt gerade so tief in den Erdkörper ein, bis die über die Fläche integrierten Schubspannungen der Kraft zum hydrostatischen Druckausgleich gegen den Grundwasserspiegel entsprechen.

Bei beliebig langen Schlitzten kann auf einen detaillierten Nachweis des Eindringens der stützenden Flüssigkeit in das Korngerüst verzichtet werden, wenn ein Druckgefälle von $f_{s0} = 200 \text{ kN/m}^3$ nachgewiesen werden kann. Wird das Druckgefälle nicht genauer ermittelt, darf es bei Tonsuspensionen oder selbsterhärtenden Suspensionen nach der Gleichung

$$f_{s0} = \frac{2 \cdot \tau_f}{d_{10}}$$

ermittelt werden.

Durch Umstellen lässt sich aus der Formel die maximale Korngröße bei 10 % Siebdurchgang berechnen, bis zu der ein genauer Nachweis der Eindringung der Suspension nicht erforderlich wird.

$$d_{10} \leq \frac{2 \cdot \tau_f}{200}$$

$$d_{10} \leq \frac{\tau_f}{100}$$

In dem für fließfähige Verfüllbaustoffe relevanten Bereich ab $\tau_f = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ folgt hieraus erst eine detaillierte Nachweispflicht für rollige Böden mit $d_{10} \geq 1,0 \text{ mm}$.

3.5.3 Ableitung eines Nachweisformates für die innere Standsicherheit suspensionsgestützter Gräben

Der Nachweis gegen Herausbrechen einzelner Körner oder Bodenbereiche sollte in Anlehnung an den Nachweis der Suspensionsstabilität von Frischbeton geführt werden (Bild 31). Hierbei ist wichtig, dass für den Nachweis die Wichte der Mehlkornsuspension betrachtet wird. Im Schlitzwandbau entspricht die Wichte der Bentonitsuspension der Wichte der tragenden Mehlkornsuspension, wodurch eine Differenzierung nicht erforderlich wird. Für die Methode der flüssigen Grabenverfüllung ist diese Unterscheidung aber wesentlich hinsichtlich der Nachweisführung.

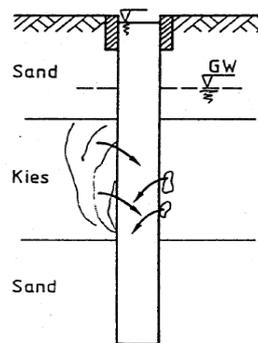


BILD 31: EINDRINGUNG DER SUSPENSION UND KRAFTÜBERTRAGUNG AUF DAS KORNGERÜST (WALZ, 1989)

Das Korngefüge des Bodens kann nach dem Ansatz von Walz vereinfacht als idealisierte Kugelpackung mit Kugeln einheitlichen Durchmessers betrachtet werden. Diese Kugeln haben nun das Bestreben auf einer idealisierten unter dem Winkel α geneigten Ebene aus der unverbauten Grabenwand herauszurollen und dann in dem suspensionsgestützten Graben zu versinken (Bild 32). Dieser Vorgang des Versinkens ist vergleichbar mit dem Absinken von Zuschlagkörnern in einer nicht stabilen Frischbetonsuspension, die ihrerseits mit Suspensionen vergleichbar ist, die für eine flüssige Grabenverfüllung üblicherweise im Kanalbau verwendet wird.

$$\tau_F \geq 0,15 \cdot d \cdot (\gamma_S - \gamma_F) \cdot \sin \alpha.$$

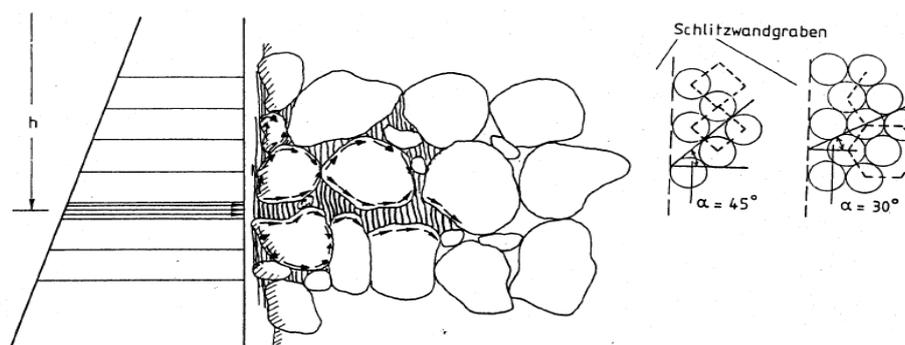


BILD 32: NACHWEIS DER INNEREN STANDSICHERHEIT IN FORM DES EINZELKORNNACHWEISES NACH WEIB (MIKROSKOPISCHE BETRACHTUNGSWEISE) (WALZ, 1989)

Es wird nachfolgend vorgeschlagen, beide Betrachtungsweisen zu kombinieren und für den Nachweis der inneren Standsicherheit des unverbauten suspensionsgestützten Rohrgrabens in Anlehnung an Walz (1989) von einem Winkel der Gleitebene im angrenzenden Boden von $\alpha = 45^\circ$, entsprechend der lockersten Lagerung der Kugelpackung (Bild 33), auszugehen. Diese Annahme berücksichtigt, dass bei

Aushub und Rückbau der Grabensicherung eine Auflockerung der Grabenwand stattfindet, zudem liegt diese Annahme für den Nachweis auf der sicheren Seite.

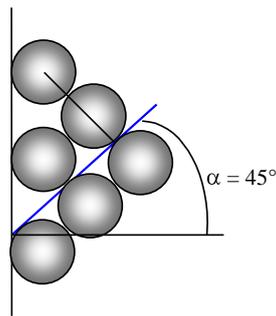


BILD 33: LOCKERSTE LAGERUNG DER KUGELPACKUNG ALS ANSATZ FÜR DEN UNGÜNSTIGSTEN GLEITFLÄCHENWINKEL IM BODEN (WALZ, 1989)

Aus diesen Überlegungen ergibt sich insgesamt der folgende Nachweis für die innere Standsicherheit.

Die Mindestfließgrenze für eine stabile Suspension berechnet sich nach Saak et al. (2001) zu:

$$\tau_{0,min} \geq \frac{4}{3} \cdot \Delta\gamma_{Korn} \cdot r_{Korn}$$

Als ungünstigster Berechnungsfall wird die lockerste Kugelpackung (Walz, 1989) berücksichtigt:

$$\tau_{0,min} \geq \frac{4}{3} \cdot \Delta\gamma_{Korn} \cdot r_{Korn} \cdot \sin\alpha$$

mit $\alpha = 45^\circ$ als konservative Annahme folgt näherungsweise:

$$\tau_{0,min} \geq \Delta\gamma_{Korn} \cdot r_{Korn} \quad \text{Gl. 3.16}$$

Maßgebend wird der Nachweis in der vorgeschlagenen Form bei nichtbindigen Böden.

Der für den Nachweis maßgebende Korndurchmesser sollte d_{90} sein, also der Maschenweite bei 90% Siebdurchgang entsprechen. Ein weiterer Sicherheitszuschlag ist dann nicht erforderlich, da es den Überlegungen von Weiß (1971) folgend ausreicht, wenn das Korngerüst insgesamt gestützt wird. Die kleineren Körner sind dann in der Lage, das gesamte Gefüge ausreichend zu stabilisieren, so dass auch wenn einzelne besonders große Körner aus der Wand abgleiten, ein fortschreitender Versagensmechanismus nicht zu erwarten ist.

Beispielhaft soll für einen typischen groben Kiesboden die minimale Fließgrenze zur Gewährleistung der inneren Standsicherheit des Grabens ermittelt werden.

Für einen groben Kies kann der typische d_{90} -Wert bei 32,5 mm liegen. Hieraus errechnet sich eine minimale Fließgrenze von:

$$d_{90} = 32,5 \text{ mm} \rightarrow r_{Korn} = 16,25 \cdot 10^{-3}$$

$$\gamma_{Korn-Roh} = 27,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_{Fluid} = 11,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta\gamma_{Korn} = 27,20 - 11,00 \cdot 1.000,00 = 16.200,00 \frac{N}{m^3}$$

$$\tau_{0,min} \geq 16.200,00 \cdot 0,01625 = 263,25 \frac{N}{m^3}$$

Dieser Wert wird nicht von allen Verfüllmaterialien, die bspw. bei der Probebaustelle in der Schluchtstraße eingebaut wurden, bereits im Lieferzustand erreicht. Eine Stunde nach dem Einbau in den Graben kann für alle Baustoffe von einer ausreichenden Fließgrenze ausgegangen werden. Dies zeigt die Bedeutung der Fließgrenze für die Standsicherheit des offenen Grabens bei grobkörnigen Böden. In diesen Fällen ist mit dem Hersteller vorab ein ausreichender τ_f -Wert im Lieferzustand zu vereinbaren, bzw. ist die zeitliche Entwicklung der Fließgrenze zu beobachten und der Rückbau der Grabensicherung entsprechend zu verzögern.

3.5.4 Abschätzung des Verlustes an stützender Flüssigkeit

Die Standsicherheit eines mit stützender Flüssigkeit gefüllten Grabens kann nur nachgewiesen werden, wenn der Flüssigkeitsspiegel nicht unter das für den Nachweis mindestens erforderliche Niveau absinkt.

Ein unplanmäßiges Absinken des Flüssigkeitsspiegels kann auftreten, wenn beim Aushub Hohlräume (Bild 34), z. B. Rohrleitungen oder besonders grobporige Bodenschichten angeschnitten werden (Bild 35).

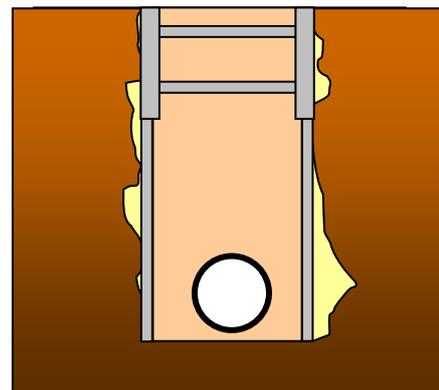


BILD 34: SUSPENSIONSSPIEGEL NACH VERFÜLLEN DES VERBAUTEN GRABENS

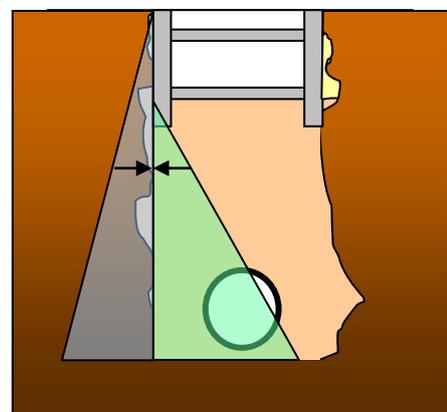


BILD 35: SUSPENSIONSSPIEGEL NACH RÜCKBAU DER DIELEN DES KAMMERDIELENVERBAUS

Insbesondere bei der Methode der flüssigen Grabenverfüllung ist das tatsächliche Volumen des zu verfüllenden Grabens zu ermitteln. Neben der Verbauspur, die beim Rückbau der Grabensicherung entsteht, ist zu berücksichtigen, dass infolge von Ausbrüchen beim Ausheben des Grabens Hohlräumen hinter den Verbauelementen entstehen können, die sich beim Rückbau der Sicherung mit Suspension füllen. Der tatsächliche Rauminhalt des Grabens kann sich hierdurch gegenüber der planmäßigen Geometrie erheblich vergrößern.

In jedem Fall ist der zu erwartende Verlust an stützender Flüssigkeit vor dem Verfüllen des Grabens abzuschätzen und bei der Bereitstellung des fließfähigen Verfüllmaterials zu berücksichtigen. Der Rückbau der Grabensicherung sollte erfolgen, solange ausreichendes Ersatzmaterial zum Ausgleich von Flüssigkeitsverlusten zur Verfügung steht.

3.6 Einschätzung der wirtschaftlichen Aspekte

Der wirtschaftliche Vorteil fließfähiger Verfüllmaterialien im Vergleich zu einer konventionellen Grabenverfüllungen ergibt sich im Wesentlichen aus der Nutzung des Optimierungspotenzials der Bauabläufe bei der Ausführung der Kanalbaumaßnahmen sowie infolge einer größeren Nachhaltigkeit und eines hierdurch reduzierten Sanierungsbedarfs während der gesamten Nutzungsdauer.

Einer Untersuchung von *Günther* (2006) zufolge liegt das größte Einsparpotential bei der Bauausführung im Bereich der Errichtung bzw. der Sanierung von Hausanschlüssen. Hierfür errechnet *Günther* (2006) einen wirtschaftlichen Vorteil von bis zu 19% (vgl. Bild 36).

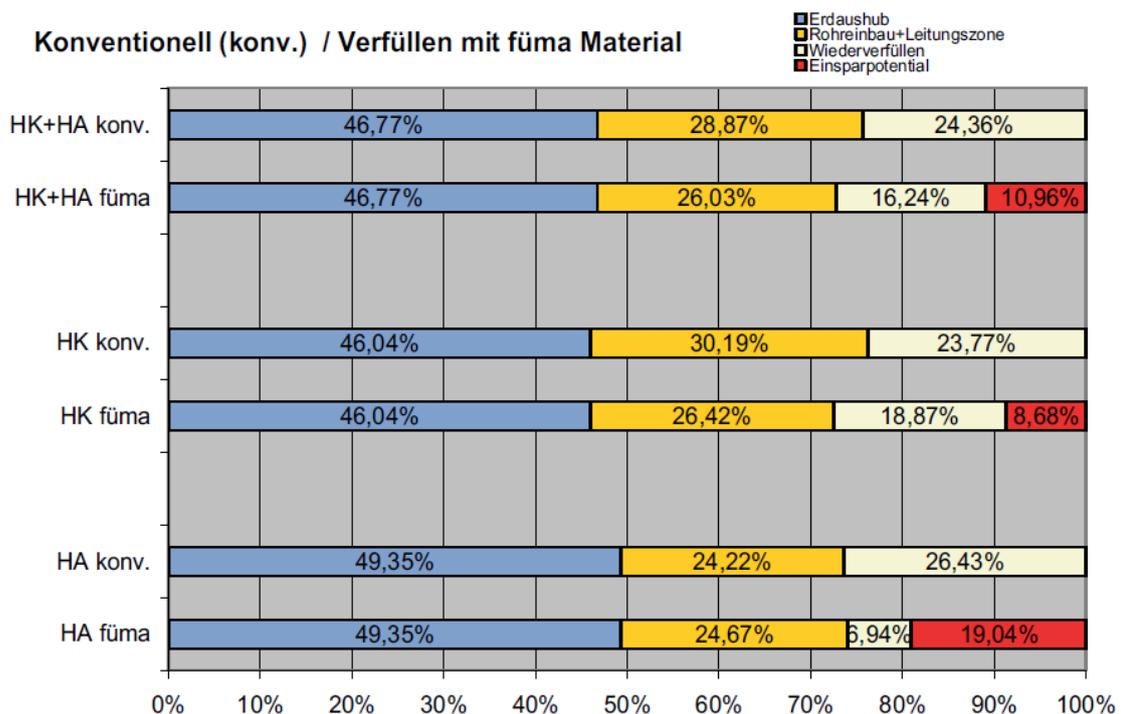


BILD 36: ZEITERSPARNIS BEIM EINSATZ VON FLIEßFÄHIGEM VERFÜLLMATERIAL (HK = HAUPTKANAL, HA = HAUSANSCHLUSS) (GÜNTHER, 2006)

Neben den unmittelbaren Einsparungen bei der Durchführung der Baumaßnahme könnte die Schaffung weiterer Anreize zur Anwendung der Methode der fließenden Grabenverfüllung gesamtökologisch sinnvoll sein. So könnten z. B. verlängerte Inspektionsintervalle für fließend gebettete Hausanschlüsse – die mit der verbesserten Bettung der Rohre zu begründen ist - dazu beitragen, dass auch im privaten Bereich der Hausanschlusssanierung die nachhaltigere Bauweise häufiger zur Anwendung kommt.

4 Untersuchungen zu fließfähigen Verfüllbaustoffen

4.1 Verwendete fließfähige Verfüllbaustoffe

4.1.1 Auswahl der Baustoffe

Für die flüssige Grabenverfüllung im Rohrleitungsbau eignet sich eine Auswahl flüssiger Verfüllmaterialien, die nach ihren Ausgangsmaterialien grob unterschieden werden können in ‚Boden-Bindemittel-Gemische‘ und ‚fließfähige Verfüllmaterialien mit normierten Zuschlägen‘. In den nachfolgenden Untersuchungen werden insgesamt drei Verfüllbaustoffe aus den beiden Gruppen untersucht.

Die zunächst in den Laboren der Hochschule Bochum und der Universität Wuppertal durchgeführten Grundsatzuntersuchungen werden exemplarisch an dem Material RSS[®]-Flüssigboden der Firma EN-REBA Neuss GmbH durchgeführt, dessen spezifische Zusammensetzung im Folgenden kurz erläutert wird. Die Laborversuche werden zur Erprobung von Messmethoden hinsichtlich der Bestimmung der Suspensionsparameter sowie der relevanten Suspensionseigenschaften durchgeführt. Daneben wird exemplarisch an dem RSS[®]-Material der Einfluss von Rezepturänderungen auf die relevanten Suspensionsparameter untersucht.

4.1.2 RSS[®]-Flüssigboden

Der RSS[®]-Flüssigboden setzt sich zu über 90% aus Zuschlagmaterial zusammen, welches aus Recyclingmaterial oder Bodenaushub sowie Zusätzen in Form von

- Plastifikatoren (quellfähiger Ton) zur vorübergehenden Herabsetzung der Scherfestigkeit,
- Stabilisatoren (Kalk oder Zement) zur Stabilisierung des Materials und
- Konditionern (z. B. Zellulose) zur Vermeidung von Nacherhärtung

bestehen kann (Arsic, 2009).

Die Plastifikatoren, z. B. in Form von Montmorillonit-Ton, die sich als Dreischichtminerale durch ihre starke Quellfähigkeit auszeichnen, lagern sich an den Oberflächen des Zuschlagmaterials an. Auf diese Weise entsteht durch das Quellen des Plastifikators eine Gleitschicht zwischen den einzelnen Zuschlagkörnern. Des Weiteren lagern sich an den Tonplättchen einwertige Kationen ab, die dazu führen, dass sich die einzelnen Plättchen voneinander abstoßen und den Gleiteffekt verstärken. Durch die Bindung des Wassers an die Tonminerale wird zusätzlich einer Entmischung des RSS[®]-Flüssigbodens vorgebeugt und ein Drainieren des Wassers in den anstehenden Boden verhindert (Arsic, 2009).

Durch die Abbindereaktionen der Stabilisatoren wird der Suspension zunächst freies Wasser entzogen. Im Fall der Hydratation von Zement werden zwei- und dreiwertige Ionen abgespalten, woraufhin es zu einem Austausch der einwertigen Kationen an den Oberflächen der Tonplättchen gegen jene zwei- und dreiwertigen Ionen kommt. So wird einerseits ein Teil des Wassers von den Plastifikatoren an die Stabilisatoren abgegeben und andererseits wird durch den Prozess der Hydratation der Abstoßeffekt zwischen den Tonplättchen aufgehoben. Dies führt dazu, dass die Gleitschichten zwischen den Zuschlagkörnern sukzessive abgebaut werden (Arsic, 2009).

Die Konditionierstoffe, z. B. in Form von Zellulose, bewirken verzögert eine Bindung des restlichen Wassers, wodurch eine zu starke Nacherhärtung durch die Stabilisatoren verhindert werden soll. Auf diese

Weise werden durch Plastifikatoren und Konditioner 96 bis 98% des Zugabewassers gebunden und nur ein kleiner Teil durch die Stabilisatoren in Calciumsilicathydrat-Fasern überführt, welche in größerer Menge zu einem unerwünschten starren und betonähnlichen Verhalten führen würden (Arsic, 2009).

Nach Herstellerangaben soll durch die oben genannten Eigenschaften eine setzungsarme und schwindfreie Verfestigung des Materials erreicht werden, bei gleichzeitig geringer Nacherhärtung (Arsic, 2009).

Für die Versuche im Labor wird zunächst Flüssigboden nach einem Originalrezept der Firma ENREBA Neuss GmbH verwendet. Variationen des Rezeptes, bei denen der Compound- bzw. Zementgehalt verändert wird, zeigen in welchen Bereichen die Suspensionscharakteristika beeinflussbar sind.

4.2 Messung der Parameter fließfähiger Verfüllbaustoffe

Da in aktuellen Richtlinien, Normen und Regelwerken keine Aussage über konkrete Verfahren zur Eignungsprüfung von fließfähigen Verfüllbaustoffen gemacht werden, erfolgt in diesem Kapitel eine Vorstellung der Verfahren zur Eignungsprüfung von Bentonitsuspensionen, Mörtel und Frischbeton sowie die Überprüfung ihrer Eignung zur Untersuchung fließfähiger Verfüllbaustoffe.

4.2.1 Versuche zur Eignungsprüfung von Bentonitsuspensionen

4.2.1.1 Versuche mit dem Pendelgerät nach Weiß

In Versuchen mit dem Pendelgerät nach Weiß (DIN 4127, 1986) und der Kugelharfe nach von Soos (DIN 4126, 2008) wird der Widerstand einer in der Suspension befindlichen Kugel gegen den Bewegungssinn gemessen. Bild 37 zeigt ein modifiziertes Verfahren bzw. Pendelgerät, bei dem die Auslenkung der Kugel durch die Bewegung eines mit einer Suspension befüllten Behälters ermittelt wird.

Hierzu wird bei dem Pendelgerät nach Weiß (1971) eine Kugel an einem Faden befestigt und in einen suspensionsgefüllten Versuchsbehälter getaucht. Die Kugel wird aus der lotrechten Position ausgelenkt und beschreibt anschließend eine kreisförmige Bewegung um den Befestigungspunkt des Fadens (Bild 37). Unter Einwirkung der Schwerkraft bewegt sich die Kugel in der Suspension wieder auf ihre Ausgangsposition zu. Entlang der Kreisbahn wird die Komponente der Gewichtskraft, die in Bewegungsrichtung orientiert ist, stetig kleiner, bis die Kugel schließlich in einer Position verharret. Bei der Auswertung des Versuches wird davon ausgegangen, dass durch die Umströmung der Kugel, an der Kugeloberfläche Schubspannungen übertragen werden, die schließlich zur Stagnation der Bewegung führen, sobald die Fließgrenze der Suspension der Komponente der Gewichtskraft entspricht.

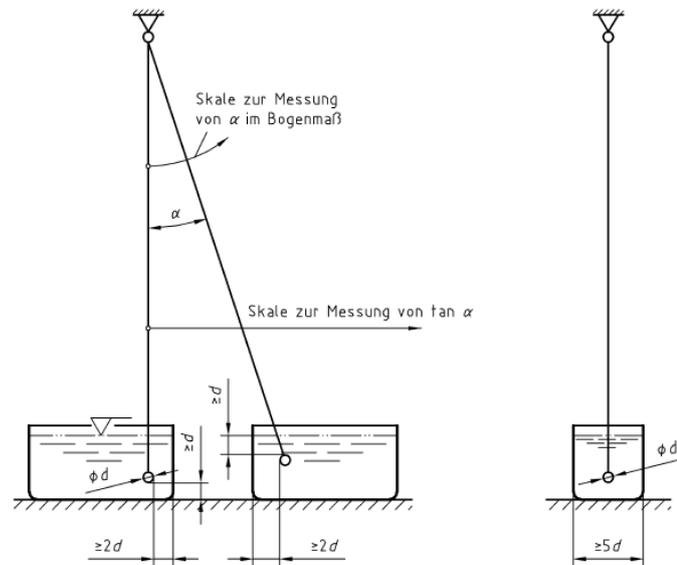


BILD 37: MODIFIZIERTES PENDELGERÄT GEMÄß DIN 4127 (1986)

Dabei wirkt auf die Kugel die in Bild 38 hergeleitete Kraft F , welche in Bewegungsrichtung aufgrund von Scherspannungen auf der Kugeloberfläche entsteht. Mit dem Durchmesser, der Wichte und dem Auslenkungswinkel der Kugel sowie der Wichte der Suspensionsprobe lässt sich im Anschluss an den Versuch die Fließgrenze der Suspension bestimmen (DIN 4127, 1986).

Gemäß Bild 38 wird die Widerstandskraft der Kugel auf deren Oberfläche (Gl. 4.1) bezogen, so dass darauf aufbauend die effektive Fließgrenze τ_0 als Oberflächenspannung bestimmt werden kann (vgl. auch Gerlach, 1999).

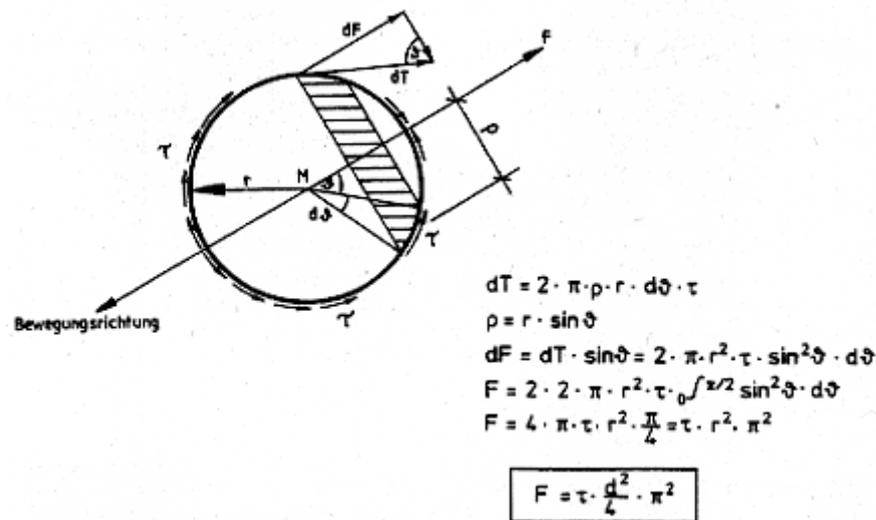


BILD 38: KRAFTWIRKUNG AUF EINE IN EINER SUSPENSION VERSCHOBENEN KUGEL (GERLACH, 1999)

$$F = \tau \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \pi^2$$

Gl. 4.1

Der mathematische Ansatz für die Widerstandskraft P' lautet demzufolge:

$$P' = \frac{\pi^2 \cdot d^2}{4} \cdot \tau_0$$

Setzt man für P' die Eigenlast der Kugel unter Auftrieb ein:

$$G_K = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid}$$

So erhält man:

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot d \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid}}{3 \cdot \pi} = 0,21 \cdot d \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid}$$

Nach *Weiß (1971)* gilt zwischen der Fließgrenze τ_f , die für eine Verfestigungszeit von $t = 1$ min bei einer Versuchstemperatur von $T = (20 \pm 2) \text{ °C}$ definiert ist, und der effektiven Fließgrenze τ_0 der Zusammenhang $\tau_f \approx 0,7 \cdot \tau_0$.

Damit ergibt sich:

$$\tau_f = 0,15 \cdot d \cdot \gamma_{Kugel} - \gamma_{Fluid} \quad \text{Gl. 4.2}$$

Die Anwendbarkeit des oben beschriebenen Messverfahrens von *Weiß (1971)* scheint zunächst auf die Untersuchung von Tonsuspensionen beschränkt zu sein. Für fließfähige Verfüllmaterialien eignet sich dieses Verfahren demzufolge nur in begrenztem Maße, da hier in Abhängigkeit des Größtkorns des Zuschlags und der Größe der Scherfestigkeit eventuell keine exakte Führung der Kugel durch die Suspension möglich ist und somit die endgültige Auslenkung der Kugel variieren kann. Zur Ertüchtigung des Gerätes müssten das Pendel und daraus resultierend die Abmessungen des Gerätes auf die Dichte der fließfähigen Verfüllbaustoffe abgestimmt werden. Versuche einer solchen Ertüchtigung ergaben hinsichtlich der Handhabung und Reproduzierbarkeit der Messungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse und wurden deshalb nicht weiterverfolgt.

4.2.1.2 Versuche mit der Kugelharfe nach von Soos

Bei der im vorangegangenen Kapitel erwähnten Kugelharfe nach von Soos, die ein weiteres Verfahren zur Messung der Fließgrenze darstellt, werden Kugeln mit unterschiedlicher Dichte lotrecht auf eine Suspension aufgebracht (Bild 39). Die Suspension zeigt dabei zunächst eine stützende Wirkung auf die Kugeln. Das Einsinken ist schließlich abhängig von der Wichte und Oberfläche der Kugel sowie der Wichte und Fließgrenze der Suspension. Da jeder Kugel eine andere kritische Fließgrenze respektive Scherfestigkeit zugeordnet ist, liegt die gesuchte Scherfestigkeit der Suspension zwischen den Werten der kleinsten Kugel, welche gerade eintaucht, und der größten Kugel, welche gerade auf der Oberfläche liegen bleibt.

Die Dichten der Kugeln liegen in einem Bereich von $1,02 \text{ g/cm}^3$ bis $1,32 \text{ g/cm}^3$. Da z. B. RSS®-Flüssigboden eine Dichte von ca. $1,85 \text{ g/cm}^3$ aufweist, ist der Kugelharfen-Versuch hierfür nicht geeignet. Eine Nachrüstung des Gerätes zur Verwendung mit fließfähigen Verfüllbaustoffen scheitert an den gleichen Schwierigkeiten wie bei der Ertüchtigung des Pendelversuchs nach *Weiß*, da auch bei der Kugelharfe die Verhältnisse von Oberfläche zu Gewicht der Kugeln für eine Verwendung mit fließfähigen Verfüllbaustoffen ungeeignet ist. Eine ausreichende Dimensionierung des Gerätes ist theoretisch möglich, die Versuchsdurchführung wird aber unpraktikabel.

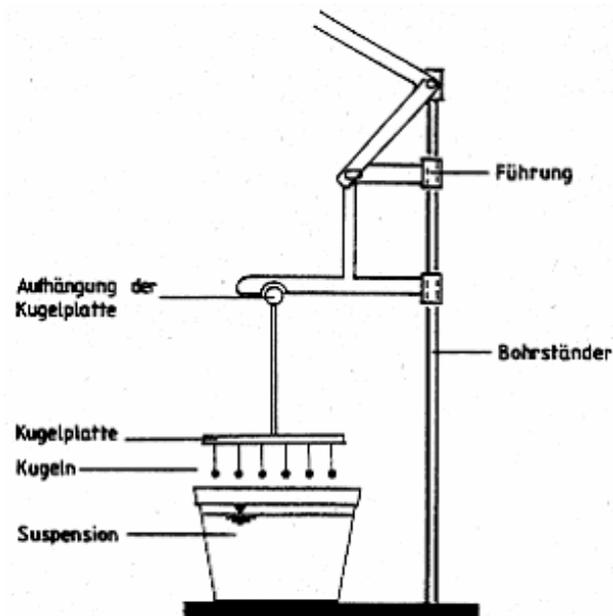


BILD 39: PRINZIP DER FLIEBGRENZENMESSUNG MIT DER KUGELHARFE NACH VON SOOS (DIN 4126)

4.2.2 Versuche zur Eignungsprüfung von Frischbeton und Mörtel

In den nachfolgenden Unterkapiteln sollen differenziert unterschiedliche Verfahren beschrieben werden, die zur Eignungsprüfung von Frischbeton und Mörtel hinzugezogen werden können.

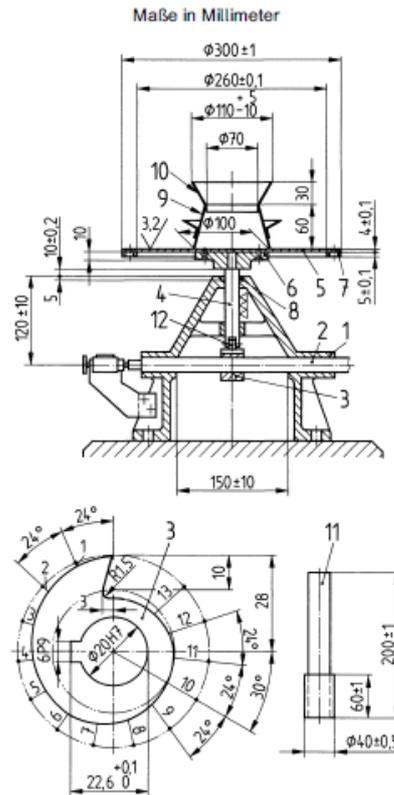
4.2.2.1 Versuche mit dem Hägermantisch

Für die nachstehend beschriebenen Versuche wird ein Hägermantisch nach *DIN EN 459-2 (2001)* verwendet, welcher in der Regel für die Eignungsprüfung von Mörteln genutzt wird. Mit seiner Hilfe wird das Ausbreitmaß einzelner Flüssigbodenproben ermittelt. Zielsetzung der Versuche ist der Nachweis der Anwendbarkeit des Gerätes bei unterschiedlichen Fließeigenschaften der Suspensionen. Gleichzeitig wird an diesen Versuchen bereits der Einfluss von Zusammensetzungsvariationen auf die Suspensionseigenschaften des RSS®-Flüssigbodens untersucht. Die einzelnen Proben wurden über einen Zeitraum von jeweils zwei Stunden getestet, um ebenfalls Aussagen über eine zeitliche Entwicklung des RSS®-Flüssigbodens treffen zu können.

Die Versuche werden zunächst unter Verwendung eines Rezepts der Firma ENREBA Neuss GmbH für RSS®-Flüssigboden durchgeführt. Anschließend wird dieses Originalrezept unter Variation der einzelnen Zusätze und des Wassergehalts verändert.

Die Hägermantisch-Versuche (Versuchsaufbau in Bild 40) nach *DIN EN 459-2 (2001)* werden für die Untersuchung von RSS®-Flüssigboden hinsichtlich der Vermessung des auseinanderfließenden Materials gegenüber der normgemäßen Vorgehensweise in leicht abgewandelter Form durchgeführt.

Nach der Befüllung des Setztrichters wird dieser langsam senkrecht gezogen. Direkt nach dem Ziehen wird das Ausbreitmaß anstelle von zwei über drei Achsen bestimmt, da es je nach Mischung zu ungleichmäßigen Ausbreitungen auf dem Tisch kommen kann. Durch die Bestimmung des Ausbreitmaßes unmittelbar nach dem Abziehen (Bild 41) konnte eine Aussage über die Fließfähigkeit auf Grundlage des reinen Schwerkrafteinflusses, noch ohne zusätzliche Krafteinwirkung, gemacht werden. Im Anschluss werden die nach *DIN EN 459-2 (2001)* geforderten 15 Hubstöße ausgeführt und erneut das Ausbreitmaß über drei Achsen bestimmt (Bild 42).



Legende

- | | |
|---------------|---------------------|
| 1 Gestell | 7 Kreisring |
| 2 Welle | 8 Gegennabe |
| 3 Hubkurve | 9 Setztrichter |
| 4 Hubachse | 10 Aufsatz |
| 5 Tischplatte | 11 Stampfer |
| 6 Auflager | 12 Fuß der Hubachse |

Toleranzen nach ISO 2768-m

BILD 40: AUSBREITISCH, HUBKURVE UND STAMPFER (DIN EN 459-2)



BILD 41: FLÜSSIGBODENPROBE NACH ABZIEHEN DES SETZTRICHTERS



BILD 42: FLÜSSIGBODENPROBE NACH AUFBRINGEN DER 15 HUBSTÖBE

Das Ausbreitmaß infolge der jeweiligen Versuchsdurchführung kann innerhalb des aufbaubedingten Grenzbereiches von 10 cm (entsprechend dem Durchmesser des Setztrichters) bis 30 cm (entsprechend dem Durchmesser der Tischplatte) bestimmt werden.

Ein Ausbreitmaß von exakt 10 cm bedeutet, dass die Probe nach Ziehen des Setztrichters keine weitere Ausbreitung zeigt, während ein Ausbreitmaß von nahezu 30 cm ein Hinweis darauf ist, dass sich die Probe gerade noch in oder gegebenenfalls schon über die Grenzen des Hägermantisches bzw. der Tischplatte hinaus ausbreitet. Nach den Hubstößen stellen sich erwartungsgemäß höhere Ausbreitmaße ein als unmittelbar nach dem Abziehen des Setztrichters.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Variation des Wassergehalts in Abhängigkeit des Probenalters dargestellt (Bild 43 und Bild 44). Die Ergebnisse zeigen, dass sich Abweichungen im Wassergehalt unmittelbar auf das Ausbreitmaß auswirken. Bei 80% Wassergehalt im Bezug zum Originalrezept (= 100% Wassergehalt) konnte bereits zu Beginn der Versuche, unabhängig vom Probenalter, kaum fließfähiges Verhalten festgestellt werden. Dies zeigt sich bereits bei der Befüllung des Setztrichters, bei welcher eine zusätzliche Verdichtung des Materials nötig war, um eine gleichmäßige Verteilung innerhalb des Trichters zu gewährleisten.

Bei einem Wassergehalt von 120% zeigt sich hingegen eine starke Ausbreitung bei geringem Probenalter. Diese ging nach Aufbringen der Hubstöße in den ersten 20 Minuten nach dem Anmischen sogar über die messbaren Grenzen des Hägermantisches hinaus. Zudem zeigte sich bei einem erhöhten Wassergehalt eine starke Tendenz zum Bluten, d. h. an der Probenoberfläche bildet sich verhältnismäßig schnell ein Wasserfilm bzw. Überstandswasser (Bild 45).

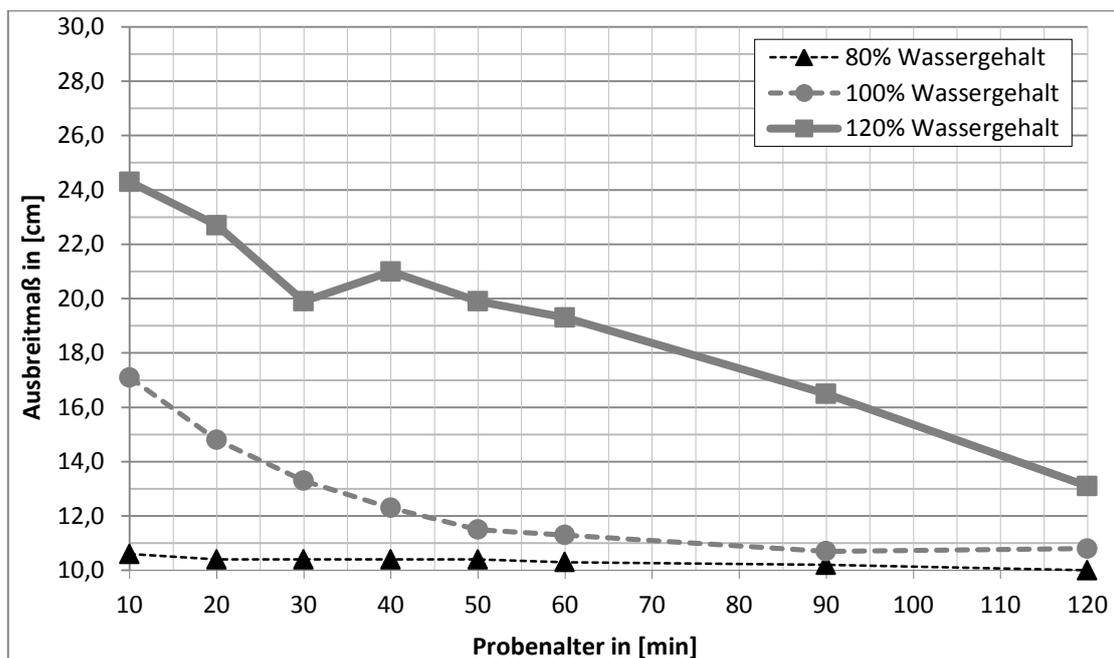


BILD 43: VARIATION DES WASSERGEHALTS (AUSBREITMAßE NACH ABZIEHEN DES SETZTRICHTERS) BEI 100% ZEMENTGEHALT UND 100% COMPOUNDGEHALT

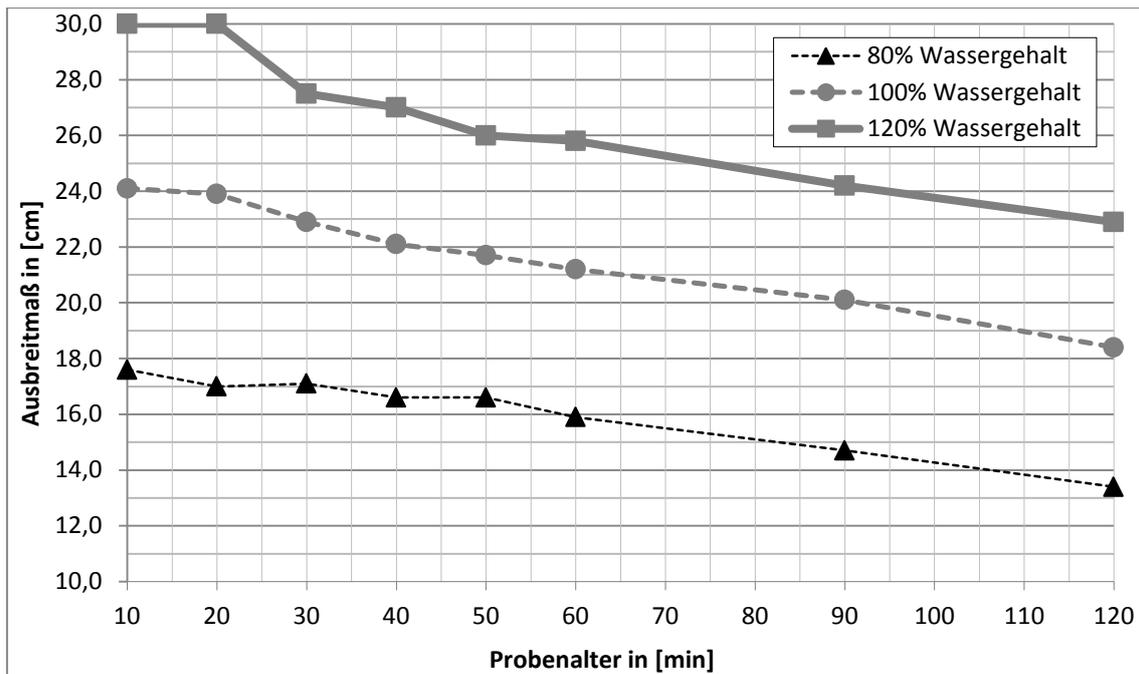


BILD 44: VARIATION DES WASSERGEHALTS (AUSBREITMAß NACH AUFBRINGEN DER 15 HUBSTÖßE) BEI 100% ZEMENTGEHALT UND 100% COMPOUNDGEHALT



BILD 45: WASSERFILM AUF EINER FLÜSSIGBODENPROBE

Um die Einflüsse der einzelnen RSS[®]-Flüssigboden-Komponenten zu erfassen, wurden verschiedene Variationen in Bezug auf den Zement- und Compoundgehalt getestet. Nachfolgend werden bei den weiteren Auswertungen die Versuche dargestellt, bei welchen vollständig auf die Zugabe eines Zusatzstoffes verzichtet und bezüglich der weiteren Komponenten nicht vom Originalrezept der Firma EN-REBA Neuss GmbH abgewichen wurde. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse ist Bild 46 und Bild 47 zu entnehmen.

Zunächst wurde eine Probe mit ausschließlicher Zugabe von Compound, also ohne Zusatz von Zement, hergestellt. Auf der Glasplatte des Hägermantisches zeigt dieses Material eine sehr gleichmäßige radiale Ausbreitung. Bei den Messungen kann beobachtet werden, dass sich große Zuschlagkörner vorwiegend in der Nähe des Zentrums ablagerten. Nach 24 Stunden war der RSS[®]-Flüssigboden immer noch fließfähig, wobei sich jedoch die Kornverteilung der Zuschläge auf dem Hägermantisch wesentlich gleichmäßiger darstellt.

Für weitere Versuche wurde Flüssigbodenmaterial unter ausschließlicher Zugabe von Zement, also ohne Zusatz von Compound, hergestellt. Auch hier lagerten sich große Kiese in der Nähe des Zentrums ab. Die Suspension verhält sich im Gegensatz zu jener mit alleiniger Compoundzugabe deutlich instabiler. Nach kürzester Zeit bildete sich ein Wasserfilm auf der Oberfläche, während Sande und Kiese sedimentieren. Bis ca. 60 Minuten nach dem Anmischen zeigt sich eine ungleichmäßige Verteilung auf dem Hägermantisch. Ab 90 Minuten stellte sich bevorzugt eine radiale Ausbreitung der Probe ein. Die Suspension ist ab diesem Zeitraum und darüber hinaus deutlich stabiler. Nach 24 Stunden zeigt sich eine vollständige Verfestigung des Materials, die in dieser Form nicht mehr auf dem Hägermantisch zu überprüfen ist.

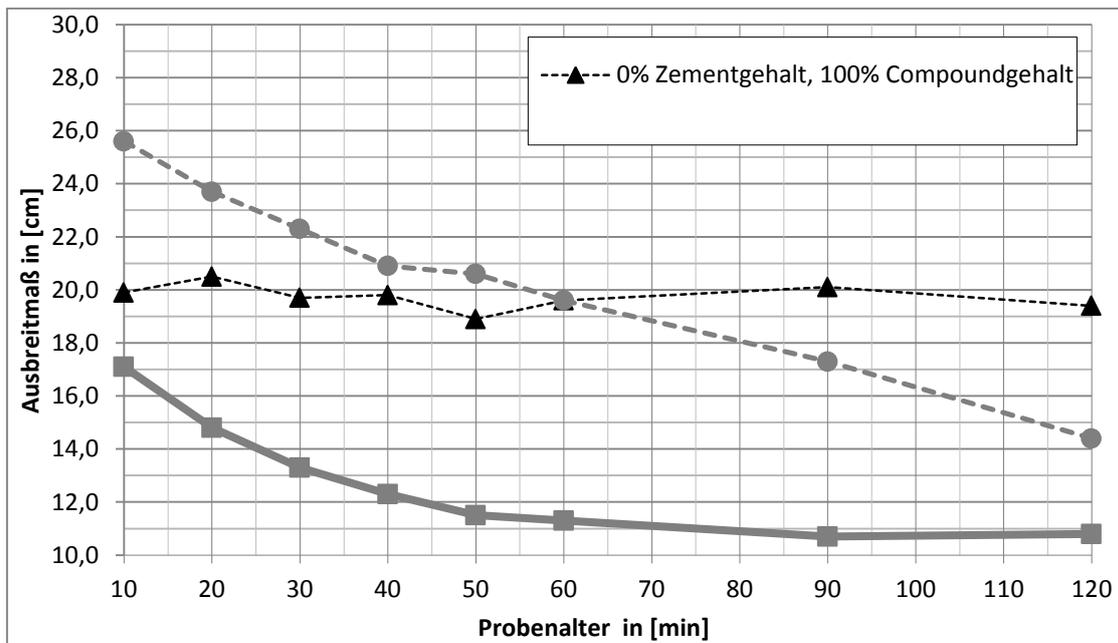


BILD 46: VARIATION DER BINDEMITELEZUSAMMENSETZUNG (AUSBREITMAß NACH ABZIEHEN DES SETZTRICHTERS) BEI 100% WASSERGEHALT

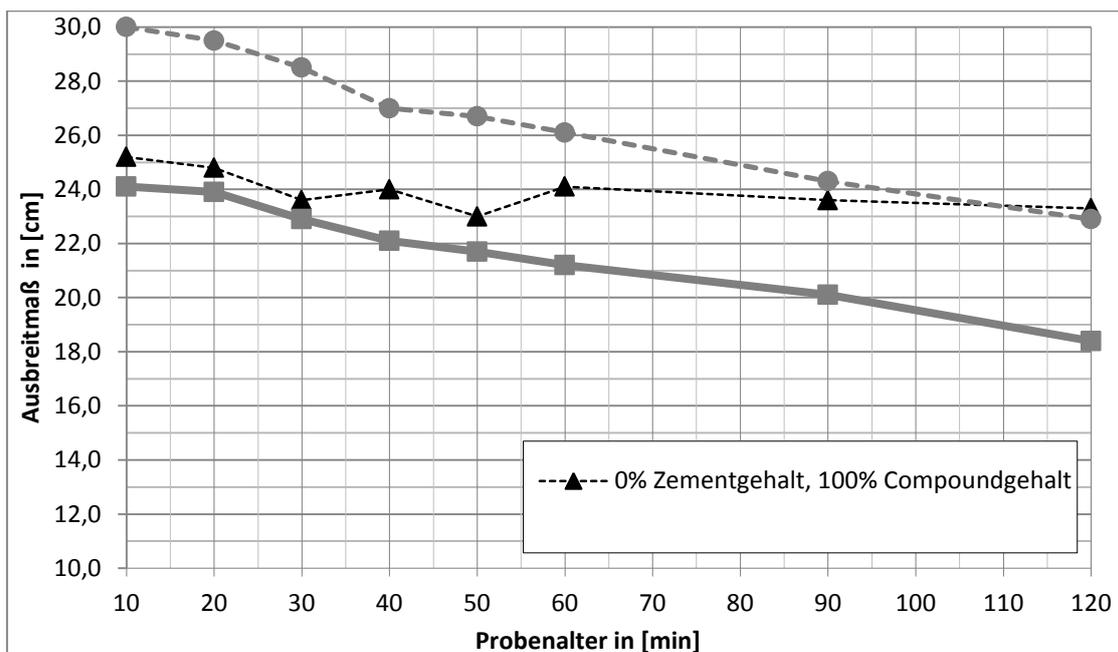


BILD 47: VARIATION DER BINDEMITELEZUSAMMENSETZUNG (AUSBREITMAß NACH AUFBRINGEN DER 15 HUBSTÖßE) BEI 100% WASSERGEHALT

Zusammenfassend lässt sich anhand der oben beschriebenen Versuchsdurchführungen sowie deren Ergebnisse feststellen, dass der Compoundanteil zu einer verstärkten Bindung des Wassers führt, wodurch die Suspensionsstabilität wesentlich verbessert wird. Diese Wirkung des Compounds tritt unmittelbar nach dem Anmischen ein und hält konstant über die Verarbeitungszeit an. Der Zement hingegen entfaltet seine Wirkung weitestgehend linear. Bei der frischen Flüssigbodenprobe scheint er gar keinen oder gegebenenfalls nur minimalen Einfluss auf die Stabilität des Flüssigbodens zu haben. Mit steigendem Probenalter nimmt das Ausbreitmaß dann linear ab.

Die Kombination der beiden dargestellten Bindemittel zeigt gemäß diesen Ausführungen ein Wechselspiel der beiden Materialkomponenten. Der Compound bewirkt in den ersten Minuten aufgrund seiner Quellfähigkeit eine verstärkte Bindung des Anmachwassers, was zwar zu einer geringeren Reibung innerhalb des Zuschlagbodens (Herabsetzen der Scherfestigkeit), aber auch zu einer Erhöhung der Suspensionsstabilität führt. Diese Stabilitätserhöhung zeigt sich auf dem Hägermantisch in Form eines herabgesetzten Ausbreitmaßes. Der Zement hingegen bewirkt durch Hydratation eine allmähliche Abminderung des Ausbreitmaßes und somit insgesamt ein Ansteifen des Flüssigbodens.

Der Hägermantisch stellt einen Indexversuch dar, der eine qualitative Aussage über das Fließverhalten von Verfüllbaustoffen zulässt, wodurch die Einbaufähigkeit des Materials beurteilt werden kann. Eine Bestimmung der Fließgrenze als maßgebenden Parameter im Sinne des Arbeitsblattes DWA-A 139 („Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen“, 2009) ist hiermit noch nicht möglich.

4.2.2.2 Versuche mit dem Ausbreittisch

Der Ausbreittisch gemäß *DIN EN 12350-5 (2009)* wird zur Bestimmung des Konsistenzmaßes von Frischbeton verwendet. Für die Versuche mit Flüssigboden wurde ein Konus mit den in Bild 48 dargestellten Maßen mittig auf den Ausbreittisch (Bild 49) gestellt und mit einem Gurt fixiert. Im Anschluss wurde der Flüssigboden eingefüllt (Bild 50). Nach der Entfernung des Gurtes wurde der Konus senkrecht nach oben von der Probe abgezogen. Daraufhin wurde die Tischplatte 15 Mal bis zu einem oberen Anschlag angehoben, fallen gelassen und das Ausbreitmaß über zwei Achsen bestimmt.

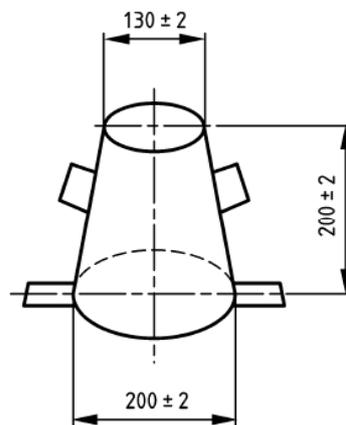
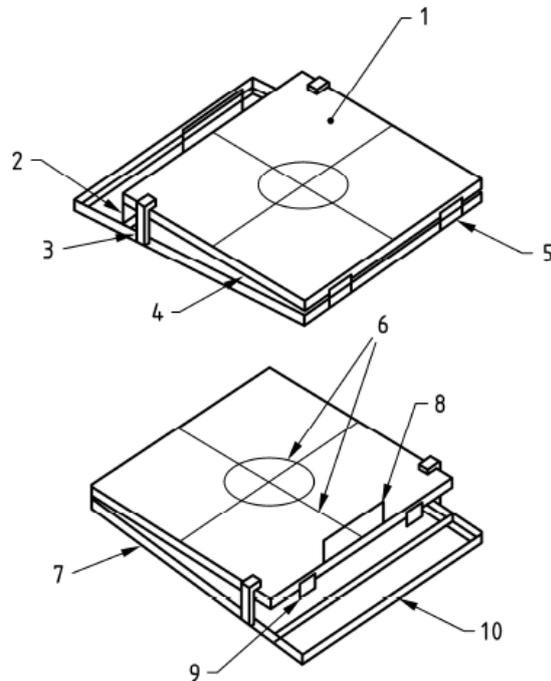


BILD 48: MAßE DES KONUS FÜR DEN AUSBREITTISCH (*DIN EN 12350, 2009*)

**Legende**

- | | |
|---|------------------|
| 1 Metallplatte | 6 Markierung |
| 2 Hubhöhe, begrenzt auf (40 ± 1) mm | 7 Rahmen |
| 3 Oberer Stopper | 8 Handgriff |
| 4 Aufschlagplatte | 9 Untere Stopper |
| 5 Schamiere (außen) | 10 Fußraste |

BILD 49: AUFBAU EINES ÜBLICHEN AUSBREITTISCHES (DIN EN 12350, 2009)

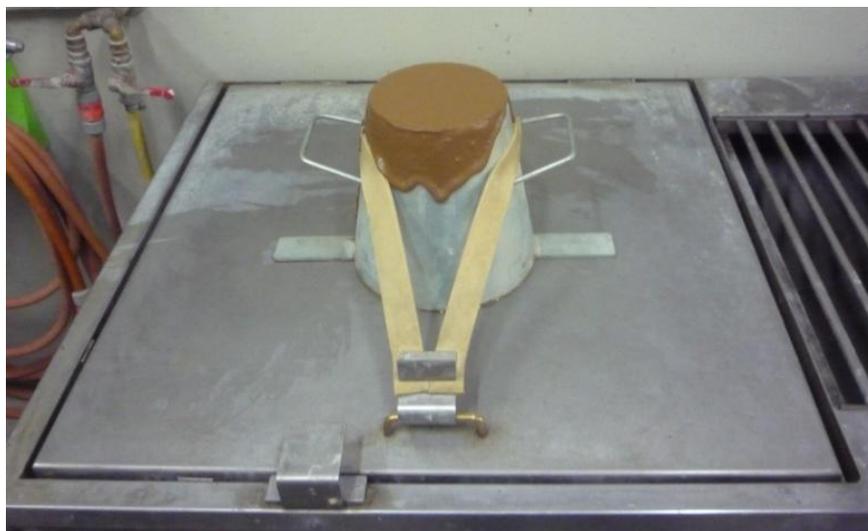


BILD 50: MIT FLÜSSIGBODEN GEFÜLLTER KONUS AUF DEM AUSBREITTISCH

Für die Versuche am Ausbreittisch wurde RSS[®]-Flüssigboden gemäß Originalrezept der Firma ENREBA Neuss GmbH verwendet. Bereits nach Bestimmung der ersten Ausbreitmaße wird deutlich, dass die Tischmaße von 70 x 70 cm für RSS[®]-Flüssigboden unzureichend dimensioniert sind. In Bild 51 und Bild 52 sind zwei Ausbreitmaße 30 Minuten nach dem Anmischen dargestellt. Dabei zeigt Bild 51 das Maß unmittelbar nach Abziehen des Konus. Eine diagonale Messung der Ausbreitung des RSS[®]-Flüssigbodens weist einen Wert von 62,5 cm auf. In Bild 52 ist das diagonale Maß nach dem Aufbringen von 15 Schlägen zu sehen (74 cm). Auch 60 Minuten nach dem Anmischen ergaben sich noch

diagonale Messwerte im Bereich von 58,5 cm nach Abziehen des Konus und 72 cm nach Aufbringen der 15 Schläge.



BILD 51: AUSBREITMAß UNMITTELBAR NACH ABZIEHEN DES KONUS (30 MINUTEN NACH DEM ANMISCHEN)



BILD 52: AUSBREITMAß NACH 15 SCHLÄGEN (30 MINUTEN NACH DEM ANMISCHEN)

In der Regel wird der Ausbreitversuch zur Konsistenzbestimmung von Frischbeton verwendet. Dabei sind die in Tabelle 1 aufgeführten Grenzen relevant.

TABELLE 1: KONSISTENZKLASSEN VON FRISCHBETON (DIN 1045, 2008)

Klasse	Ausbreitmaß (Durchmesser) in mm	Konsistenzbeschreibungen
F1	≤ 340	steif
F2	350 bis 410	plastisch
F3	420 bis 480	weich
F4	490 bis 550	sehr weich
F5	560 bis 620	fließfähig
F6	≥ 630	sehr fließfähig

DIN 1045-2 merkt zu Tabelle 1 an, dass bei Ausbreitmaßen über 700 mm auf die Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ (Ausgabe 2003) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zurückgegriffen werden sollte. Da bei den Versuchen mit RSS®-Flüssigbuden auch 60 min nach dem Anmischen Ausbreitmaße von über 70 cm erreicht wurden, sollten Testverfahren für selbstverdichtenden Beton (SVB) in Betracht gezogen werden. Diese werden in der DAfStb-Richtlinie sowie in Teilen der DIN EN 12350 (Ausgabe 2010) beschrieben. Im folgenden Kapitel werden die entsprechenden Verfahren nach DIN EN 12350 im Überblick dargestellt und anschließend bewertet.

4.2.3 Versuche zur Eignungsprüfung von selbstverdichtenden Betonen

Die nachstehenden Unterkapitel beschreiben unterschiedliche Verfahren, die zur Eignungsprüfung von selbstverdichtenden Betonen hinzugezogen werden. Als Grundlage dient hierbei *die DIN EN 12350 (2010)*.

4.2.3.1 Setzfließversuch

Der Setzfließversuch gemäß *DIN EN 12350-8 (2010)* eignet sich für die Bestimmung der relativen Viskosität und Füllfähigkeit von Frischbeton. Dazu wird ein Kegelstumpf (oberer Durchmesser 100 mm, unterer Durchmesser 200 mm, Höhe 300 mm) mit selbstverdichtendem Frischbeton gefüllt, der Konus senkrecht nach oben abgezogen und die Zeit gemessen, bis der Beton auf der in Bild 53 dargestellten Bodenplatte ein Ausbreitmaß mit einem Durchmesser von 500 mm erreicht (t_{500}).

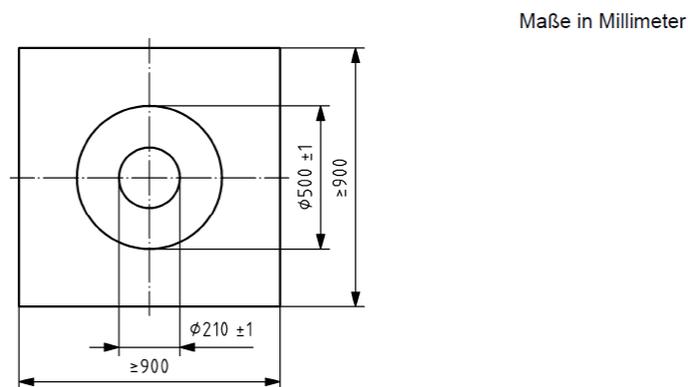
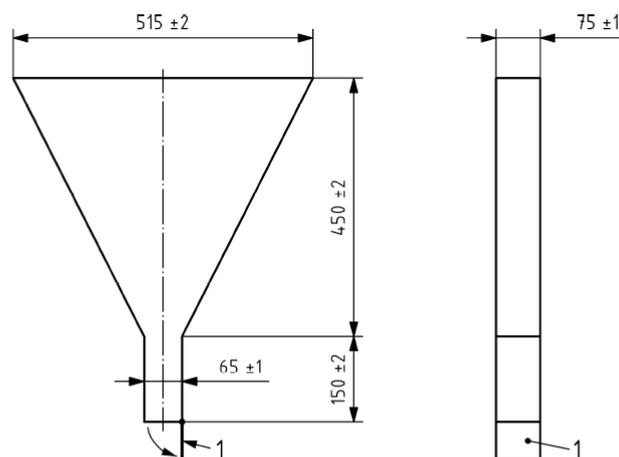


BILD 53: BODENPLATTE (*DIN EN 12350, 2010*)

4.2.3.2 Auslauftrichter-Versuch

Der Auslauftrichterversuch gemäß *DIN EN 12350-9 (2010)* dient ebenfalls der Bestimmung von Viskosität und Füllfähigkeit von Frischbetonen. Dazu wird ein in Bild 54 dargestellter Trichter mit Frischbeton gefüllt und die Zeit gemessen, bis der Beton vollständig aus dem Trichter ausgelaufen ist.



Legende

- 1 Klappe oder Schieber

BILD 54: AUSLAUFTRICHTER (*DIN EN 12350, 2010*)

4.2.3.3 L-Kasten-Versuch

Mit Hilfe des L-Kasten-Versuchs gemäß *DIN EN 12350-10 (2010)* kann eine Aussage über das Fließvermögen von selbstverdichtendem Frischbeton getroffen werden. Dazu wird der Frischbeton in den L-Kasten eingefüllt, welcher wahlweise mit drei oder zwei Stäben ausgerüstet ist (Bild 56). Nach dem Ziehen des Schiebeverschlusses fließt der Beton durch die Stäbe hindurch in den anderen Schenkel des L-Kastens (Bild 55). Das Umfließen der Stäbe stellt dabei u. a. die Einbausituation des Betons mit Bewehrungsstahl dar. Kommt die Fließbewegung zum Erliegen, wird das Verhältnis der Höhen H_2 zu H_1 gebildet. Je größer das Verhältnis, desto stärker ist das Fließvermögen des Betons und desto unwahrscheinlicher sind Probleme beim Einbau, bspw. in Form von Verstopfen oder Entmischen.

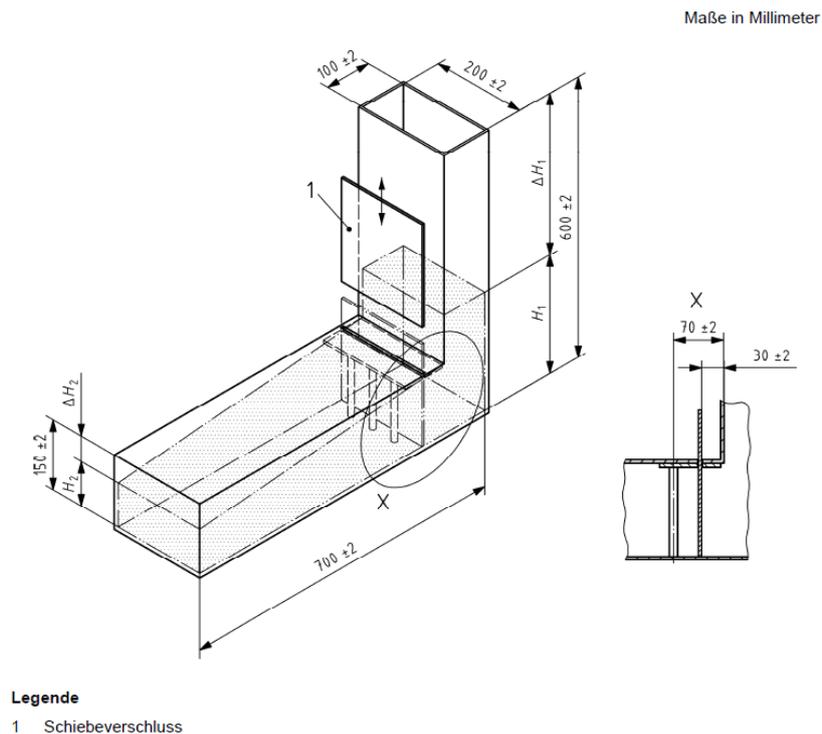


BILD 55: TYPISCHER ALLGEMEINER AUFBAU DES L-KASTENS MIT DEN ERFORDERLICHEN MÄßEN (*DIN EN 12350, 2010*)

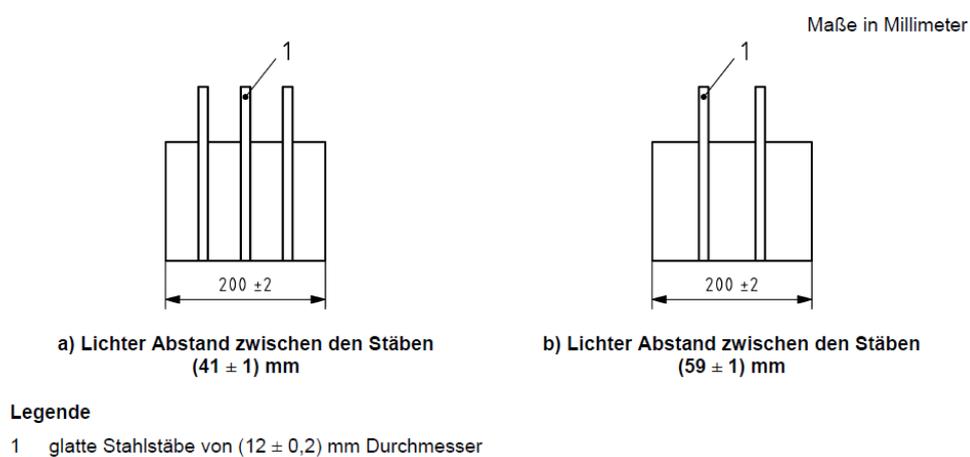
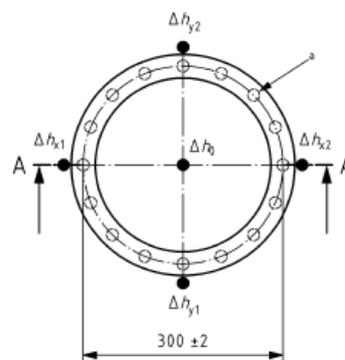


BILD 56: LAGE DER STÄBE IM L-KASTEN (*DIN EN 12350, 2010*)

4.2.3.4 Blockierring-Versuch

Der Blockierring-Versuch gemäß DIN 12350-12:2010-12 wird zur Bestimmung des Fließvermögens von selbstverdichtendem Frischbeton eingesetzt. Dazu wird ein Kegelstumpf in die Mitte des Blockierrings gesetzt, mit Beton gefüllt und im Anschluss senkrecht gezogen. Der Frischbeton fließt durch die wahlweise schmal oder breit angeordneten Spalten des Blockierrings (Bild 57 bis Bild 59). Im ersten Schritt wird die Fließzeit notiert, welche der Beton benötigt, um ein Ausbreitmaß mit einem Durchmesser von 500 mm zu erreichen. Dadurch lässt sich analog zum Setzfließversuch die Viskosität des Frischbetons bestimmen. Im zweiten Schritt werden nach Beendigung der Fließbewegung die Höhen des Frischbetons an vier Punkten aufgemessen. Daraus lässt sich die sogenannte Blockierneigung bestimmen, also der Widerstand des Frischbetons, engmaschige Bewehrung zu umfließen. Je geringer dieser Wert ist, desto besser ist das Fließvermögen des Betons. Im dritten und letzten Schritt kann das endgültige Ausbreitmaß des Betons über zwei Achsen bestimmt werden, wodurch eine Aussage über die jeweilige Konsistenz getroffen werden kann.

Maße in Millimeter

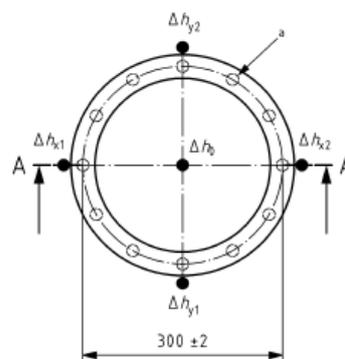


Legende

- ^a 16 in gleichen Abständen ($\pm 0,5$ mm) angeordnete glatte Stahlstäbe
- Δh Differenz der Höhe zwischen Oberkante Blockring und festgelegten Punkten des Betons

BILD 57: BLOCKIERRING MIT ENGEM SPALT (DIN EN 12350, 2010)

Maße in Millimeter

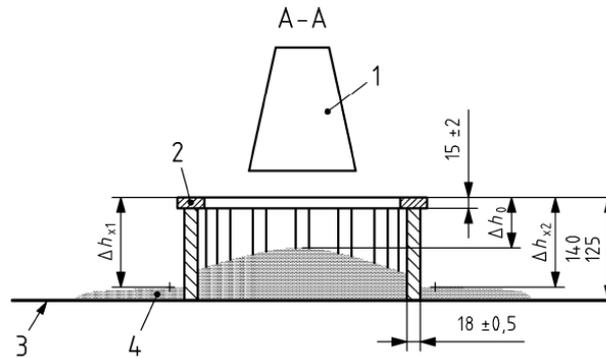


Legende

- ^a 12 in gleichen Abständen ($\pm 0,5$ mm) angeordnete glatte Stahlstäbe
- Δh Differenz der Höhe zwischen Oberkante Blockring und festgelegten Punkten des Betons

BILD 58: BLOCKIERRING MIT BREITEM SPALT (DIN EN 12350, 2010)

Maße in Millimeter

**Legende**

- 1 Setzkegel
- 2 Blockierring
- 3 Bodenplatte
- 4 Beton
- Δh Differenz der Höhe zwischen Oberkante Blockring und festgelegten Punkten des Betons

BILD 59: SCHNITT A-A QUER DURCH DEN BLOCKIERRING (DIN EN 12350, 2010)

4.2.4 Bewertung der Versuche zur Eignungsprüfung von Betonen

Die Versuche zur Eignungsprüfung selbstverdichtender Betone lassen meist nur sehr grobe Einschätzungen zu. So werden z. B. die Ergebnisse des Setzfließmaßes drei verschiedenen Setzfließmaßklassen zugeordnet. Beim Auslaufrichterversuch ist nur die Einteilung in zwei verschiedene Viskositätsklassen möglich. Des Weiteren sind der L-Kasten- oder der Blockierring-Versuch für die Verwendung von Flüssigboden weitgehend irrelevant, da dieser meist zur Verfüllung von Kanalgräben und somit nicht in Verbindung mit Bewehrung eingesetzt wird.

Die betrachteten Versuche zur Eignungsprüfung von Mörtel (Hägermantisch), Beton (Ausbreittisch) und selbstverdichtendem Beton sind prinzipiell nur für qualitative Einschätzungen geeignet. Um exakte Aussagen, z. B. über die Scherfestigkeit von Flüssigboden zu treffen, eignen sich diese Versuche jedoch nicht.

Aus diesem Grund erweist es sich als notwendig, ein Verfahren zu konzipieren, welches eine bauseitige Bestimmung der Scherfestigkeit von Flüssigböden ermöglicht. Die Dr. Pecher AG (Erkrath) entwickelte daher das in den nachfolgenden Kapiteln beschriebene und erprobte baustellentaugliche Pendelgerät, mit welchem die Möglichkeit besteht, die Scherfestigkeit von fließfähigen Verfüllbaustoffen zu messen.

5 Entwicklung eines Baustellengerätes

5.1 Erprobung des Vertikalpendelgerätes

5.1.1 Baustellentaugliches Pendelgerät

Das im Nachfolgenden dargestellte und erläuterte Pendelgerät wurde durch Modifikationen bekannter Messmethoden unter der Zielsetzung entwickelt, mit Hilfe eines baustellentauglichen Verfahrens die Scherfestigkeit von fließfähigen Verfüllbaustoffen bestimmen zu können.

Das Vertikalpendelgerät (Bild 60 und Bild 61) besteht vorrangig aus einem Tauchkörper (Flügel oder Kugel), welcher über einen Kunststofffaden und zwei Umlenkrollen mit einem Gewichtskörper verbunden ist. Als Gewichtskörper wird ein geschlossener, wassergefüllter Zylinder verwendet, der sich als Kolben in einem äußeren, offenen Zylinder bewegen kann. Der äußere Zylinder wird ebenfalls mit Wasser gefüllt, wodurch der Kolben bei steigendem Wasserspiegel schließlich auftreibt, da seine Wichte geringfügig kleiner ist als die des umgebenden Wassers.

Der Tauchkörper am anderen Ende des Fadens wird in einem mit Suspension gefüllten Probenbehälter abgesenkt. Der Behälter mit der Suspensionsprobe wird auf einer Waage positioniert.

Bild 60 zeigt das genannte Pendelgerät während eines Versuchsdurchlaufes, bei dem der Flügel in den Flüssigboden eingetaucht wird. In Bild 61 ist die Ausgangssituation als Konstruktionszeichnung dargestellt, der die genauen Maße des Versuchsaufbaus entnommen werden können.



BILD 60: DAS VERTIKALPENDELGERÄT

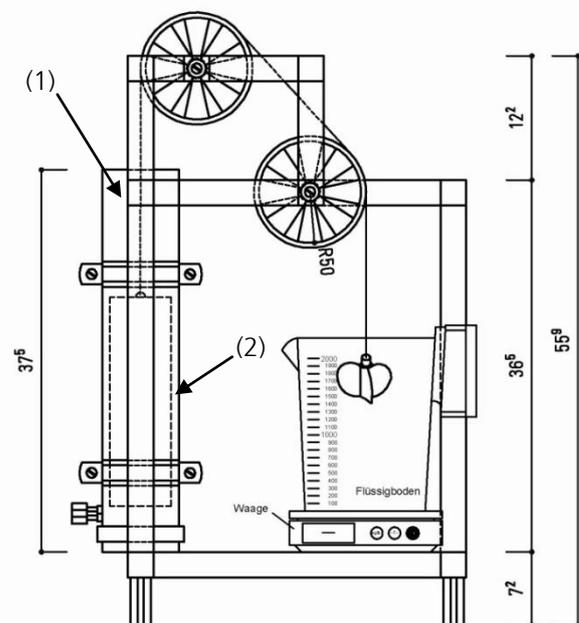


BILD 61: DIE AUSGANGSSITUATION DES PENDELGERÄTS –
(1) = ÄUßERER ZYLINDER, (2) = INNERER ZYLINDER

Wird der äußere, vor Versuchsbeginn leere, Zylinder (Bild 61) mit Wasser gefüllt, schwimmt der Kolben auf (Bild 62). Durch das Aufschwimmen des Kolbens sinkt der Flügel in Richtung Waage ab (Bild 62). Ist der äußere Zylinder vollständig mit Wasser gefüllt, befindet sich der Flügel ca. 2 cm über der Waage. Im Anschluss kann ein 2-Liter-Behälter mit einer Suspensionsprobe befüllt werden. Die Probe wird vor Versuchsbeginn etwa 30 Sekunden mit einem Rühraufsatz durchmischt und der Behälter anschlie-

Bend auf die Waage gestellt (Bild 63). Das Pendel wird nun in den Flüssigboden getaucht, wobei darauf zu achten ist, dass Waage, Messbecher und Pendel zentrisch zueinander angeordnet sind. Mit einer Schlaggabel (Bild 64) wird das Pendel durch Schläge gegen den Messbecher vollständig in den Flüssigboden eingerüttelt, bis der Pendelfaden eine leichte Spannung aufweist. Daraufhin wird die Waage tariert.

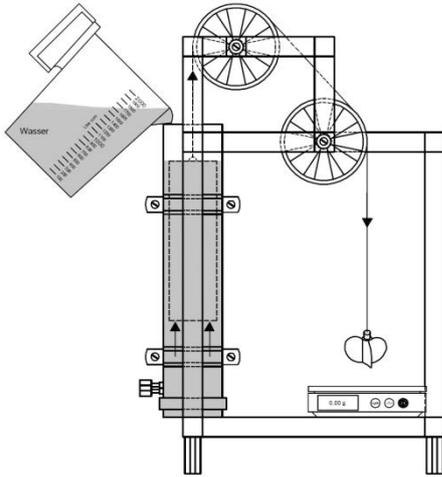


BILD 62: BEFÜLLEN DES ÄUßEREN ZYLINDERS MIT WASSER
- AUFTRIEB DES GEWICHTS

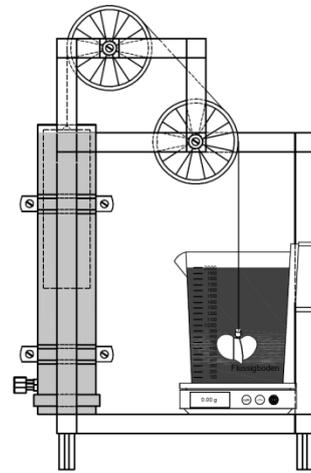


BILD 63: ZUSTAND NACH VOLLSTÄNDIGER BEFÜLLUNG DES
ÄUßEREN ZYLINDERS



BILD 64: SCHLAGGABEL

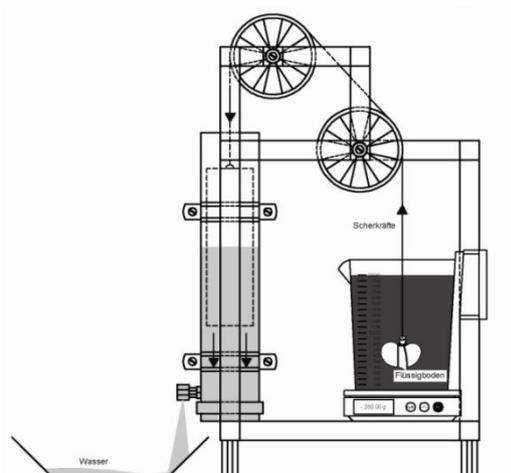


BILD 65: WASSER WIRD ABGELASSEN - ERREICHEN DER
MAXIMALEN SCHERFESTIGKEIT

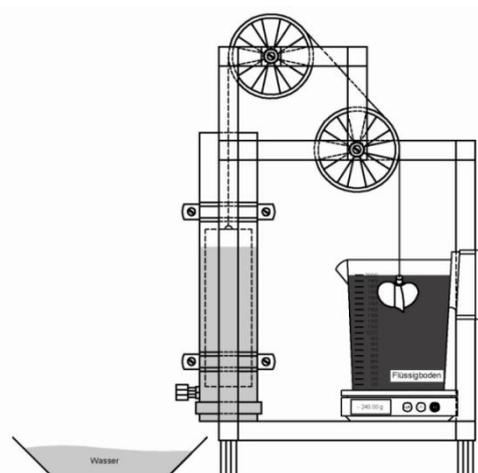


BILD 66: MESSUNGSENDE - FLÜGEL KNAPP UNTERHALB
DER OBERFLÄCHE

Im Anschluss an das Trieren der Waage, wenn sich das System im Gleichgewicht befindet, wird der Auslasshahn, der sich im unteren Bereich des Außenzylinders befindet, geöffnet (Bild 65). Durch das Ausströmen des Wassers verringert sich mit fallendem Wasserstand die Auftriebskraft auf den Kolben, der hierdurch eine zunehmende Gewichtskraft auf den Faden ausübt. Diese Kraft wirkt als Zugkraft auf den Tauchkörper in der Suspension. Die Größe der Zugkraft entspricht der von der Waage angezeigten Massendifferenz gegenüber dem Ausgangszustand vor dem Versuch. Das Ende der Messung ist erreicht, sobald das Flügelpendel die Oberfläche der Suspension erreicht hat bzw. der Maximalwert der gemessenen Massendifferenz überschritten ist.

Die Aufzeichnungen eines angeschlossenen Datenschreibers (Bild 67) zeigen die aus der Massenkraftänderung ermittelte Scherfestigkeitsentwicklung des Flüssigbodens im Laufe einer Messung.

Die Ursache des in Bild 67 dargestellten charakteristischen Kurvenverlaufes ist in der Funktionsweise des kraftgesteuerten Vertikal-Pendels begründet.

Wird das Wasser aus dem äußeren Zylinder abgelassen, wirkt eine zunehmende Zugkraft auf das eingetauchte Pendel, das durch die Suspension zunächst an einem Aufsteigen gehindert wird. Diese Scherkraft-Mobilisierung zeigt sich durch eine negative Grammzahl auf der Waagenanzeige. Je weiter der Wasserspiegel im äußeren Zylinder sinkt, desto größer wird die Kraft, die der Flüssigboden aufnehmen muss. Wird dann ein erster Grenzwert der Scherfestigkeit erreicht, bei dem Relativbewegungen zwischen Suspension und Pendel einsetzen, sinkt in gleichem Maße der Kolben im wassergefüllten Zylinder ab. Durch den Sinkvorgang wirken wieder verstärkt Auftriebskräfte auf den Kolben, wodurch die Zugkraft am Faden abnimmt. Dadurch hat der Flüssigboden die Möglichkeit, erneut seine Scherfestigkeit bis zu einem nächsten Maximalwert zu mobilisieren. Werden die vom Datenschreiber aufgenommenen Maximalwerte miteinander verbunden, ergibt sich eine Hüllkurve, die eine Steigerung der Scherfestigkeit bis zum endgültigen ‚Bruch‘, dem absoluten Maximalwert, darstellt (Bild 67).

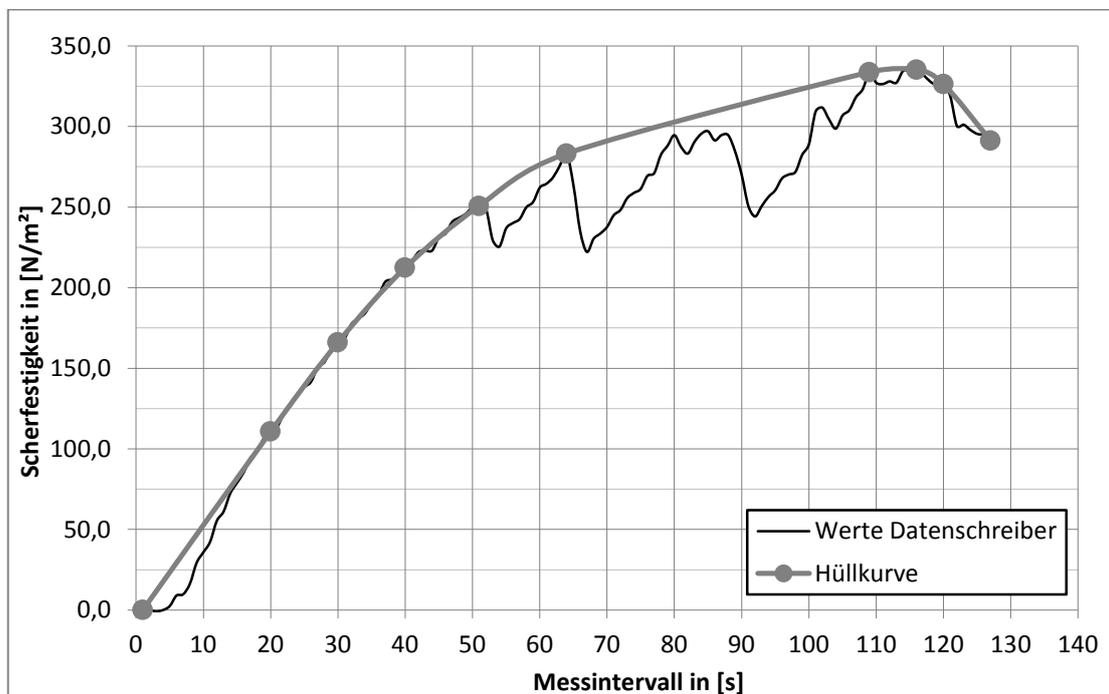


BILD 67: AUFEICHNUNGEN DES DATENSCHREIBERS MIT DARAU RESULTIERENDER HÜLLKURVE

Somit haben erste Bewegungen, die noch nicht die Scherfestigkeit der Suspension überschreiten, durch ein Wiedereintauchen des Kolbens im wassergefüllten Zylinder eine unmittelbare Abnahme der

Zugkräfte am Faden zur Folge. Die tatsächliche Scherfestigkeit ist aus der in Bild 67 dargestellten Hüllkurve abzulesen.

Unter der Annahme, dass sich eine Scherfläche in unmittelbarer Nähe der Flügeloberfläche ausbildet, kann der Maximalwert der Fließgrenze durch die maximale Grammanzeige auf der Waage bestimmt werden:

$$\tau_F = \frac{F}{A} \cdot 100 \quad \text{Gl. 5.1}$$

mit

τ_F : messbare Fließgrenze in [N/m²]
 $|F|$: Betrag der negativen Gewichtsanzeige auf der Waage in [g]
 A: Fläche des Flügelpendels in [cm²]

5.1.2 Vergleichende Untersuchungen mittels Flügelschergerät und Vertikal-Pendelgerät

Um die Eignung des Vertikalpendelgerätes als baustellentaugliches Messgerät zur Ermittlung der Fließgrenze von Verfüllbaustoffen zu untersuchen, wurden im Rahmen einer Diplomarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal (Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik – Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort) vergleichende Untersuchungen mit dem Vertikal-Pendelgerät und einem Flügelschergerät durchgeführt.

5.1.2.1 Versuche mit dem Flügelschergerät

Bei dem Flügelschergerät handelt es sich um eine Laborflügelsonde der Firma Wille-Geotechnik (Bild 68). Im Wesentlichen besteht das Flügelschergerät aus einem Sondenflügel, einem Drehgestänge, einer Antriebsvorrichtung und einer Messeinrichtung zur Erfassung des Drehmomentes.

Die Scherfestigkeit der Probe ergibt sich aus dem Widerstand, der beim Abscheren eines den Sondenflügel umhüllenden zylindrischen Scherkörpers ermittelt wird. Für die Messung des Drehmomentes ist das Prüfgerät mit einem elektrischen Kraftaufnehmer ausgestattet.



BILD 68: FLÜGELSCHERGERÄT FÜR LABORUNTERSUCHUNGEN

Im Gegensatz zum kraftgesteuerten Pendelversuch bringt das Flügelschergerät weggesteuert eine Verformung auf die Flüssigbodenprobe auf. Dazu wird die Probe im Flügelschergerät fixiert und im Anschluss mit einer maximalen Drehung von 60° bei einer Drehgeschwindigkeit von 30° pro Minute abgeschert. Während des Versuchs ermittelt das Flügelschergerät aus dem Drehmoment am Flügel die Scherspannung auf der Mantelfläche des Scherkörpers. Der Maximalwert dieser Spannung entspricht der maximalen Scherfestigkeit der Flüssigbodenprobe.

Für die Messungen wurden Proben nach dem Originalrezept für RSS[®]-Flüssigboden der Firma ENREBA Neuss GmbH sowie unterschiedliche Variationen dieses Rezeptes hergestellt. Da das Flügelschergerät nur Messungen bis zu einem Größtkorn von 8 mm zulässt, wurde der Zuschlagboden entsprechend aufbereitet. Die ermittelten Scherfestigkeiten des Pendelgeräts und des Flügelschergeräts wurden im Anschluss an die Parallelversuche über die Zeit, also über das Alter der Flüssigbodenprobe nach dem Anmischen, aufgetragen. Der Nullpunkt des Probenalters des RSS[®]-Flüssigbodens ist dabei dem Zeitpunkt gleichzusetzen, ab dem die Wasserzugabe erfolgt. Diesbezüglich wurden im Vorfeld alle festen Bestandteile (Zuschlagboden, Zement, Compound) gründlich vermischt und im Anschluss das Wasser zugegeben. Mit der Wasserzugabe begann die Zeitmessung.

5.1.2.2 Versuche mit dem Vertikalpendelgerät

Das zuvor bereits beschriebene Vertikal-Pendelgerät wird nachfolgend in zwei Varianten als Vertikal-Flügelpendel und als Vertikal-Kugelpendel eingesetzt. Bei dem Flügelpendelgerät wird als Tauchkörper, der in die Suspension abgesenkt wird ein Flügel mit einer gesamten Oberfläche von $83,59 \text{ cm}^2$ gemäß Bild 69 verwendet. Die Scherfestigkeit wird bei dieser Variante aus der gemessenen Zugkraft am Pendel dividiert durch die Flügeloberfläche ermittelt. Der Flügel eignet sich besonders für die Verwendung mit Suspensionen geringer Fließgrenzen.

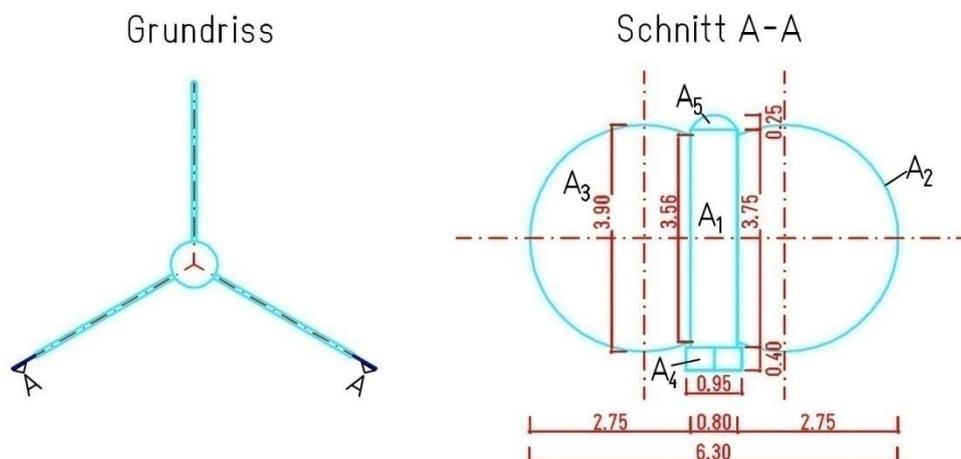


BILD 69: ABMESSUNGEN DES VERWENDETEN FLÜGELS

Für Suspensionen mit gröberen Zuschlägen und höheren Fließgrenzen ist eine Kugel als Tauchkörper besser geeignet.

Die Kugel besitzt im Gegensatz zum Flügel, welcher mehr durch den Boden hindurch „schneidet“, eine weitaus stärkere Verdrängungswirkung. Dadurch ergaben sich hinsichtlich der Messungen auf der Waage stets höhere Massendifferenzen bei der Kugel als beim Flügelpendel.

Der Ansatz, die Fließgrenze über die reine Kugeloberfläche zu bestimmen, erwies sich im Gegensatz zu den Versuchen mit dem Flügelpendel als unbrauchbar. Auch unter Verwendung des Ansatzes nach Weiß (vgl. Kapitel 4.2.1.1) ergeben sich vergleichsweise zu hohe Scherfestigkeitswerte (Bild 70).

Ansatz bezüglich einer reinen Kugeloberfläche:

$$\tau_f = \frac{F}{4 \cdot \pi^2} \quad \text{Gl. 5.2}$$

Ansatz nach Weiß:

$$\tau_f = \frac{4 \cdot F}{d^2 \cdot \pi^2} \quad \text{Gl. 5.3}$$

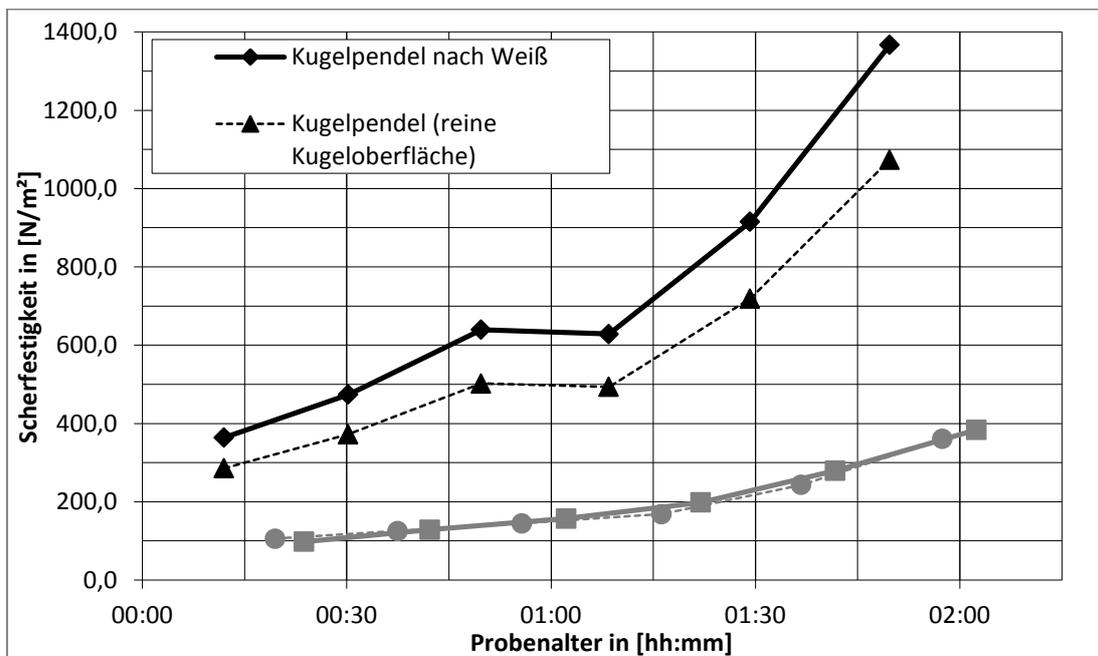


BILD 70: VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN ANSÄTZE ZUR BESTIMMUNG DER SCHERFESTIGKEIT

In Anlehnung an die in *Saak et al. (2001)* beschriebenen Ausführungen wurde für die Ermittlung der Fließgrenze der im Folgenden erläuterte Ansatz gewählt.

Bei der Umströmung der Kugel, wie sie beim Vertikal-Kugelpendel stattfindet, muss die flüssige Phase aus dem Bereich hohen Druckes in den Bereich niedrigeren Druckes fließen. Dieser notwendige Druckausgleich ermöglicht erst die Bewegung der Kugel in der flüssigen Phase, setzt aber gleichzeitig eine räumliche Umströmung der Kugel voraus. Als Näherungsansatz für diesen Fließbereich wird eine Hüllkugel mit dem Radius $R = r \cdot \sqrt{2}$ (r = Radius der Kernkugel) gewählt. Die Fläche des Kreisringes im Querschnitt durch Hüllkugel und Kernkugel entspricht dabei der Querschnittsfläche der Kernkugel (Bild 71). Schubspannungen, die den Volumenstrom behindern, wirken auf beiden, den Strömungskanal begrenzenden Kugeloberflächen.

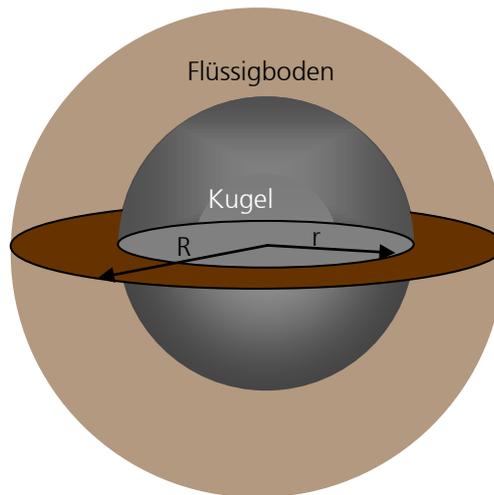


BILD 71: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VON FLÜSSIGBODEN UMGEBENEN KUGEL

Aus der Bedingung, dass die Kreisringfläche der Kreisfläche entsprechen soll, ergibt sich für den Radius der Hüllkugel:

$$r^2 \cdot \pi = (R^2 - r^2) \cdot \pi \quad \text{Gl. 5.4}$$

$$R^2 = 2 \cdot r^2$$

$$R = \sqrt{2} \cdot r$$

Der Fließbereich wird durch die Oberflächen der inneren Kugel und der Hüllkugel begrenzt. Auf beiden Kugeloberflächen können Schubspannungen bis zur Größe der Fließgrenze übertragen werden.

Die Fließgrenze kann somit aus der im Versuch gemessenen maximalen Zugkraft F ermittelt werden.

$$\tau_f = \frac{F}{4 \cdot \pi \cdot r^2 + 4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

Mit Gl. 5.4 folgt:

$$\tau_f = \frac{F}{12 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{Gl. 5.5}$$

Da für die Versuche eine Kugel mit einem Radius von 1,75 cm verwendet wurde, kann die Formel vereinfacht werden zu:

$$\tau_f = \frac{F}{12 \cdot \pi \cdot 1,75} = \frac{F}{115,45}$$

$$\tau_f = \frac{\Delta M}{115,45} \cdot 100 = 0,87 \cdot \Delta M$$

5.1.3 Ergebnisse der Parallelversuche

Die im Nachfolgenden aufgeführten Versuchsergebnisse wurden unter Verwendung des Vertikal-Pendelgerätes mit Flügel- sowie Kugelpendel und eines Flügelschergerätes ermittelt. Hinsichtlich des

eingesetzten Flüssigbodens wurde die Originalrezeptur der Firma ENREBA Neuss GmbH umgesetzt. Im Rahmen der Analysen wurde das Größtkorn des Zuschlagbodens variiert.

Bild 72 bis Bild 74 zeigen, dass die Verläufe der Scherfestigkeit in Bezug auf das Pendelgerät mit Flügelpendel sowie auf das Flügelschergerät ähnlich steigende Tendenzen aufweisen. Ebenso verhält es sich bei dem Messgerät mit Kugelpendel. Die Messergebnisse aller drei Versuchsgeräte bewegen sich in einem vergleichbaren Bereich.

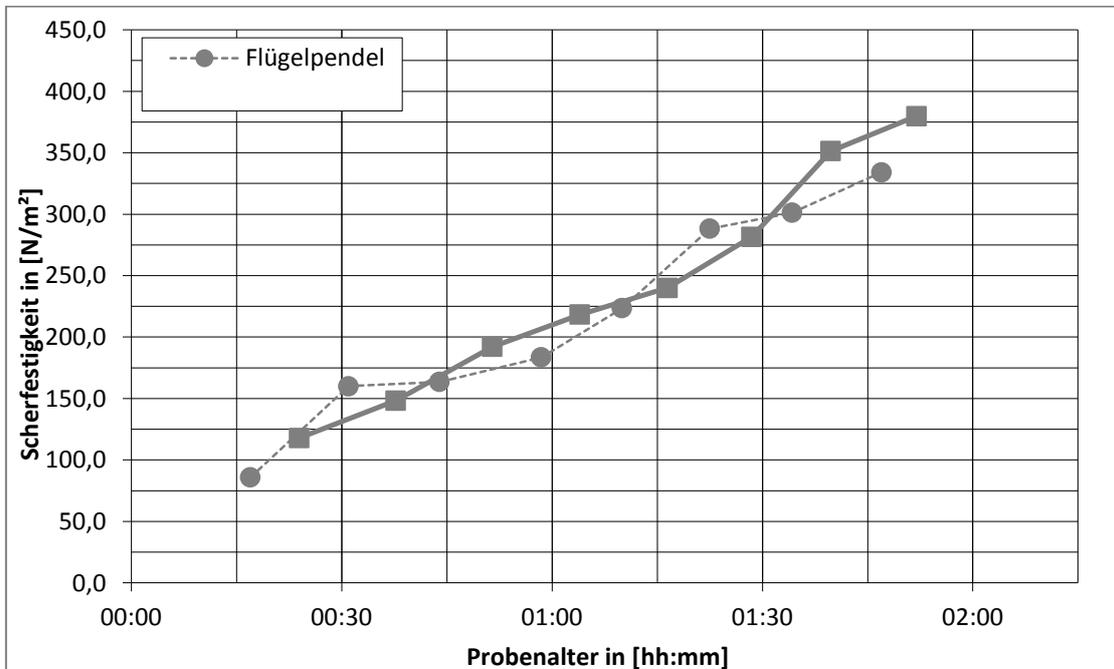


BILD 72: VERGLEICH VON FLÜGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖßTKORN, ORIGINALREZEPT)

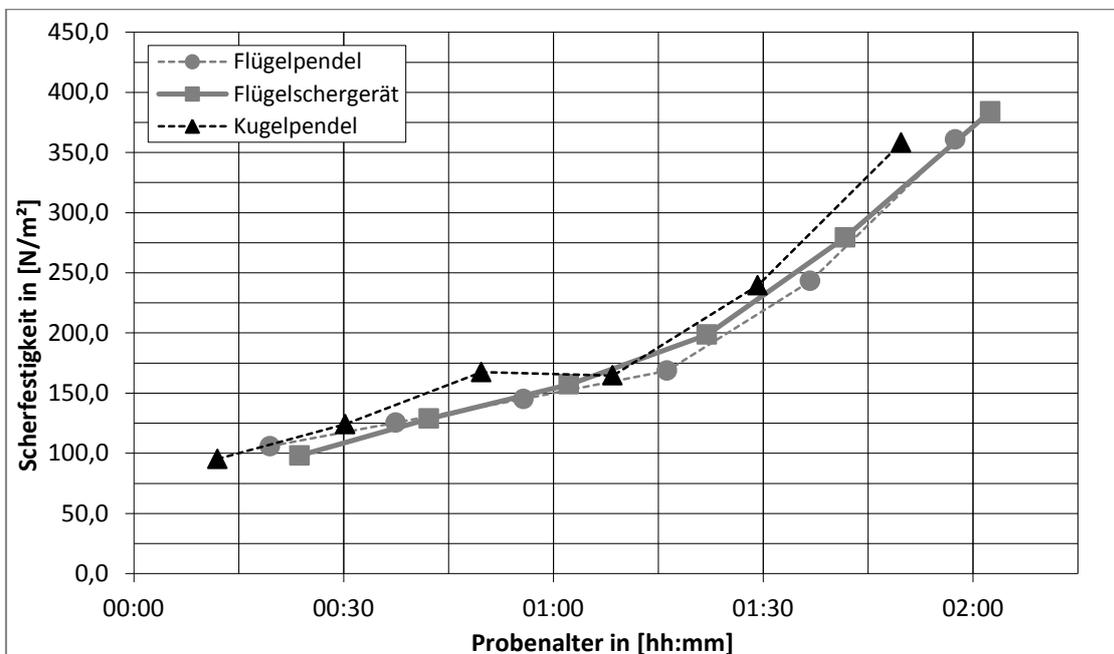


BILD 73: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (4 MM GRÖßTKORN, ORIGINALREZEPT)

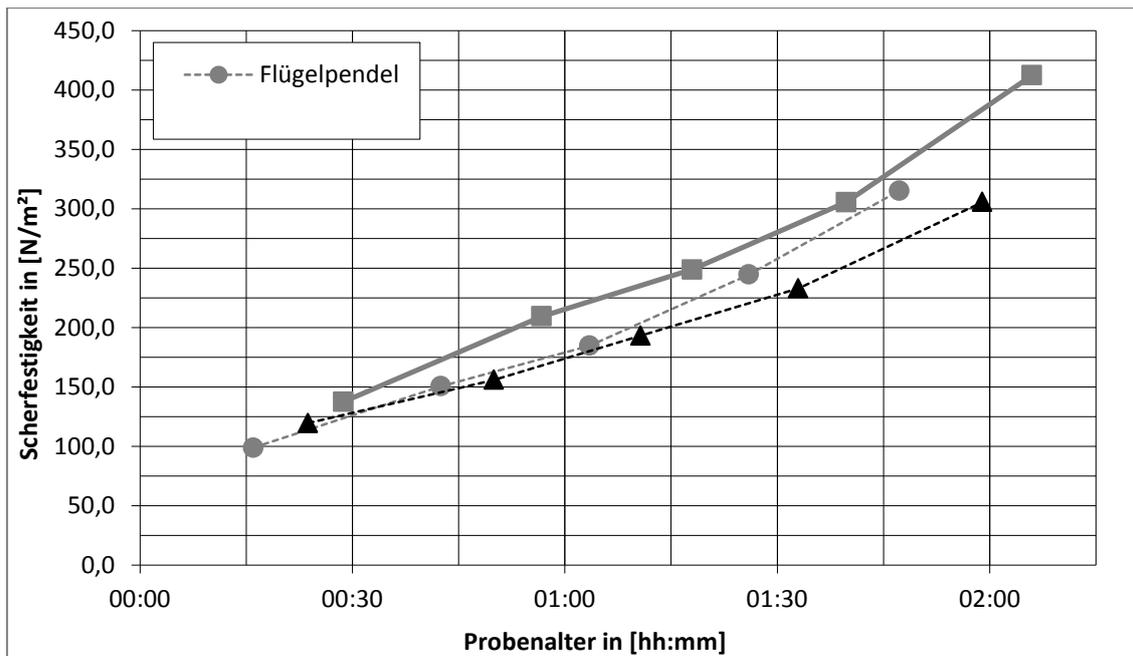


BILD 74: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (2 MM GRÖßTKORN, ORIGINALREZEPT)

Bei Änderung des Originalrezeptes wurde in einem ersten Schritt auf die Zugabe von Zement verzichtet (100% Wassergehalt, 0% Zementgehalt, 100% Compoundgehalt). Die Verwendung von Compound als einziges Bindemittel führt zu stärkeren Abweichungen zwischen den beiden Messverfahren Vertikal-Pendelgerät (Kugel- und Flügelpendel) sowie Flügelschergerät (Bild 75). Eine mögliche Ursache hierfür kann in der Eigenschaft des Compounds begründet sein, einen Gleiteffekt auf der Oberfläche der Zuschläge und gegebenenfalls auch der Tauchkörper zu erzeugen (vgl. Kapitel 3.4.2), welcher auf die Ergebnisse des Pendelgeräts einen abmildernden Einfluss zu haben scheint. Da dieser Effekt bei allen anderen Rezepturen unter Verwendung von Zement nicht zu beobachten ist und der Einsatz von fließfähigen Verfüllmaterialien unter ausschließlicher Zugabe von Compound in der Praxis nicht angewendet wird, haben die Abweichungen bei diesen Versuchen keine besondere Relevanz.

In einem zweiten Schritt wurde als Bindemittel nur Zement zugegeben (100% Wassergehalt, 100% Zementgehalt, 0% Compoundgehalt). Die Entwicklung der Scherfestigkeit gemäß Bild 76 zeigt einen ähnlichen Verlauf für Kugel- und Flügelpendel sowie Flügelschergerät.

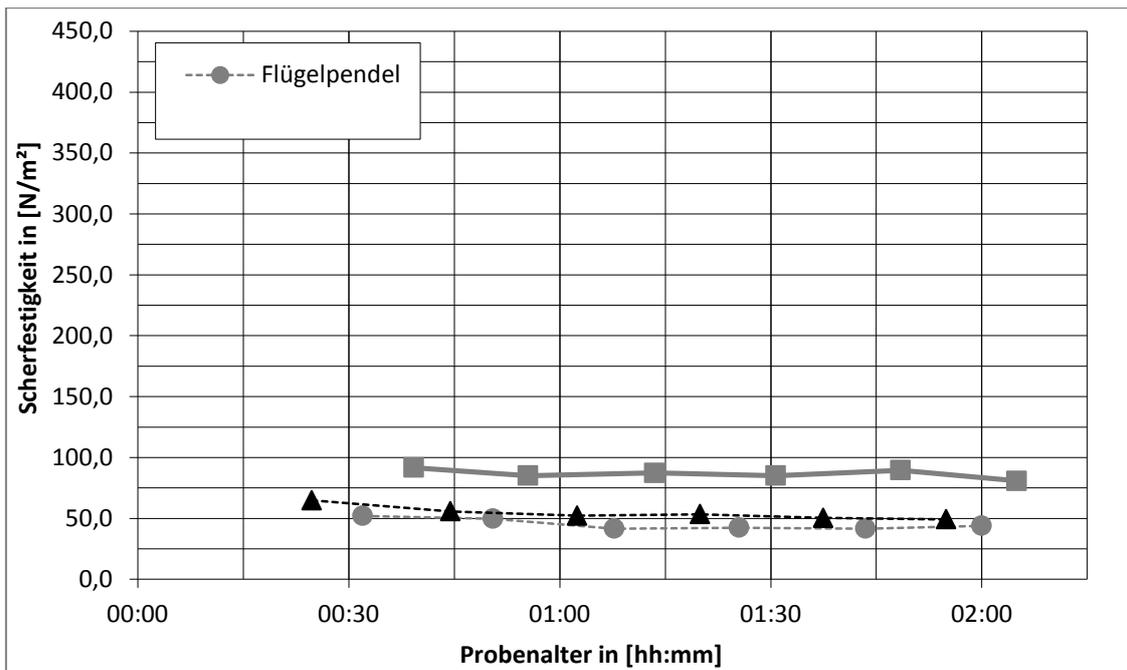


BILD 75: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖBTKORN, 100% WASSERGEHALT, 0% ZEMENTGEHALT, 100% COMPOUNDGEHALT)

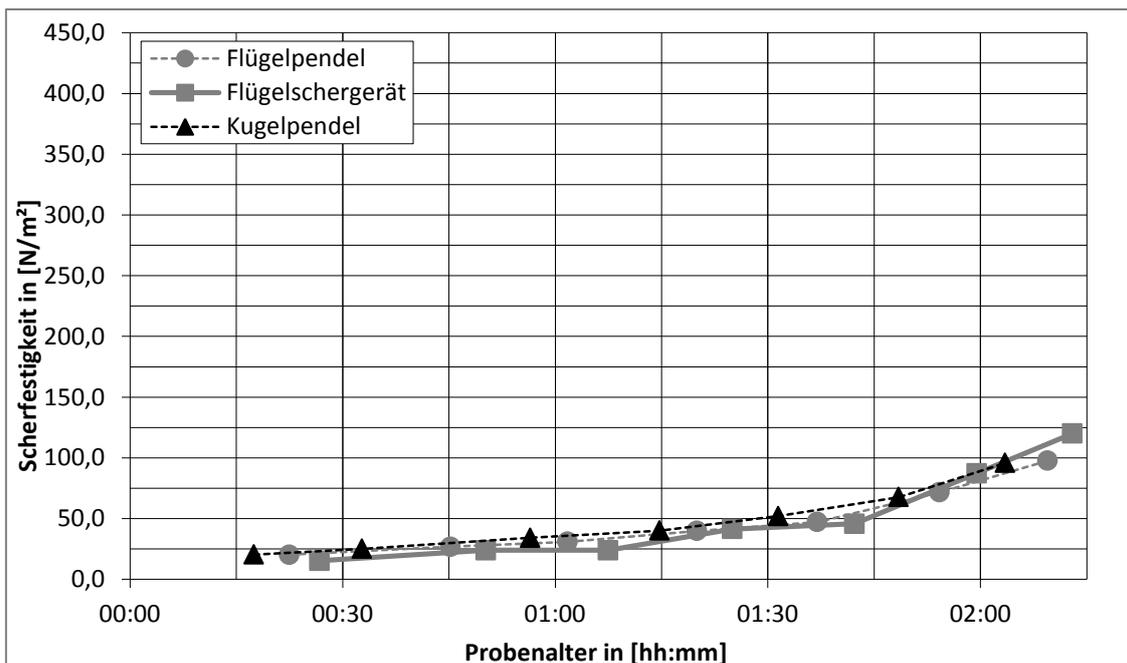


BILD 76: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖBTKORN, 100% WASSERGEHALT, 100% ZEMENTGEHALT, 0% COMPOUNDGEHALT)

Im Zuge weiterer Untersuchungen werden Kombinationen des Originalrezeptes gewählt, bei denen der Bindemittelgehalt von Zement oder Compound jeweils reduziert wird. Die Ergebnisse in Bild 77 bis Bild 79 demonstrieren, dass sich die Verläufe der Schерfestigkeit bei den entsprechenden Messverfahren in ähnlichen Bereichen bewegen. Die Messungen mit dem Vertikal-Pendelgerät zeigen zum Teil eine gleichmäßigere Entwicklung der Schерfestigkeit über das Probenalter als die Messungen mit dem Flügelschergerät.

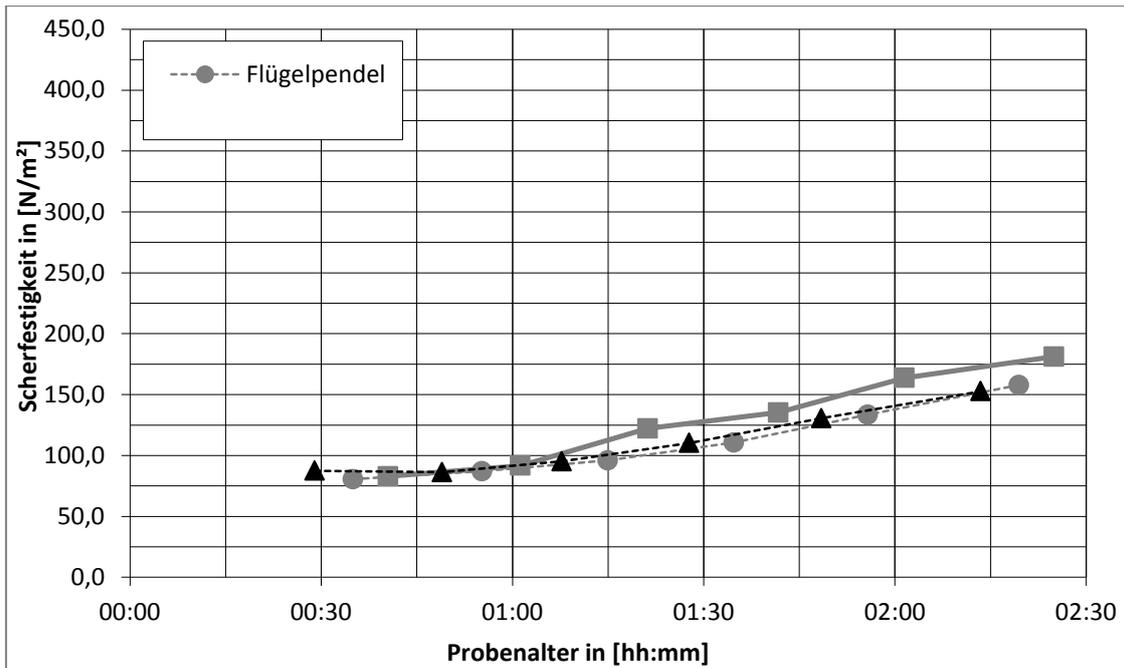


BILD 77: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖBTKORN, 100% WASSERGEHALT, 50% ZEMENTGEHALT, 100% COMPOUNDGEHALT)

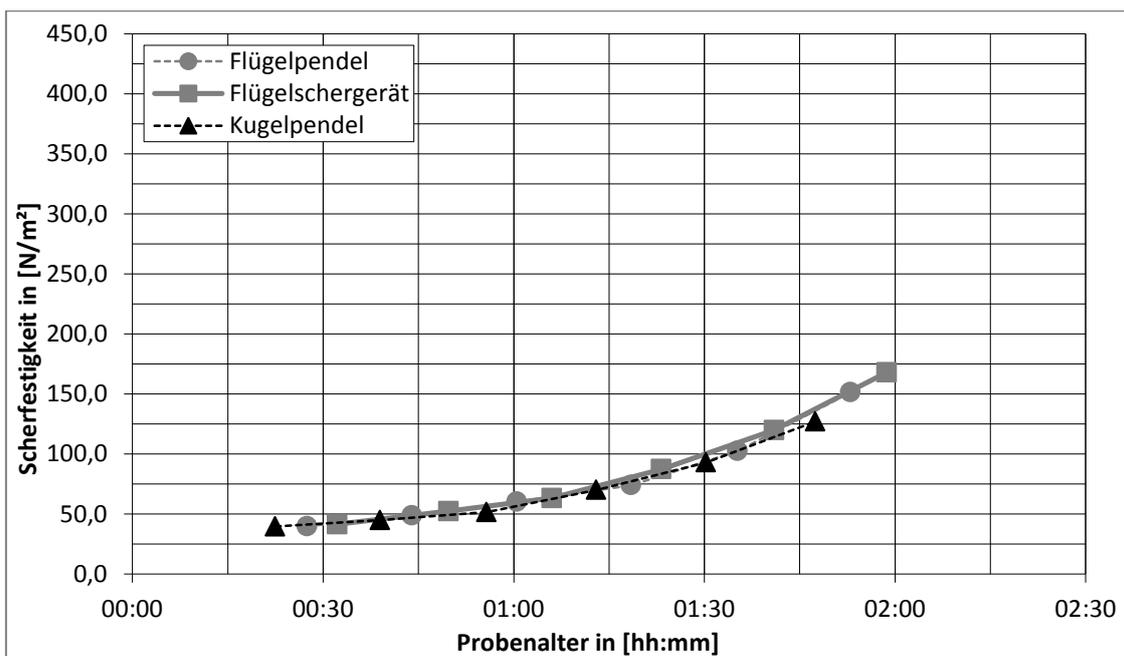


BILD 78: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖBTKORN, 100% WASSERGEHALT, 100% ZEMENTGEHALT, 50% COMPOUNDGEHALT)

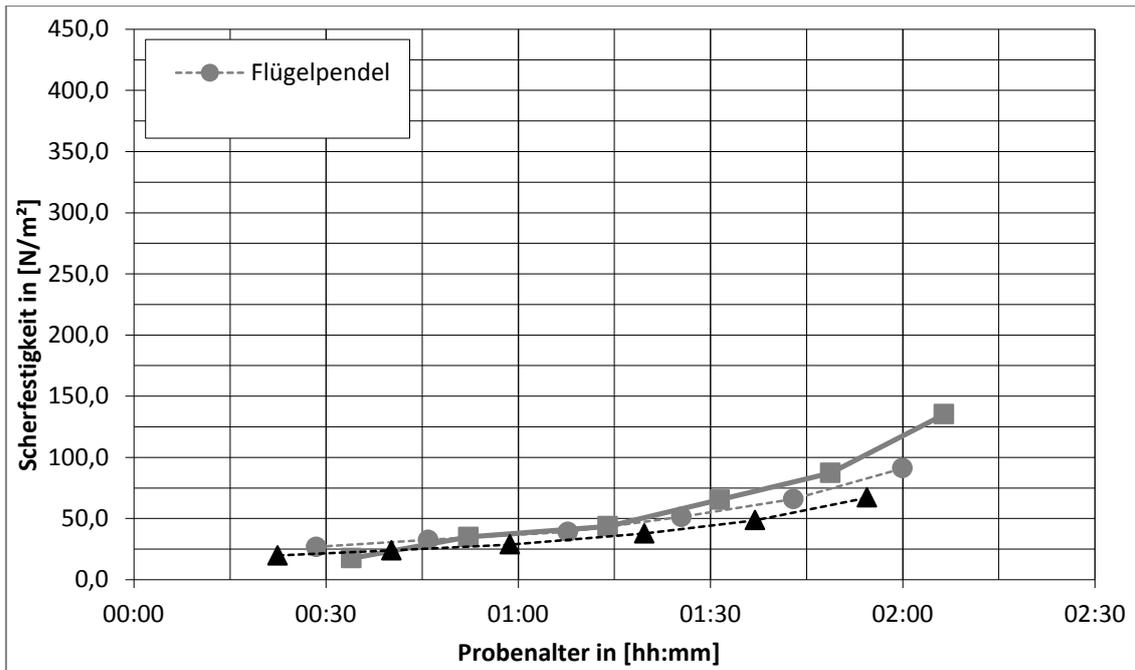


BILD 79: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖBTKORN, 100% WASSERGEHALT, 100% ZEMENTGEHALT, 25% COMPOUNDGEHALT)

Auch ohne jeglichen Zusatz von Bindemitteln, also beim reinen Einsatz von Wasser und Zuschlagboden, zeigen sich annähernd analoge Versuchsergebnisse (Bild 80). Es sind darüber hinaus Schwankungen bei den Messergebnissen des Flügelchergerätes herauszustellen.

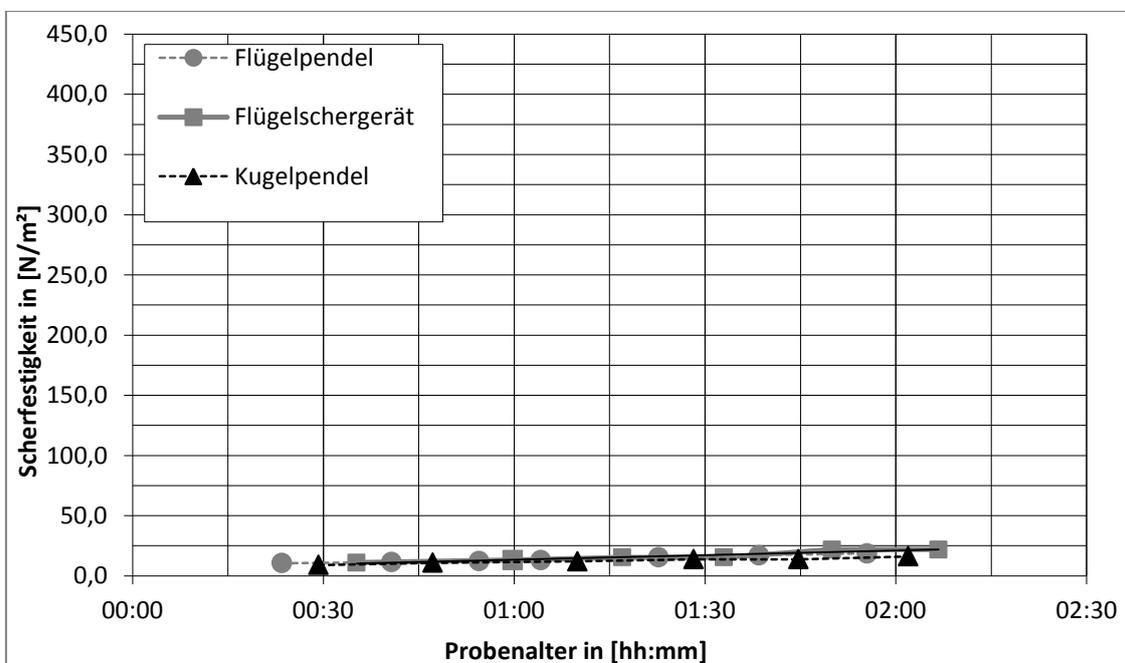


BILD 80: VERGLEICH VON FLÜGEL-, KUGELPENDEL UND FLÜGELSCHERGERÄT (8 MM GRÖBTKORN, 100% WASSERGEHALT, 0% ZEMENTGEHALT, 0% COMPOUNDGEHALT)

Fazit

Analog zu den Analysen der Hägermantisch-Versuche (vgl. Kapitel 4.2.2.1) werden bei den Versuchen zur Messung der Fließgrenze neben dem Wassergehalt die Anteile von Zement und Compound variiert, um anhand verschiedener Kombinationen den Einfluss der Komponenten auf die Scherfestigkeit der Suspension aufzuzeigen.

Fehlen in der Rezeptur beide Bindemittelanteile (0% Zement und 0% Compound) lässt sich nur ein minimaler Anstieg der Scherfestigkeit über die Zeit feststellen. Hier könnten gegebenenfalls Tonanteile im Zuschlagboden durch Quellen zu einem geringen Anstieg geführt haben. Wird dem Boden neben Wasser (100% W.) nur Compound (0% Z. und 100% C.) beigefügt, weist der Boden zwar eine höhere Scherfestigkeit gegenüber der Rezeptur ohne Bindemittel auf, allerdings vergrößert sich diese über die Zeit nicht. Der Kurvenverlauf der Scherfestigkeit ähnelt in diesem Fall dem Verlauf der Messkurve bei grundsätzlich fehlendem Bindemittel. Enthält der Zuschlagboden anstelle des Compounds- nur einen Zementanteil, bewegt sich die Scherfestigkeit anfänglich in einem niedrigen Bereich. Mit zunehmendem Probenalter ist eine leicht steigende Scherfestigkeit festzustellen.

Die Verbindung von Compound und Zement gemäß Ursprungs- bzw. Originalrezeptur (100% W., 100% Z. und 100% C.) zeigt dagegen deutlich die Interaktion beider Bindemittel. In Bezug auf die Scherfestigkeit des RSS®-Flüssigbodens hat die Kombination beider Bindemittel einen überproportionalen Einfluss gegenüber der Wirkung der einzelnen Komponenten. Der Endwert nach etwa zwei Stunden liegt für das Originalrezept bei über $\tau_f = 420 \text{ N/m}^2$ (Bild 82), wohingegen die Addition der Messergebnisse der jeweiligen Versuche bezüglich der entsprechenden Einzelkomponenten einen Wert von nur ca. 160 N/m^2 erreicht ($\tau_f = 59 \text{ N/m}^2$ bei 0% Z. und 100% C., sowie $\tau_f = 98 \text{ N/m}^2$ für 100% Z. und 0% C.).

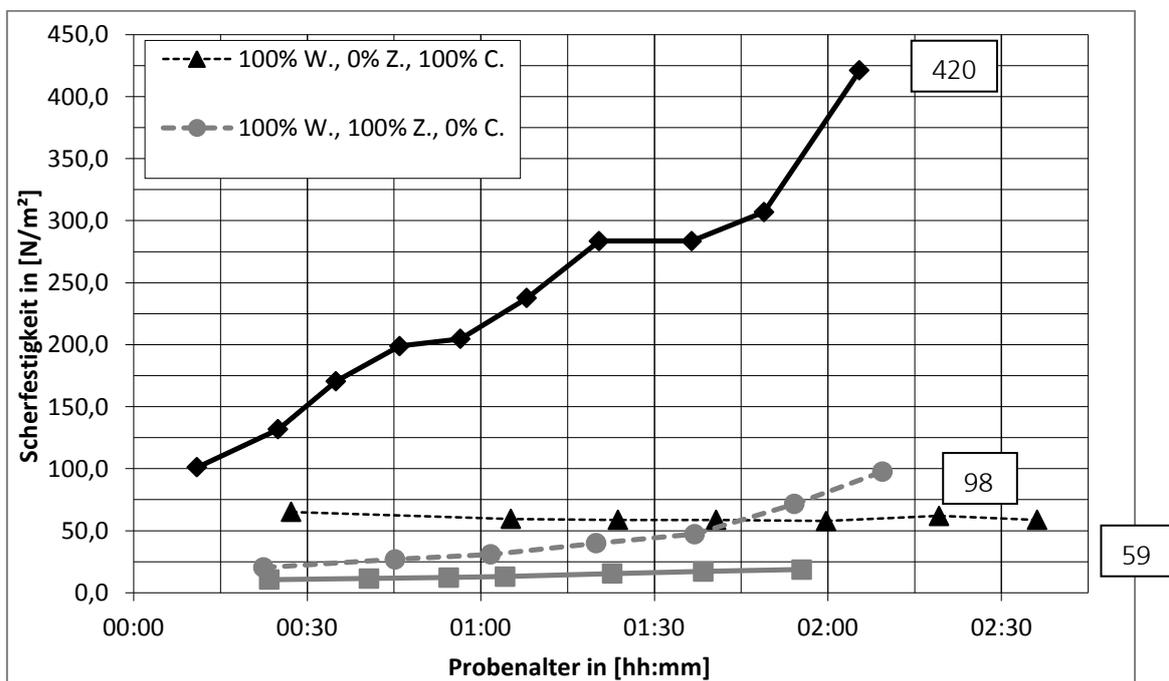


BILD 81: VARIATION DER BINDEMITTEL (MESSUNGEN MIT DEM PENDELGERÄT) MIT W. = WASSERGEHALT, Z. = ZEMENTGEHALT, C. = COMPOUNDGEHALT

In Bild 82 ist im Zuge der Messungen mit dem Pendelgerät eine Variation des Compoundgehalts dargestellt. Der Zementgehalt lag hinsichtlich der Originalrezeptur bei allen Versuchsdurchführungen bei 100%. Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigendem Compoundgehalt auch die Scherfestigkeit des RSS®-Flüssigbodens zunimmt. Allerdings ist hier der Sprung zwischen den Ergebnissen des 50%-igen

und 100%-igen Compoundgehalts verhältnismäßig groß, was darauf schließen lässt, dass die Originalrezeptur für RSS®-Flüssigboden (100% W., 100% Z., 100% C.) der Firma ENREBA Neuss GmbH in Bezug auf die Bindemittelzugabe durch ein ausgewogenes Verhältnis von Compound und Zement genau darauf abgestimmt ist, einen größtmöglichen Anstieg der Scherfestigkeit innerhalb kurzer Zeit zu erreichen.

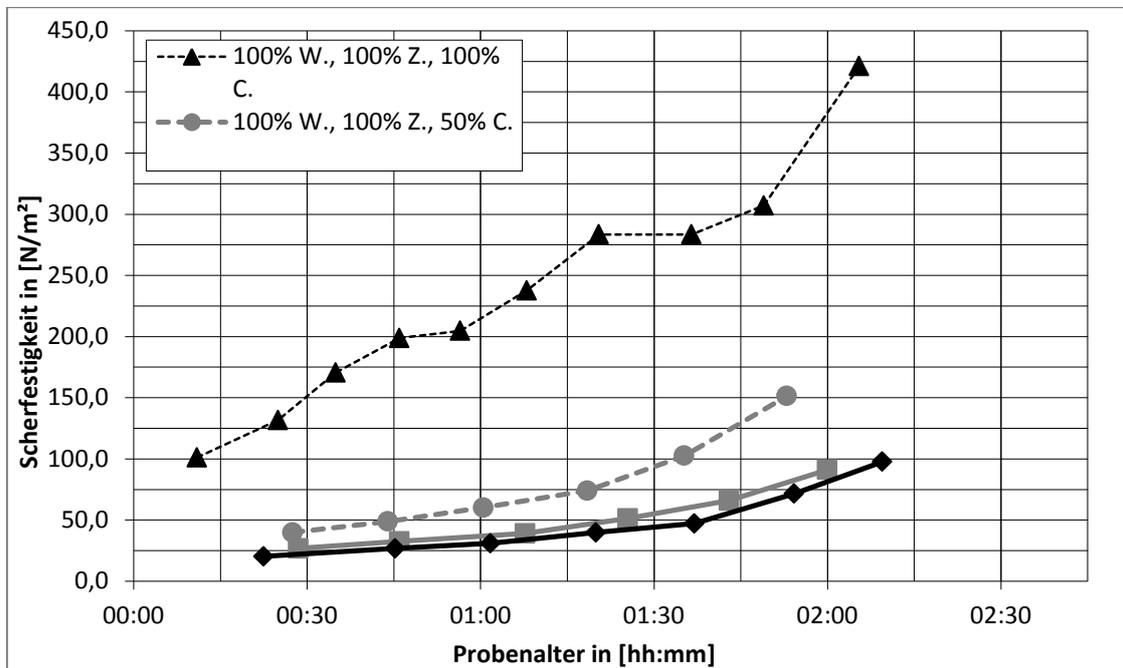


BILD 82: VARIATION DES COMPOUND-GEHALTS (MESSUNGEN MIT DEM PENDELGERÄT) MIT W. = WASSERGEHALT, Z. = ZEMENTGEHALT, C. = COMPOUNDGEHALT

Die oben beschriebenen Untersuchungen wurden ebenso bezüglich des Zementgehaltes durchgeführt. In Bild 83 sind die Ergebnisse infolge einer Variation des Gehaltes an Zement bei 100% Compoundgehalt gemäß Originalrezept dargestellt. Die Kurvenverläufe weisen im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Kombination des Compoundgehalts ähnliche Tendenzen auf. Deutlich wird hierbei, dass ohne Zementbeigabe (0% Z.) nur eine geringe Scherfestigkeit ohne messbaren Anstieg erreicht wird. Analog zu den Versuchen am Hägermannisch (vgl. Kapitel 4.2.2.1) ist bei steigendem Zementgehalt ein ausgeprägter Anstieg des Kurvenverlaufs zu beobachten. Ebenso lässt sich die Aussage bestätigen, dass das für die Versuche verwendete Originalrezept ein günstiges Verhältnis der einzelnen Bindemittelkomponenten aufweist.

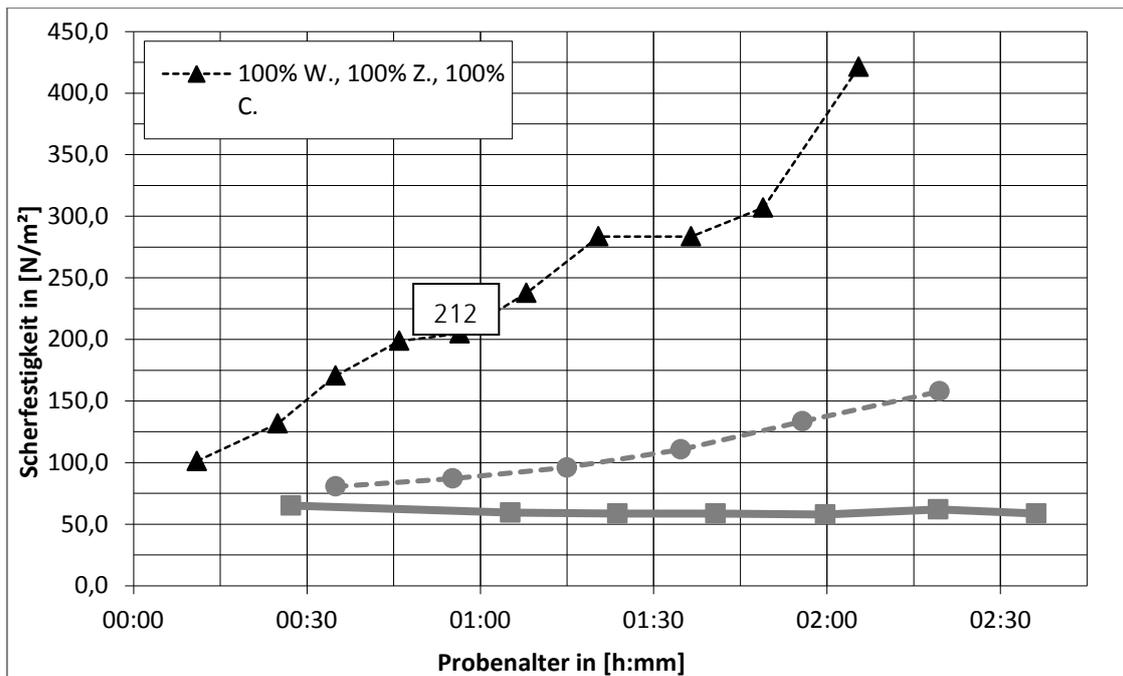


BILD 83: VARIATION DES ZEMENTGEHALTS (MESSUNGEN MIT DEM PENDELGERÄT) MIT W. = WASSERGEHALT, Z. = ZEMENTGEHALT, C. = COMPOUNDGEHALT

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Messung der Fließgrenze mit dem Vertikal-Pendelgerät für alle baupraktisch relevanten Bereiche der Flüssigbodenrezepturen mit den Standard-Laborversuchen vergleichbare Ergebnisse zeigen. Größere Abweichungen zwischen beiden Messverfahren zeigen sich nur bei Verwendung von Material, das ausschließlich Compound als Zusatz enthält.

Weiterhin verdeutlichen die Versuchsergebnisse, dass sich durch Variationen der Rezeptur einzelne Parameter der Suspension nicht beliebig verändern lassen, ohne einen erheblichen Effekt auf die Suspensionseigenschaften zu bewirken. So lässt sich durch veränderte Bindemittelgehalte die Entwicklung der Fließfähigkeit nicht beliebig beeinflussen, ohne über die Scherfestigkeit die Suspensionsstabilität, die Auftriebswirkung und die Stützwirkung im Zustand des unverbauten, flüssigkeitsgestützten Grabens ebenfalls zu verändern.

Im weiteren Verlauf des Berichtes werden Untersuchungen zu den Suspensionseigenschaften in Abhängigkeit der Scherfestigkeit beschrieben.

5.2 Untersuchung zur Stabilität von hochkonzentrierten Suspensionen

5.2.1 Berechnung der Suspensionsstabilität

Die Berechnung der Suspensionsstabilität erfolgt in Abhängigkeit von der Kornverteilung der Zuschlagstoffe sowie der Fließgrenze der Suspension in Anlehnung an den Ansatz von Saak *et. al.* (2001).

Die Mindestfließgrenze einer stabilen Suspension errechnet sich zu:

$$\tau_{0,min} \geq \frac{4}{3} \cdot \Delta\gamma_{Korn} \cdot r_{Korn} \quad \text{Gl. 5.6}$$

Durch Umstellung ergibt sich der maximale Korndurchmesser einer stabilen Suspension bei gegebener Fließgrenze:

$$d_{Korn} \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{\tau_{0,min}}{\Delta\gamma_{Korn}}$$

Für das Originalrezept von RSS[®]-Flüssigboden ergibt sich 30 Minuten nach dem Anmischen eine Scherfestigkeit von 150 N/m². Nach 60 Minuten wird eine Scherfestigkeit von ca. 212 N/m² ermittelt (vgl. Bild 83).

Hieraus ergibt sich nach 30 Minuten mit $\gamma_{Korn} = 27.200 \frac{N}{m^3}$ und $\gamma_{Fluid} = 12.000 \frac{N}{m^3}$:

$$d_{Korn} \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{150}{27.200 - 12.000} = 0,007 \text{ m}$$

Nach 60 Minuten ändert sich der Wert zu:

$$d_{Korn} \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{212}{27.200 - 12.000} = 0,009 \text{ m}$$

Die Sieblinie der Zuschlagkörnung von RSS[®]-Flüssigboden weist für einen Siebdurchgang von 95% einen Korndurchmesser von $d_{95} = 8 \text{ mm}$ und ein Größtkorn von $d_{max} = 31,5 \text{ mm}$ aus.

Den in Kapitel 5 ermittelten Messwerten der Fließgrenze zufolge ist die im Labor untersuchte Suspension nach dem Originalrezept von RSS[®]-Flüssigboden nicht ausreichend stabil. Zur Überprüfung dieses Ergebnisses werden nachfolgend Laborversuche zur Suspensionsstabilität durchgeführt.

5.2.2 Einfluss der Rezeptur auf die Suspensionsstabilität

Die nachstehend beschriebenen Versuchsdurchführungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Bergischen Universität Wuppertal.

Für die Untersuchungen der Suspensionsstabilität von RSS[®]-Flüssigboden werden sowohl dessen Originalrezept als auch zwei Variationen verwendet. Der Anteil des Schlammkorns $d < 0,063 \text{ mm}$ beträgt bei allen drei Mischungen etwa 25%.

Es werden drei Mischungen verglichen:

- Originalrezept mit 100% Compound, 100% Zement und 100% Wasser
- Rezept mit 125% Compound, 100% Zement und 120% Wasser
- Rezept mit 75% Compound, 100% Zement und 100% Wasser

Die Rezepturen werden angemischt, jeweils 30 Minuten bzw. 60 Minuten nach dem Anmischen erneut durchgerührt und in Probebehälter abgefüllt. Im Anschluss werden beide Proben bis zu einem Alter von zwei Stunden ruhen gelassen.

Nach der Ruhezeit zeigte sich auf allen Proben eine entsprechende Wasserschicht, woraus sich die nachfolgend aufgeführten, auf den Gesamtwassergehalt bezogenen, prozentualen Werte ergeben. Die detaillierten Ergebnisse hierzu sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

- 4,02% (30 min Probe) und 2,09% (60 min Probe) beim Originalrezept
- 5,86% (30 min Probe) und 3,91% (60 min Probe) bei 125% Compound und 120% Wasser
- 3,54% (30 min Probe) und 2,41% (60 min Probe) bei 75% Compound.

Darüber hinaus wurden zunächst sowohl die Feucht- als auch die Trockendichten der gesamten Probe bestimmt. Die Ergebnisse für die 30- sowie 60-Minuten-Proben liegen bei den jeweiligen Rezepturen in einem ähnlichen Bereich, deren Werte für die Feucht- und Trockendichte unterscheiden sich kaum.

Des Weiteren wurden Wassergehalt, Feucht- und Trockendichte für insgesamt drei Schichten (Boden-, Mittel-, Oberflächenabschnitt) der jeweiligen Rezeptur bzw. Probe ermittelt. In Bezug auf die Dichte ergab sich hierbei ein Gefälle, bei welchem an der Oberfläche geringere Dichten als am Behälterboden ermittelt wurden.

Insgesamt bestätigen die Versuchsergebnisse, die aus der Messung der Fließgrenze berechnete unzureichende Suspensionsstabilität des untersuchten Flüssigbodens.

So reicht die gemessene Fließgrenze nicht aus, die groben Zuschlagfraktionen mit über 7 mm Korndurchmesser (Probenalter 30 Minuten) bzw. über 9 mm (Probenalter 60 Minuten) am Absinken zu hindern.

TABELLE 2: DICHTEVERTEILUNG UND BLUTWASSERABGABE DREI VERSCHIEDENER FLÜSSIGBODENREZEPTUREN

Rezept	Abfüllung nach	Blutwasser von Gesamtwasser in [%]	Feuchtdichte (gesamt) in [g/cm ³]	Trockendichte (gesamt) in [g/cm ³]	Schicht	Wassergehalt in [%]	Feuchtdichte in [g/cm ³]	Trockendichte in [g/cm ³]	$\Delta_{\text{Trockendichte}}$ in [g/cm ³]
100% Compound 100% Zement 100% Wasser (Originalrezept)	30 min	4,02	1,83	1,40	1	34,0	1,53	1,14	-
					2	28,9	1,84	1,43	0,29
					3	27,9	2,24	1,75	0,61
	60 min	2,09	1,82	1,39	1	32,0	1,66	1,26	-
					2	30,2	1,78	1,37	0,11
					3	28,6	2,07	1,61	0,35
125% Compound 100% Zement 120% Wasser	30 min	5,86	1,77	1,29	1	45,9	1,51	1,04	-
					2	35,8	1,76	1,30	0,26
					3	31,0	2,19	1,67	0,63
	60 min	3,91	1,76	1,28	1	43,0	1,59	1,11	-
					2	35,7	1,71	1,26	0,15
					3	31,9	2,06	1,56	0,45
75% Compound 100% Zement 100% Wasser	30 min	3,54	1,85	1,41	1	34,3	1,62	1,21	-
					2	29,5	1,76	1,36	0,15
					3	28,0	2,26	1,76	0,55
	60 min	2,41	1,82	1,39	1	33,0	1,59	1,19	-
					2	29,0	1,83	1,42	0,23
					3	28,0	2,15	1,68	0,49

6 Flüssige Grabenverfüllung im Rohrleitungsbau – Auftriebswirkung in Suspensionen

6.1 Beanspruchung der Rohrleitung im Einbauzustand

Schächte und Rohrleitungen sind technische Konstruktionen, die in Verbindung mit der umgebenden Bettung und Verfüllung eine Funktionseinheit darstellen. Das Rohr trägt die Lasten nicht allein, sondern bildet mit dem umgebenden Boden ein statisches System mit komplexen Wechselwirkungen zwischen Boden und Rohrleitung. Die *DIN EN 1610 (2010)* fordert, die auf Kanäle und Leitungen einwirkenden statischen sowie dynamischen Lasten bei der Planung festzulegen und vor Bauausführung nachzuweisen. Für die Berechnung gilt der ungünstigste Lastfall als maßgebend. Diesbezüglich ist insbesondere bei der flüssigen Grabenverfüllung zu prüfen, ob Belastungen aus Bauzuständen für das Rohr maßgebende Lastfälle darstellen.

6.1.1 Grundlagen zum effektiven Auftrieb einer Rohrleitung

Die Erkenntnisse zur Auftriebswirkung der Suspension finden nachfolgend für die Ermittlung der effektiven Belastung des Rohres bei der flüssigen Grabenverfüllung Berücksichtigung, für welche das nachfolgende Berechnungsmodell aufgestellt wird.

Werden die Berechnungsansätze zur Umströmung von Kugeln auf Rohre übertragen (Bild 84), so ergibt sich analog zur Hüllkugel für das Rohr ein Hüllzylinder mit einem Verhältnis der Radien von $R_{HZ} = 2 \cdot r_{Rohr}$.

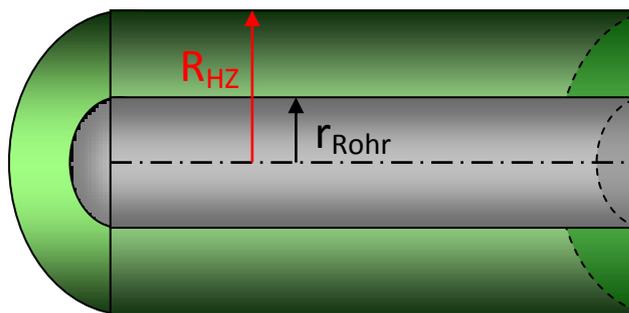


BILD 84: ROHR UND HÜLLZYLINDER ALS MODELL FÜR DER UMSTRÖMUNGSBEREICH DES ROHRES

Der statische Auftrieb kann aus der Differenz der Wichte von Suspension und Rohr errechnet werden. Hierzu wird zunächst aus Volumen und Masse die Dichte des Rohres ermittelt:

$$\rho_{Rohr} = \frac{M_{Rohr}}{A_{Rohr} \cdot L_{Rohr}} \quad \text{Gl. 6.1}$$

mit

M_{Rohr} = Masse des Rohres in [kg]

L_{Rohr} = Länge des Rohres in [m]

A_{Rohr} = Querschnittsfläche des Rohres in [m²]

Für die Berechnung der Auftriebskraft wird die Differenzwichte von hochkonzentrierter Suspension und Rohr ermittelt:

$$\Delta\gamma_{Rohr} = \rho_{Rohr} - \rho_{Suspension} \cdot g \quad \text{Gl. 6.2}$$

Hieraus errechnet sich die statische Auftriebswirkung zu:

$$f_{A_stat} = \Delta\gamma_{Rohr} \cdot A_{Rohr} \quad \text{Gl. 6.3}$$

Für die Auftriebskraft folgt:

$$F_{A_stat} = \Delta\gamma_{Rohr} \cdot A_{Rohr} \cdot L_{Rohr} \quad \text{Gl. 6.4}$$

F_{A_stat} berücksichtigt die rechnerische Auftriebskraft, die sich aus dem Volumen der verdrängten hochkonzentrierten Suspension ergibt. Für eine Suspension, deren Fließgrenze gerade ausreichend groß ist, um ihre Zuschläge in Schwebelage zu halten, entspricht der Wert F_{A_stat} dem Wert der Auftriebskraft infolge behinderter Umströmung F_{A_tf} . Die messbare Fließgrenze τ_f kann über die Stabilisierung der Suspension hinaus keinen zusätzlichen Anteil an der Auftriebswirkung leisten, da eine weitere Erhöhung des Druckgefälles in den Porenkanälen unmittelbar einen Fließvorgang initiieren würde, der zum Druckausgleich führt, ohne eine zusätzliche Auftriebswirkung zu erzeugen. Ein zusätzlicher Auftriebseffekt kann nur in einer überstabilen Suspension wirksam werden, deren Fließgrenze größer ist als der erforderliche Wert $\tau_{0,min}$ zur Stabilisierung der Suspension.

Die Fließgrenze instabiler Suspensionen hingegen reicht nicht aus, um die Zuschläge in Schwebelage zu halten. Die groben Bestandteile der Suspension sinken ab, mit der Folge, dass sich der Druck in der flüssigen Phase entsprechend reduziert. Die effektive Auftriebswirkung einer instabilen Suspension ist somit geringer als der rechnerische Wert des statischen Auftriebs bei Ansatz der vollen Suspensionswichte.

Für die Berücksichtigung des Zusammenhangs von Fließgrenze, Suspensionsgewicht und effektivem Auftrieb wird die Ermittlung der auftriebswirksamen Fließgrenze $\Delta\tau_f$ als Differenz von gemessener Fließgrenze τ_f und der Mindestfließgrenze $\tau_{0,min}$ einer stabilen Suspension nach *Saak et al. (2001)* ermittelt. Anschließend wird für die Ermittlung des effektiven Auftriebs nur der Wert $\Delta\tau_f$ zusätzlich zur vollen Suspensionswichte berücksichtigt.

Für die Summe der Umfänge von Rohr und Hüllzylinder, der die Grenze des Fließbereichs bildet, ergibt sich:

$$U_{fließ} = 2 \cdot \pi \cdot r_{Rohr} + 2 \cdot \pi \cdot R_{HZ} \quad \text{Gl. 6.5}$$

mit

$$R_{HZ} = 2 \cdot r_{Rohr}$$

folgt

$$U_{fließ} = 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \quad \text{Gl. 6.6}$$

Damit die Suspension das Rohr umfließen kann, muss die Scherkraft τ_f - entsprechend der Größe der Fließgrenze der Suspension auf der gesamten Oberfläche des Fließbereichs - überwunden werden. Hieraus resultiert ein Fließwiderstand von:

$$f_{A_tf} = 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \tau_f$$

Wird der Anteil der Fließgrenze, der zur Stabilisierung der Suspension in Anspruch genommen wird, abgezogen, ergibt sich mit $\Delta\tau_f$ als auftriebswirksame Fließgrenze:

$$f_{A_{\Delta\tau_f}} = 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \Delta\tau_f \quad \text{Gl. 6.7}$$

Die effektive Auftriebswirkung ergibt sich schließlich zu:

$$f_{A_{eff}} = f_{A_{stat}} + f_{A_{\Delta\tau_f}} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr} + 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \Delta\tau_f \quad \text{Gl. 6.8}$$

$$f_{A_{eff}} = r_{Rohr} \cdot \pi \cdot r_{Rohr} \cdot \Delta\gamma_{Rohr} + 6 \cdot \Delta\tau_f$$

Die Auftriebskräfte werden in diesem Ansatz mit negativen Vorzeichen berücksichtigt, abtreibende Kräfte erhalten ein positives Vorzeichen.

Die effektive Belastung von Rohren während der flüssigen Grabenverfüllung wurde in kleinmaßstäblichen sowie in großmaßstäblichen Versuchen und im Rahmen einer Probebaustelle untersucht.

Nachfolgend werden die Messwerte dieser Versuche mit den Berechnungswerten des Näherungsansatzes verglichen.

6.1.2 Aufbau und Durchführung kleinmaßstäblicher Versuche

Der in diesem Kapitel dargestellte und erläuterte Modellversuch ermöglicht die Messung der effektiven Auftriebskräfte auf ein kleinmaßstäbliches PVC-Rohr. Der Versuchsaufbau ist in Bild 85 und die entsprechende Konstruktionszeichnung in Bild 86 dargestellt.

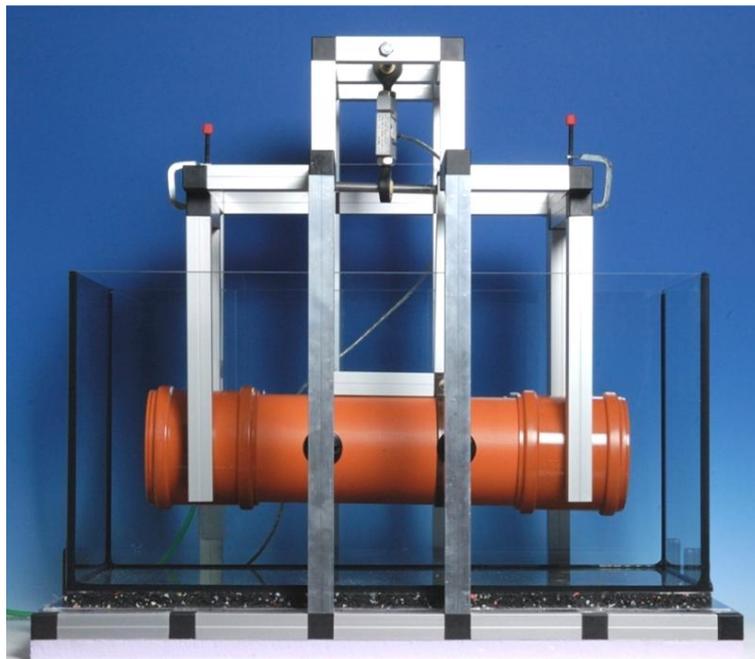


BILD 85: EINGESETZTES MODELL FÜR DEN AUFTRIEBSVERSUCH

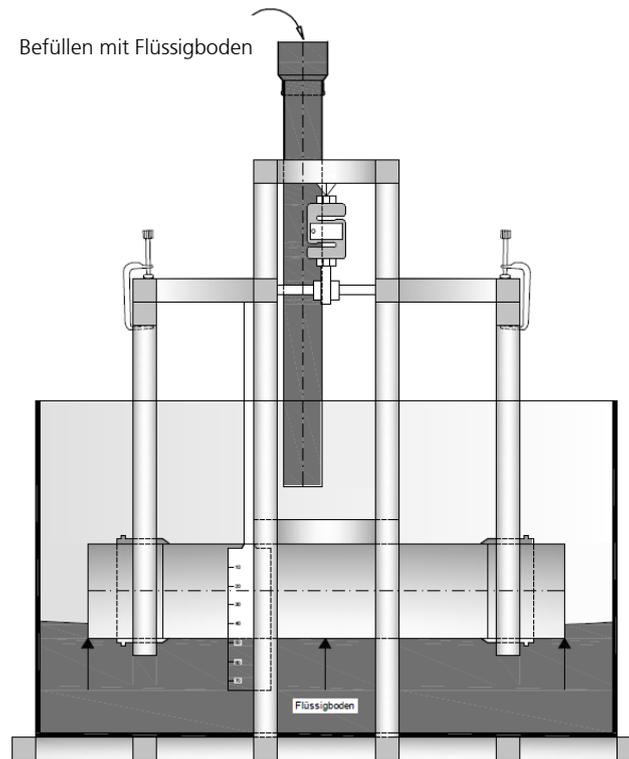


BILD 86: TECHNISCHE ZEICHNUNG DES VERSUCHSAUFBAUS

Die Vorrichtung besteht aus einem an beiden Stirnseiten verschlossenen PVC-Rohr DN 110, das an einer Haltevorrichtung befestigt ist. Das Rohr wird in waagerechter Lage innerhalb eines Glasbeckens (Länge x Breite x Höhe = 60 x 30 x 30 cm) fixiert. Die Haltevorrichtung ist über eine Kraftmessung an einem äußeren Rahmen zur Lastabtragung befestigt (Bild 87). Die Kraftmessdose dient der Ermittlung der auf das Rohr einwirkenden Vertikalkraft. Innerhalb des Glasbehälters befindet sich in geringem Abstand zum Beckenboden ein Staurohr an dem ein Druckaufnehmer angeschlossen ist. Durch diese Messvorrichtung wird der Flüssigkeitsdruck im Glasbecken während der Versuchsdurchführung erfasst (Bild 88).

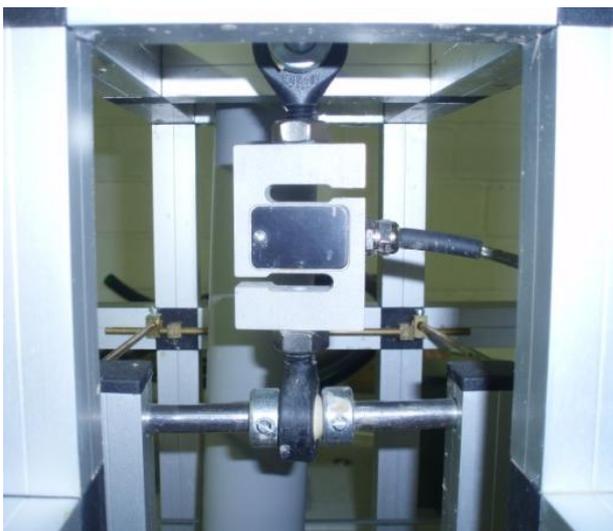


BILD 87: KRAFTMESSDOSE



BILD 88: STAUROHR

Sowohl die Vorrichtung für die Kraftmessung als auch die für die Aufnahme des Druckes ist mit Datenscheidern verbunden, welche während des Versuchs die Messdaten aufzeichnen. Da die Datenscheider die Messungen als Spannungswerte ausgeben, müssen die eingesetzten Geräte vor Versuchsbeginn kalibriert werden. Nach der Messwertaufnahme erfolgt eine Umrechnung der ausgegebenen Spannung in die Parameter Druckhöhe bzw. (Auftriebs-)Kraft.

Die Auftriebsversuche werden unter Verwendung von Wasser, Bentonitsuspension und RSS[®]-Flüssigboden durchgeführt. Das Wasser und die Bentonitsuspension können über einen Schlauch und eine Kreislumpumpe in den Glasbehälter eingefüllt werden (Bild 89).



BILD 89: EINFÜLLEN DER BENTONITSUSPENSION

Aufgrund der größeren Kornanteile der Suspension eignet sich die Pumpe nicht für die Verwendung mit RSS[®]-Flüssigboden. Der Flüssigboden wird aus einem Vorratsbehälter (Bild 90), der auf einem Gestell oberhalb des Versuchsaufbaus angeordnet ist, über ein Schüttrohr (Bild 91) in das Glasbecken eingefüllt.

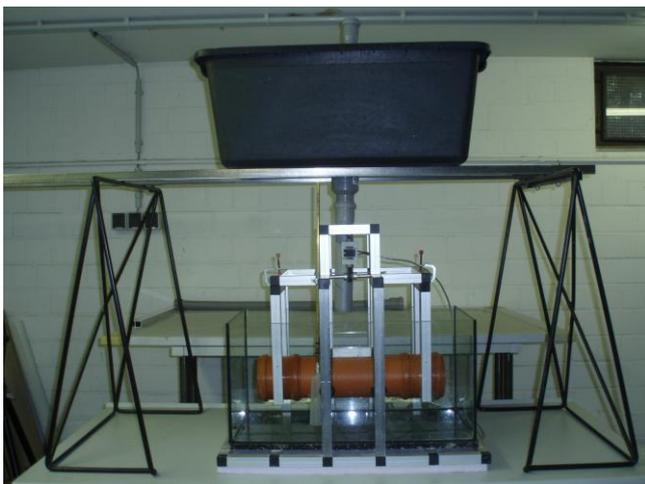


BILD 90: WANNE ÜBER DEM VERSUCHSAUFBAU



BILD 91: SCHÜTTROHR

Die Funktion des Versuchsaufbaus wird zunächst in einem Vorversuch getestet. Hierzu fördert die Kreislumpumpe Wasser in das Becken, während die Druckmessung den kontinuierlichen Anstieg des Flüssigkeitsspiegels im Becken registriert. Während der Befüllung des Beckens wird neben dem Füllstand auch die Kraft an der Aufhängevorrichtung des Rohres gemessen.

6.1.3 Beobachtungen während der Versuchsdurchführungen

Bei den Versuchen mit Wasser und Suspension zeigen sich grundlegende für die verschiedenen Flüssigkeiten charakteristische Unterschiede beim Eintauchvorgang des Rohres.

Beim Einfüllen von Bentonitsuspension und RSS®-Flüssigbodens (Bild 92) ist die durch die Fließgrenze der Suspensionen behinderte Umströmung der Rohre deutlich zu beobachten (Bild 93 und Bild 94). Die gemessene Auftriebskraft bei zunehmender Eintauchtiefe des Rohres übersteigt bei diesen Versuchen die Gewichtskraft des verdrängten Suspensionsvolumens. In Bild 94 wird der Effekt der behinderten Umströmung des Rohres aufgrund der vorhandenen Scherfestigkeit der Suspension erkennbar. Hierdurch ergibt sich auf der Unterseite des Rohres ein gegenüber der Differenz durch Volumenverdrängung erhöhter Flüssigkeitsdruck und somit eine größere effektive Auftriebskraft. Im Vergleich dazu entsteht beim Eintauchen des Rohres in Wasser, welches keine Scherfestigkeit besitzt, stets eine aus- gespiegelte, gerade Oberfläche der Flüssigkeit (Bild 95), was auf eine unbehinderte Umströmung des Rohres schließen lässt.

Die erhöhte Auftriebskraft bleibt wirksam, auch wenn der Suspensionsspiegel über den Rohrscheitel ansteigt und das Rohr vollständig eintaucht. Eine Strömung in der Suspension zum Ausgleich der Druckunterschiede in Bewegungsrichtung wird durch die Fließgrenze behindert, der erhöhte Partialdruck unterhalb des Rohres bleibt erhalten.

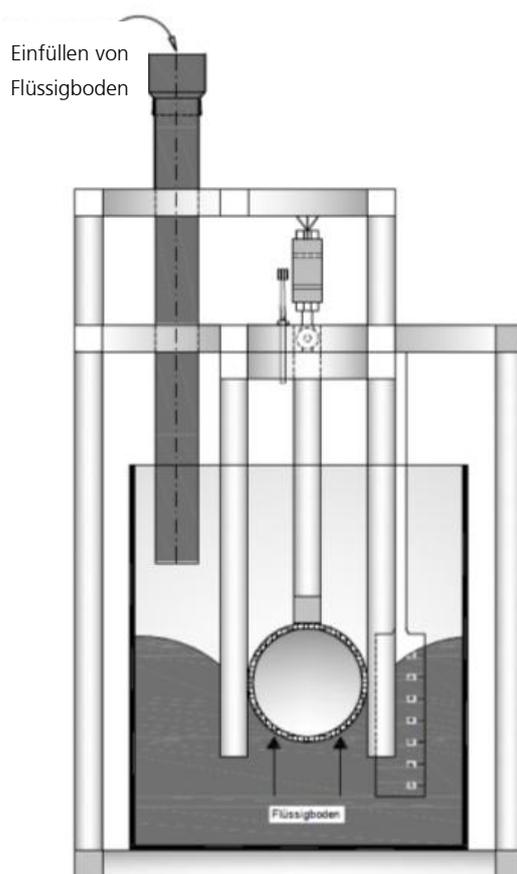


BILD 92: UMFLEIBUNGSVORGANG AM ROHR



BILD 93: ROHRUMSTRÖMUNG BEI BENTONITSUSPENSION



BILD 94: ROHRUMSTRÖMUNG BEI FLÜSSIGBODEN



BILD 95: AUSGEGLICHENE SPIEGELLAG E BEI WASSER

Wird anschließend der Suspensionsspiegel im Glasbecken wieder gesenkt, ist zunächst ein schneller Abfall der Druckkraft an der Rohraufhängung zu beobachten. Dies entspricht dem Effekt der Strömungsumkehr, wodurch sich der partielle Überdruck an der Unterseite des Rohres schnell abbauen kann, bis sich schließlich beim weiteren Absinken des Suspensionsspiegels die Druckverhältnisse innerhalb der Suspension im Bereich des Rohres umkehren. Der hierbei entstehende, partielle Überdruck oberhalb des Rohres hat eine relativ zur Eintauchtiefe des Rohres verringerte effektive Auftriebskraft zur Folge.

Aus diesen Versuchen wird der Zusammenhang zwischen der effektiven Auftriebskraft und der Wichte der Suspension ersichtlich. Der Druckunterschied in Strömungsrichtung, der für den Auftrieb eines Tauchkörpers ursächlich ist, hängt von dem verdrängten Flüssigkeitsvolumen, dem Unterschied der Wichten von Körper und Flüssigkeit sowie der Fließgrenze ab, die einen Druckausgleich in Strömungsrichtung infolge ihrer Fließgrenze behindert.

6.1.4 Auswertung der kleinmaßstäblichen Auftriebsversuche

Die Ergebnisse der Kraft- und Druckmessungen während der kleinmaßstäblichen Auftriebsversuche sind in den nachfolgend dargestellten und erläuterten Diagrammen aufgetragen. Neben den Messwerten sind in den Diagrammen auch die rechnerischen Auftriebskräfte, die sich aus der Eintauchtiefe des Rohres und dem verdrängten Volumen ergeben, abgebildet.

In den dazugehörigen Versuchen wird die Auftriebswirkung von Wasser, Bentonitsuspension und RSS®-Flüssigboden untersucht. Die gemessenen Auftriebskräfte in Abhängigkeit der Eintauchtiefe des Rohres sind in Bild 96 bis Bild 100 für die jeweiligen Versuche dargestellt. Die darin aufgetragenen Werte der Kraftmessung berücksichtigen die nach unten gerichtete Gewichtskraft des Rohres, die den Auftriebskräften entgegen wirkt. Bei dieser Auftragung ergeben sich die tatsächlichen Auftriebskräfte also aus der Differenz der als negativer Wert angezeigten Eigengewichtskraft und dem positiven Maximalwert der gemessenen Auftriebskraft.

6.1.4.1 Auftriebswirkung von Wasser

Bild 96 zeigt die gemessene sowie die rechnerische Auftriebskraft von Wasser auf das Rohr in Abhängigkeit der Eintauchtiefe.

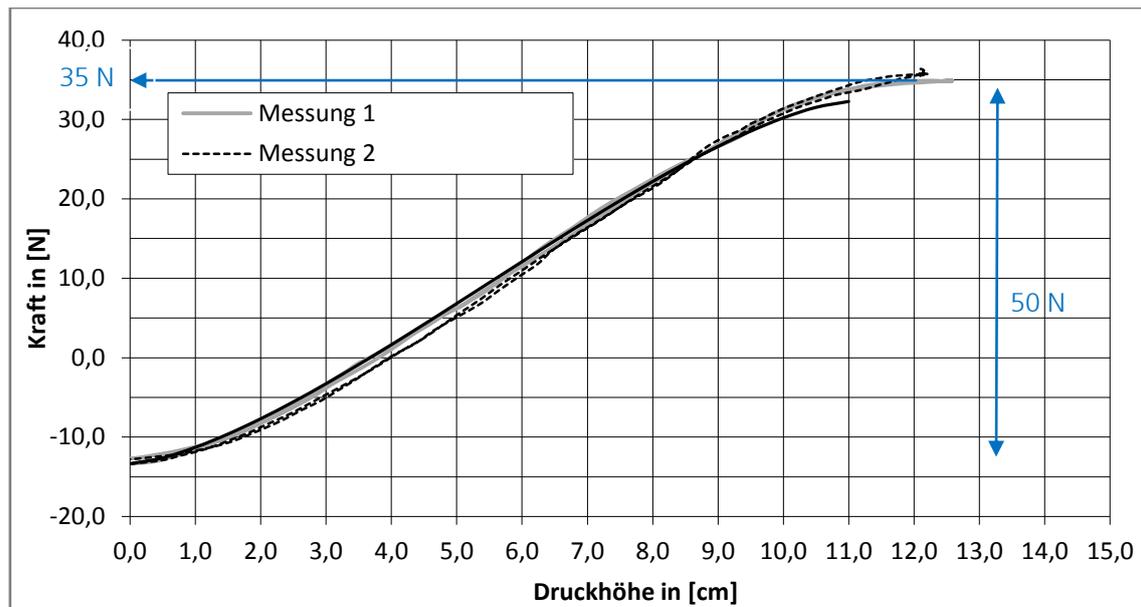


BILD 96: AUFTRIEBSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DRUCKHÖHE (WASSER)

Bei den Versuchen mit Wasser zeigt sich erwartungsgemäß ein gleichmäßiger Verlauf des Auftriebs mit zunehmendem Füllstand im Glasbecken. Die Kurve der Messwerte und der rechnerischen Auftriebskraft (Bild 96) zeigen einen nahezu identischen Verlauf. Die gemessene auf das Rohr wirkende maximale Kraft liegt nur etwa 4 N über dem berechneten Auftrieb. Die Abweichung resultiert aus dem Einfluss der Haltekonstruktion, die bei steigendem Pegel im Glasbecken ebenfalls unter Auftrieb steht, in der Berechnung aber nicht berücksichtigt wird.

Nachfolgend wird die effektive Auftriebskraft von Wasser berechnet.

Rohr	-Länge	L_{Rohr}	=	0,48 m
	-Durchmesser	D_{Rohr}	=	0,11 m
	-Gewichtskraft	$F_{\text{EG-Rohr}}$	=	14,47 N
Wasser	-Wichte	γ_{Wasser}	=	10.000,00 N/m ³
Gemessene Auftriebskraft		F_A	=	50,00 N

Zunächst wird das Raumbgewicht des Rohres ermittelt und die Differenz zur Wichte des Wassers berechnet. Die Wichte des Wassers wird mit $\gamma_{\text{Wasser}} = 10,00 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt.

Aus Gl. 6.1 folgt:

$$\gamma_{\text{Rohr}} = \frac{F_{\text{EG-Rohr}}}{A_{\text{Rohr}} \cdot L_{\text{Rohr}}}$$

$$\gamma_{\text{Rohr}} = \frac{14,47}{0,48 \cdot \frac{0,11^2}{4} \cdot \pi} = 3.172,14 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta\gamma_{\text{Rohr}} = 3.172,14 - 10.000,00 = -6.827,86 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Die effektive Auftriebskraft ergibt sich damit zu:

$$f_{A_eff} = f_{A_stat} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr}$$

$$f_{A_eff} = \frac{0,11^2}{4} \cdot \pi \cdot -6.827,86$$

$$f_{A_eff} = -64,89 \frac{N}{m}$$

$$F_{A_eff} = f_{A_eff} \cdot L_{Rohr}$$

$$F_{A_eff} = -64,89 \cdot 0,48 = -31,15 N$$

Die effektive Auftriebskraft F_{A_eff} berücksichtigt bereits das gegen den Auftrieb wirkende Eigengewicht des Rohres. Der vergleichbare Wert ergibt sich im Versuch zu 35 N. Im Versuch wird somit eine um ca. 11% zu große Auftriebskraft ermittelt.

6.1.4.2 Auftriebswirkung der Bentonitsuspension

Gemäß dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau wurden kleinmaßstäbliche Laborversuche zur Auftriebswirkung in einer Bentonitsuspension durchgeführt.

Die gemessenen sowie errechneten Kraftverläufe der Auftriebswirkung der betrachteten Bentonitsuspension sind in Bild 97 und Bild 98 dargestellt.

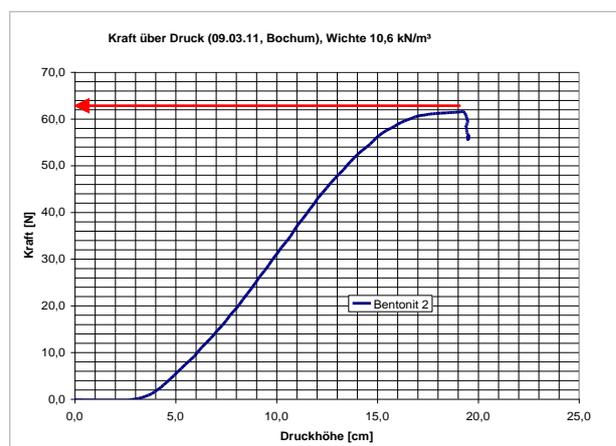
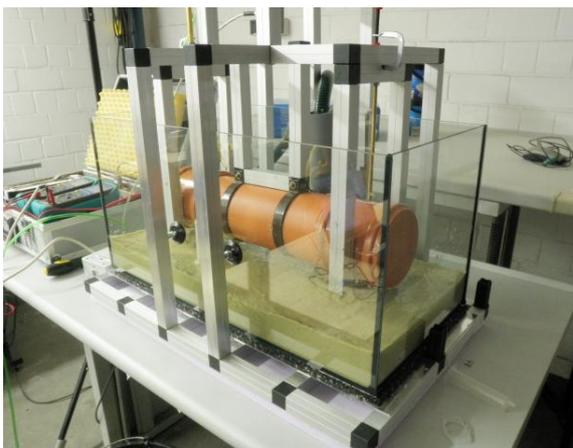


BILD 97: LABORVERSUCHE ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON BENTONITSUSPENSIONEN

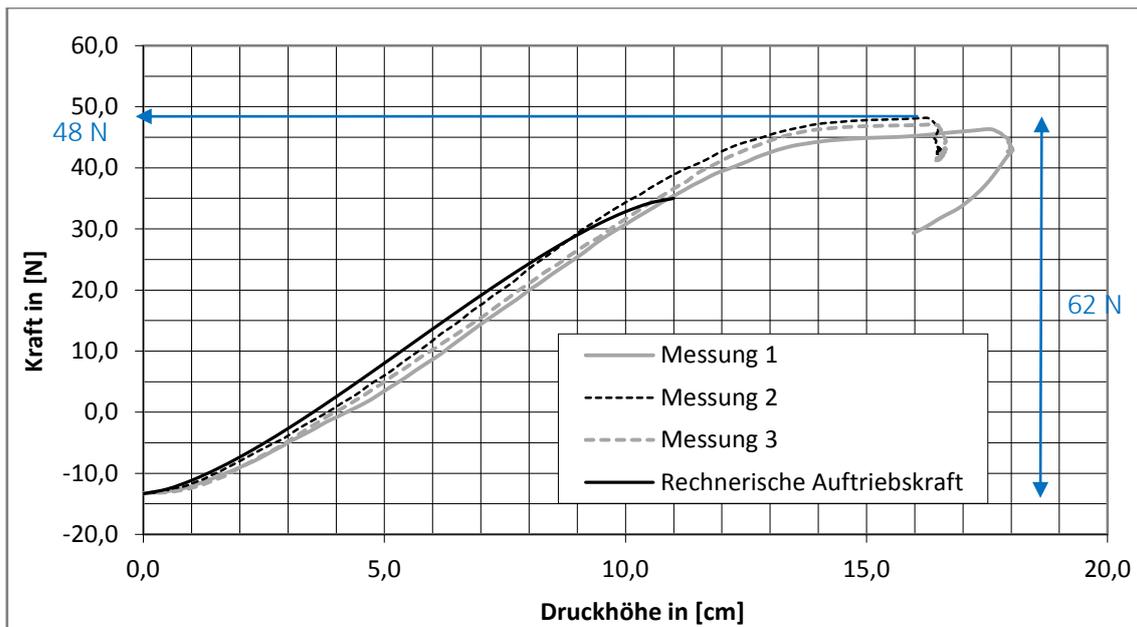


BILD 98: AUFTRIEBSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DRUCKHÖHE (BENTONITSUSPENSION)

Nachfolgend wird die effektive Auftriebskraft der Bentonitsuspension berechnet.

Rohr	-Länge	L_{Rohr}	=	0,48 m
	-Durchmesser	D_{Rohr}	=	0,11 m
	-Gewichtskraft	$F_{\text{EG-Rohr}}$	=	14,47 N
Suspensions	-Wichte	γ_{Sus}	=	10.595,00 N/m ³
	-Größtkorn	d_{max}	<	10 ⁻³ m
	-Fließgrenze	τ_f	=	41,00 N/m ²
Kornrohichte		γ_{Korn}	=	27.200,00 N/m ³
Gemessene Auftriebskraft		F_A	=	62,00 N

Zunächst wird das Raumgewicht des Rohres ermittelt und die Differenz zur Wichte der Suspension berechnet. Die Wichte des Fluids (Mehlkornsuspension) entspricht der Wichte der Suspension, da keine größeren Zuschläge vorhanden sind, wird $\gamma_{\text{Fluid}} = 10,6 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt.

$$\gamma_{\text{Rohr}} = \frac{14,47}{0,48 \cdot \frac{0,11^2}{4} \cdot \pi} = 3.172,14 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_{\text{Rohr}} = 3.172,14 - 10.595,00 = -7.422,86 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Der Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Mindest-Fließgrenze erfolgt in Anlehnung an Saak *et al.* (2001). Da das Größtkorn der verwendeten Bentonitsuspension kleiner als 0,1 mm ist, kann ohne Weiteres vorausgesetzt werden, dass die Suspension stabil ist.

$$\tau_{0,\text{min}} \geq \frac{4}{3} \cdot \Delta\gamma_{\text{Korn}} \cdot \tau_{\text{Korn}}$$

$$\tau_{0,min} = \frac{4}{3} \cdot 27.200,00 - 10.595,00 \cdot \frac{0,0001}{2} = 1,11 \frac{N}{m^2}$$

Hieraus ergibt sich die wirksame Fließgrenze der Suspension:

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} = 41,00 - 1,11 = 39,89 \frac{N}{m^2}$$

Die effektive Auftriebskraft ergibt sich gemäß Gl. 6.5 damit zu:

$$f_{A,eff} = f_{A,stat} + f_{A,\Delta\tau_f} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \Delta\tau_f$$

$$f_{A,eff} = \frac{0,11^2}{4} \cdot \pi \cdot -7.422,86 - 6 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot \pi \cdot 39,89$$

$$f_{A,eff} = -70,54 - 41,35 = -111,89 \frac{N}{m}$$

$$F_{A,eff} = f_{A,eff} \cdot L_{Rohr}$$

$$F_{A,eff} = -70,54 - 41,35 \cdot 0,48 = -33,86 - 19,85 = 53,71 N$$

Die errechnete effektive Auftriebskraft von ca. $F_{A,eff} = 54 N$ liegt etwa 13% über der tatsächlich gemessenen Kraft von 48 N. Insgesamt ist die gemessene Auftriebskraft mit ca. 48 N etwa 30% größer als der rechnerische statische Auftrieb von 33,86 N, ermittelt nach dem Archimedischen Prinzip.

6.1.4.3 Auftriebswirkung von RSS®-Flüssigboden

Gemäß dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau wurden Laborversuche zur Auftriebswirkung in einem RSS®-Flüssigboden durchgeführt.

Die Auftriebswirkung von RSS®-Flüssigboden ist anhand der gemessenen sowie errechneten Daten in Bild 99 und Bild 100 aufgeführt.

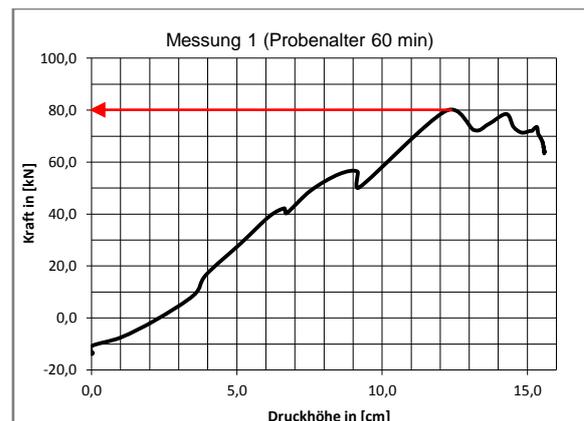


BILD 99: LABORVERSUCHE ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON FLÜSSIGBODEN

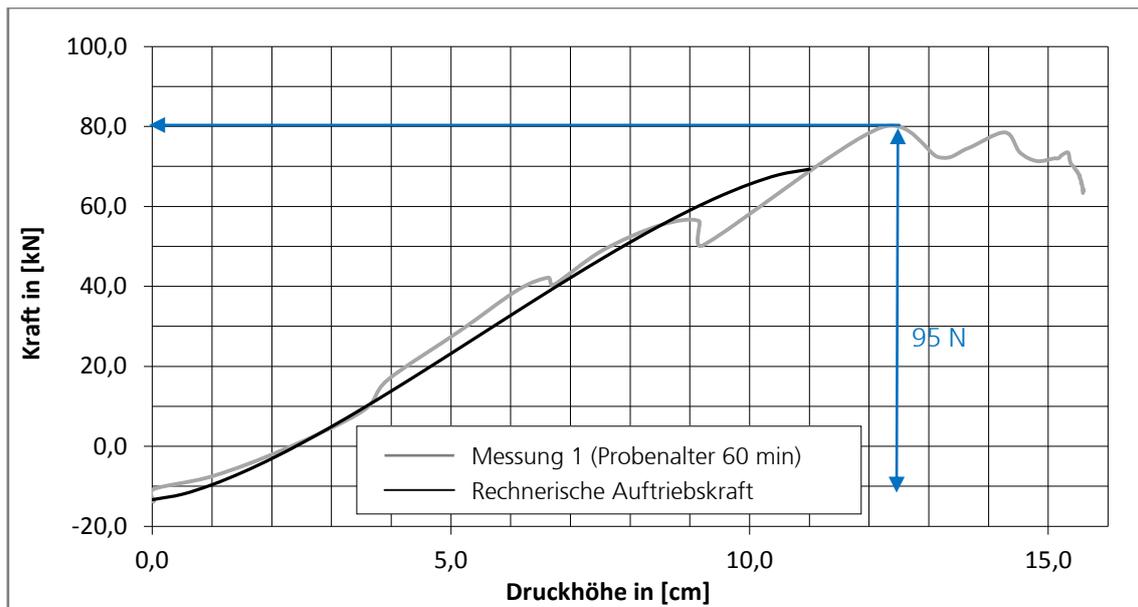


BILD 100: AUFTRIEBSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DRUCKHÖHE (RSS[®]-FLÜSSIGBODEN)

Nachfolgend wird die effektive Auftriebskraft des RSS[®]-Flüssigbodens berechnet.

Rohr	-Länge	L_{Rohr}	=	0,48 m
	-Durchmesser	D_{Rohr}	=	0,11 m
	-Gewichtskraft	$F_{\text{EG-Rohr}}$	=	14,47 N
Suspensions	-Wichte	γ_{Sus}	=	18.640,00 N/m ³
	-Größtkorn	d_{max}	<	0,0225 m
	-Fließgrenze	τ_f	=	209,2 N/m ²
Kornrohichte		γ_{Korn}	=	27.200,00 N/m ³
Gemessene Auftriebskraft		F_A	=	95,00 N (80,0 N + 15 N)

Zunächst wird das Raumgewicht des Rohres ermittelt und die Differenz zur Wichte der tragenden Mehlkorn-Suspension berechnet. Die Wichte des Fluids (Mehlkornsuspension) wird aufgrund des hohen Anteils an Zuschlägen mit Korndurchmessern unter 0,063 mm mit $\gamma_{\text{Fluid}} = 12,0 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt.

$$\gamma_{\text{Rohr}} = \frac{14,47}{0,48 \cdot \frac{0,11^2}{4} \cdot \pi} = 3.172,14 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta\gamma_{\text{Rohr}} = 3.172,14 - 18.640 = -15.467,86 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Der Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Mindest-Fließgrenze erfolgt in Anlehnung an *Saak et al. (2001)*.

$$\tau_{0,\text{min}} \geq \frac{4}{3} \cdot \Delta\gamma_{\text{Korn}} \cdot r_{\text{Korn}}$$

Das Größtkorn der für die kleinmaßstäblichen Versuche verwendeten RSS[®]-Suspension hat einen Durchmesser von ca. 20 mm, hieraus errechnet sich die minimale Fließgrenze für eine stabile Suspension.

$$\tau_{0,min} \geq \frac{4}{3} \cdot 27.200,00 - 12.000,00 \cdot \frac{0,02}{2} = 202,67 \frac{N}{m^2}$$

Die minimale Fließgrenze liegt über der gemessenen Fließgrenze, somit kann davon ausgegangen werden, dass die Suspension nicht stabil ist. Für die Bemessung des Auftriebs wird aufgrund der Sedimentationsneigung also nicht die volle Wichte der Suspension angesetzt.

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} = 209,20 - 202,67 = 6,53 \frac{N}{mm^2}$$

Die effektive Auftriebskraft ergibt sich gemäß Gl. 6.5 damit zu:

$$f_{A,eff} = f_{A,stat} + f_{A,\Delta\tau_f} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \Delta\tau_f$$

$$f_{A,eff} = \frac{0,11^2}{4} \cdot \pi \cdot -15.467,86 - 6 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot \pi \cdot (6,53)$$

$$f_{A,eff} = -147,00 - 6,77 = -153,77 \frac{N}{m}$$

$$F_{A,eff} = f_{A,eff} \cdot L_{Rohr}$$

$$F_{A,eff} = -147,00 - 6,77 \cdot 0,48 = -70,56 - 3,24 = -73,81 N$$

Die errechnete effektive Auftriebskraft von ca. 74 N liegt etwa 8% unter der tatsächlich gemessenen Kraft – abzüglich des Eigengewichtes des Rohres – von ca. 95-14,47 = 80,53 N. Insgesamt ist die gemessene effektive Auftriebskraft mit rund 80 N etwa 12 % größer als der statische Auftrieb nach dem Archimedisches Prinzip (70,56 N).

6.1.5 Großmaßstäbliche Auftriebsversuche im Labor – RSS[®]-Flüssigboden

Im Rahmen eines Großversuchs wurde im Labor für Grundbau und Bodenmechanik der Hochschule Bochum – Prof. Dr.-Ing. M.-Th. Steinhoff die Auftriebswirkung auf ein Kanalrohr während der Verfüllung mit RSS[®]-Flüssigboden untersucht (Bild 101).



BILD 101: DRAUFSICHT VERSUCHSFELD

6.1.5.1 Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen stand eine mit Sand gefüllte Versuchsgrube (Länge x Breite x Tiefe = 3,0 x 3,0 m) zur Verfügung. Der Grundriss sowie Schnitt des Versuchsaufbaus sind in Bild 102 bzw. Bild 103 dargestellt.

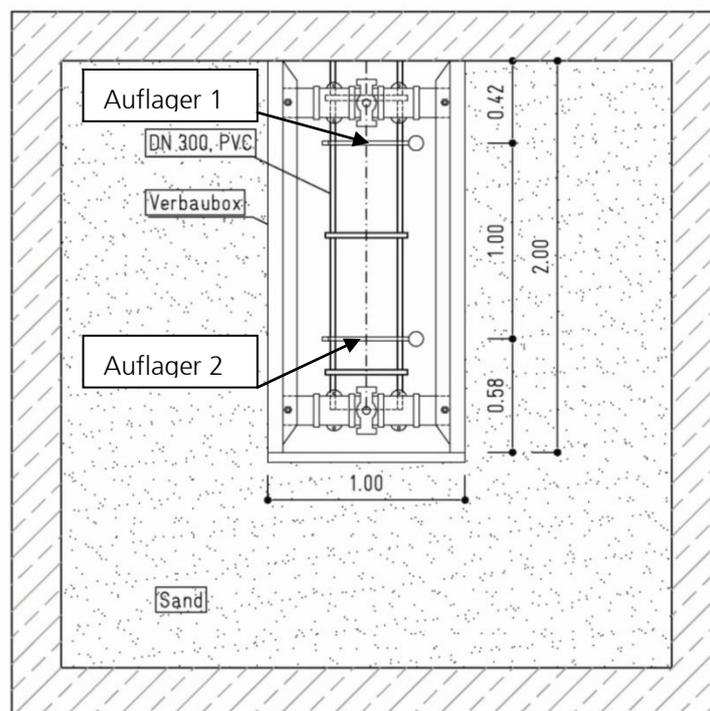


BILD 102: GRUNDRISS DES VERSUCHSAUFBAUS

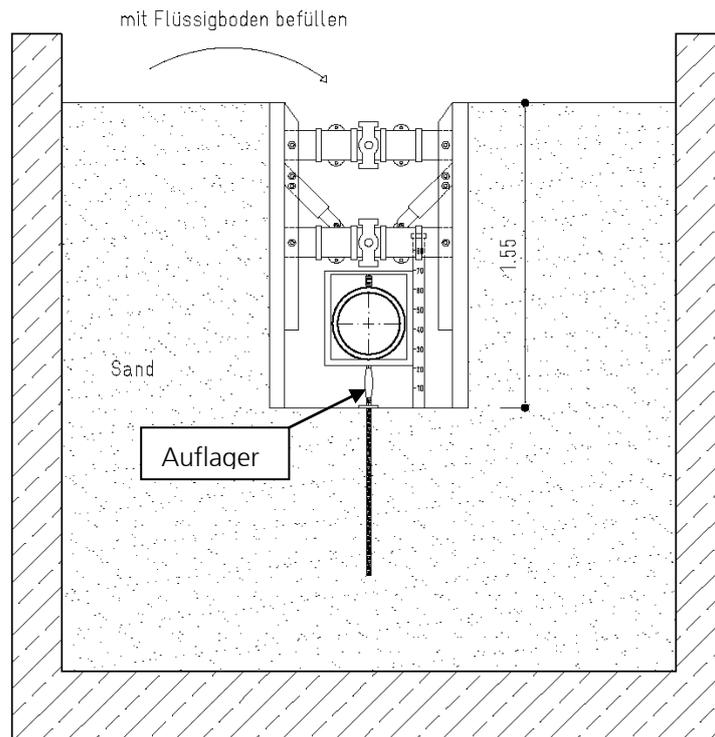


BILD 103: SCHNITT DES VERSUCHSAUFBAUS

Zur Vorbereitung der Versuche wurde der Sand bis zu einer Tiefe von ca. 2,0 m unterhalb der Gruben-Oberkante ausgehoben. Anschließend wurden zwei Schraubanker (Länge = 1,0 m) als Zugpfähle mittels Kraftschrauber in den Sand eingedreht (Bild 104). An den Pfahlköpfen wurden zwei Rohraufnahmen befestigt, die mit Kraftmessdosen ausgestattet waren, um im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführung die effektive Auftriebswirkung des Flüssigbodens auf das Rohr zu messen.

Für die Versuche wurde ein PE-Rohr (DN 315; Länge 178 cm) verwendet, das an beiden Enden mit Muffen-Stopfen verschlossen war (Bild 105). Das Kunststoffrohr wurde in die Rohraufnahmen gelegt und kraftschlüssig mit der Messeinrichtung verbunden. Das so fixierte Rohr wurde anschließend gegen seitliche Verschiebungen und gegen Auftrieb gesichert.



BILD 104: EINBRINGEN DER VERANKERUNG FÜR DIE ROHRAUFLAGER



BILD 105: ROHRAUFLAGER ZUR AUFTRIEBS- UND LAGESICHERUNG

Nach dem Rohreinbau wurde eine Verbaubox der Firma Emunds+Staudinger aus Hückelhoven in die Versuchsgrube eingehoben und über dem Rohr positioniert (Bild 106). Eine Stirnseite der Box (Länge x Breite x Tiefe = 2,0 x 0,8 x 1,55 m) befand sich unmittelbar an der Grubenwand, die gegenüberliegende Stirnseite wurde mittels einer Holztafel abgestellt.



BILD 106: VERBAUBOX IN DER VERSUCHSGRUBE

Als messtechnische Einrichtungen zur Überwachung des Versuchs wurden neben den beiden Kraftmessdosen (Bild 107) an den Rohraufnahmen noch zwei Staurohre zur Messung des Suspensionsspiegels während der Verfüllung des Rohrgrabens und dem Ziehen der Verbaubox installiert. Die Staurohre, die in den Bereichen der beiden Rohraufleger angeordnet waren, wurden mit Drucksensoren verbunden (Bild 108).



BILD 107: KRAFTMESSDOSE AM AUFLAGER



BILD 108: DRUCKDOSE (RECHTS HINTEN) UND LAGEMESSER (MITTIG AUF ROHR)

Nach der Installation der beschriebenen Messtechnik wurde die Versuchsgrube wieder mit Sand gefüllt.

Der RSS®-Flüssigboden wurde in einem Fahrmischer angeliefert (Bild 109). Die Verfüllung des Rohrgrabens erfolgte mit Hilfe einer Betonbombe (Bild 110) bis zur Oberkante der Verbaubox.



BILD 109: BEFÜLLEN DER BETONBOMBE AUS DEM FAHRMISCHER



BILD 110: VERFÜLLEN DES ROHRGRABENS MITTELS BETONBOMBE

Im Zuge des großmaßstäblichen Versuches wurden parallel Untersuchung mit dem baustellentauglichen Pendelgerät, beschrieben und erläutert in Kapitel 5.1, durchgeführt, um die Scherfestigkeit des fließfähigen Verfüllbaustoffes bestimmen zu können. Die ersten Messungen erfolgten ca. 30 Minuten nach dem Anmischen, also dem Zeitpunkt als das Material das Herstellwerk in Neuss verließ. Diese Messungen wurden vor Ort im Mischwerk durchgeführt. Die nächsten Messwerte wurden dann bei Eintreffen des Fahrmischers in Bochum ca. 90 Minuten später ermittelt. Während des Versuches wurden dann weitere Werte für die Fließgrenze ermittelt, bis schließlich der Versuch ca. 45 Minuten nach dem Eintreffen des Fahrmischers beendet wurde.

Die Ergebnisse dieser Messung der Fließgrenze sind in Bild 111 über dem absoluten Probenalter aufgetragen.

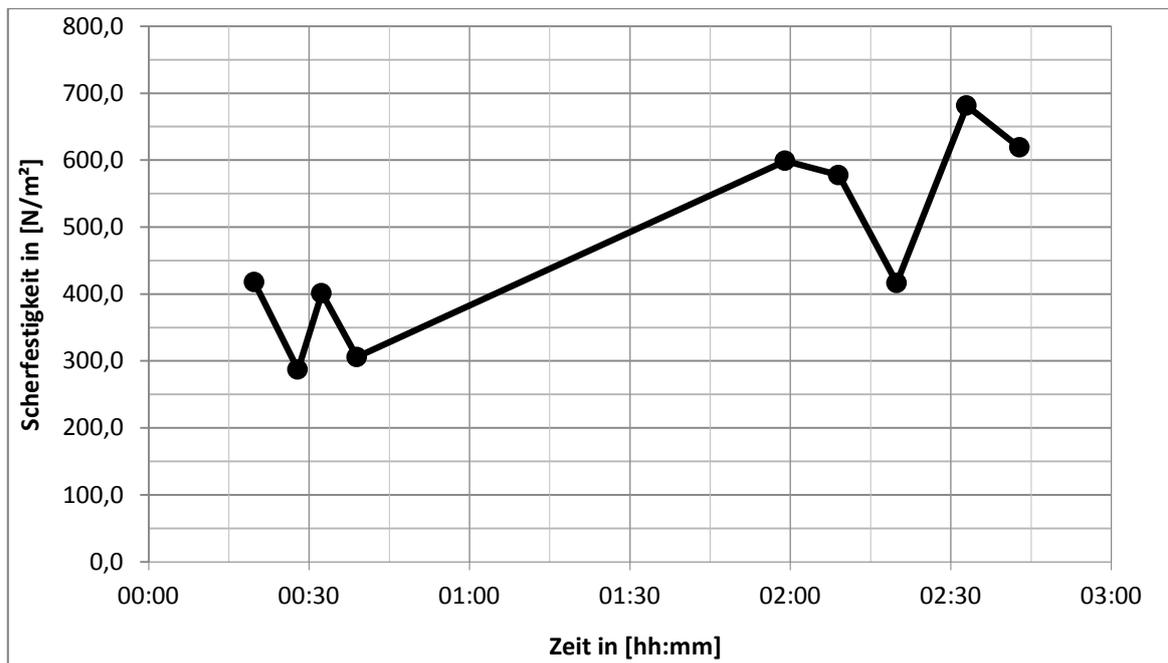


BILD 111: SCHERFESTIGKEITSENTWICKLUNG DES RSS®-FLÜSSIGBODENS - MESSUNG MITTELS PENDELGERÄT

Während im Rahmen von Laboruntersuchungen die Ergebnisse des Pendelgerätes durch einen gleichmäßig exponentiell ansteigenden Kurvenverlauf geprägt sind (Kapitel 5.1.3), unterliegt die Scherfestigkeitsentwicklung des Flüssigbodens beim großmaßstäblichen Versuch zum Teil starken Schwankungen.

Bei den Versuchen war festzustellen, dass der innere Zylinder des Pendelgerätes aufgrund der hohen Scherfestigkeit des Füllmaterials nicht mehr bei allen Messungen in der Lage war, den Flügel bzw. die Kugel des Pendelgerätes in der Suspension zu bewegen. Die gemessenen Scherfestigkeiten überschritten demnach teilweise den Messbereich des Vertikal-Pendelgerätes.

Die stark erhöhte Scherfestigkeit unmittelbar nach dem Anmischen im Herstellwerk erweist sich in diesem Fall als auffällig. Während der Laborversuche, für die ein Flüssigboden nach gleichem Rezept hergestellt wurde, zeigten sich nach 30 Minuten Werte in einem Bereich von 150 N/m². Werte um 300 N/m², wie sie im Rahmen des Großversuchs bereits nach 30 Minuten auftraten, wurden im Labor meist erst nach 1:30 bis 1:45 Stunden erreicht.

Der sensorische Vergleich zwischen den Flüssigbodenproben aus Labor und Großversuch zeigte, dass der Boden des Großversuchs eine geringere Fließfähigkeit sowie Homogenität besaß und vermehrt raue bzw. scharfkantige Zuschlagkörnungen enthielt. Diese Unterschiede in den Eigenschaften des eingesetzten Flüssigbodens könnten zu den Unstetigkeiten der Messergebnisse beigetragen haben.

Eine weitere Ursache für dieses Verhalten könnten ausgeprägt tixotrope Effekte sein, die in diesem Maß in den Laborversuchen allerdings nicht beobachtet werden konnten. Die Schwankungen in den Messergebnissen können an dieser Stelle nicht eindeutig geklärt werden. Da jedoch bei Fließgrenzen von über 600 N/m² das Material nicht mehr fließfähig ist, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass es sich hierbei tatsächlich um einen tixotropen Effekt oder eine beginnende Verfestigung des Materials infolge der Reaktionen des Bindemittels handelt, welches sich beim Einfüllvorgang teilweise zurückbildet. Hierfür spricht auch der auffallend abweichende Messwert von ca. 400 N/m², gemessen ca. 2:20 h

nach dem Anmischen. In diesem Zusammenhang ist die Methode des Durchmischens vor den Messungen kritisch zu hinterfragen.

Für die folgenden Betrachtungen wird von einer Fließgrenze von 400 N/m^2 während des Einfüllvorgangs ausgegangen.

Parallel zu den Messungen der Fließgrenze wurden Rückstellproben zur weiteren Untersuchung im Labor genommen (Bild 112).



BILD 112: ERHEBUNG RÜCKSTELLPROBEN FÜR MESSUNG DER FLIEßGRENZE IM LABOR

Unmittelbar im Anschluss an die flüssige Grabenverfüllung wurde die Verbaubox an den Portalkran der Versuchshalle angeschlagen (Bild 113) und langsam aus der Versuchsgrube gezogen (Bild 114).

Nach dem Ziehen des Verbaus zeigte sich ein erhebliches Absinken des Suspensionsspiegels im Rohrgraben. Im Bereich der oberen ca. 30 cm der ungesicherten Böschung rutschte der Sand in den Graben (Bild 115).



BILD 113: ANSCHLAGEN DER VERBAUBOX AM PORTALKRAN



BILD 114: ZIEHEN DER VERBAUBOX



BILD 115: GRABEN NACH ZIEHEN DES VERBAUS

6.1.5.2 Ergebnisse zur Auftriebsmessung

Nachfolgend werden die Ergebnisse des zuvor beschriebenen großmaßstäblichen Auftriebsversuches an der Hochschule Bochum veranschaulicht und erläutert.

In Bild 116 sind die Ergebnisse der Kraftmessung im Auflagerbereich dargestellt. Bei der Betrachtung der gemessenen Werte wird deutlich, dass die Kraftmessdose am Auflager 1 (Bild 102) im Vergleich zum Auflager 2 (Bild 102) eine bis zu 300 N höhere Auftriebsbelastung gemessen hat. Die Ursache hierfür liegt in der Vorgehensweise beim Verfüllen der Baugrube durch die Betonbombe. Der Einfüllvorgang mittels Betonbombe erfolgte nicht gleichmäßig über den Graben verteilt, sondern diskontinuierlich und bevorzugt im Bereich des Auflagers 1. Der Suspensionsspiegel stieg in diesem Bereich demnach schneller an und durch das behinderte Fließen des Materials hat sich der entstandene Druckunterschied offensichtlich nicht ausgleichen können.

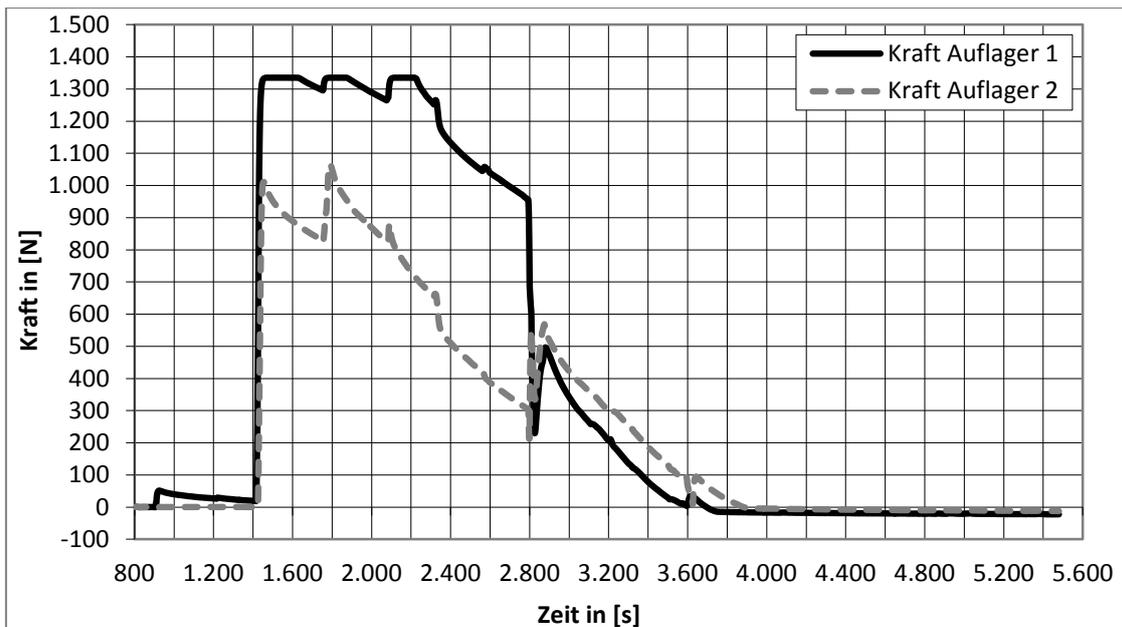


BILD 116: MESSERGEBNISSE DER KRAFTMESSDOSEN ÜBER DIE ZEIT (RSS[®]-FLÜSSIGBODEN)

Die Auftriebswirkung des RSS[®]-Flüssigbodens in Abhängigkeit von der Druckhöhe ist in Bild 117 dargestellt. In diesem Diagramm sind Werte beider Kraftmessdosen sowie deren Summenwert über die gemessene Druckhöhe im Rohrgraben aufgetragen. Im Gegensatz zu den kleinmaßstäblichen Versuchen (vgl. Kapitel 6.1.4) wurde die Gewichtskraft des Rohres zu Versuchsbeginn tariert, so dass sich die Kraftmessung mit Ausnahme von leichten Schwankungen zu Versuchsbeginn in einem ausschließlich positiven Bereich bewegt.

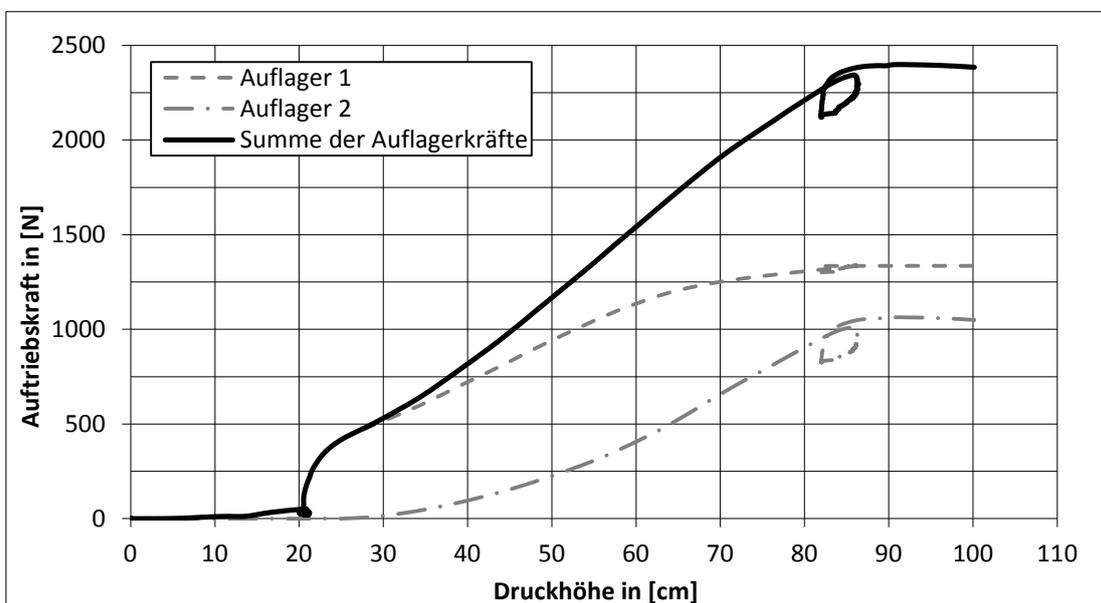


BILD 117: AUFTRIEBSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DRUCKHÖHE (RSS[®]-FLÜSSIGBODEN)

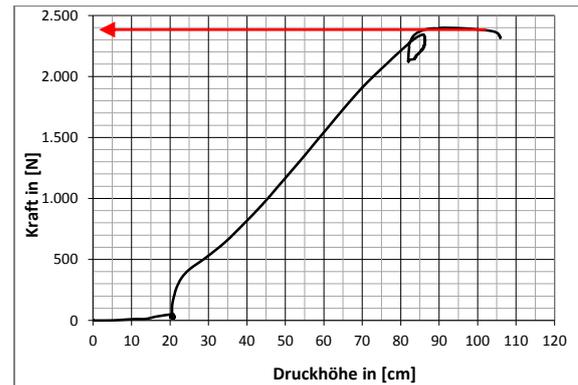


BILD 118: GROBMAßSTÄBLICHER LABORVERSUCH ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON FLÜSSIGBODEN

Die rechnerische Auftriebskraft lässt sich unter Berücksichtigung der zuvor erwähnten Rahmenbedingungen gemäß den nachfolgenden Gleichungen ermitteln.

Rohr	-Länge	L_{Rohr}	=	1,78 m
	-Durchmesser	D_{Rohr}	=	0,315 m
	-Gewichtskraft	$F_{\text{EG-Rohr}}$	=	284 N
Suspensions	-Wichte	γ_{Sus}	=	18.500,00 N/m ³
	-Größtkorn	d_{max}	<	0,0315 m
	-Fließgrenze	τ_f	=	400 N/m ²
Kornrohichte		γ_{Korn}	=	27.200,00 N/m ³
Gemessene Auftriebskraft		F_A	=	1.325 + 1.080 = 2.405 N

Zunächst wird das Raumgewicht des Rohres ermittelt und die Differenz zur Wichte der Suspension berechnet.

$$\gamma_{\text{Rohr}} = \frac{284}{1,78 \cdot \frac{0,315^2}{4} \cdot \pi} = 2.047,33 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta\gamma_{\text{Rohr}} = 2.047,33 - 18.500,00 = -16.452,67 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Der Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Mindest-Fließgrenze erfolgt in Anlehnung an *Saak et al. (2001)*.

$$\tau_{0,\text{min}} \geq \frac{4}{3} \cdot \Delta\gamma_{\text{Korn}} \cdot r_{\text{Korn}}$$

Das Größtkorn der verwendeten RSS[®]-Suspension ist 31,5 mm groß, hieraus errechnet sich die minimale Fließgrenze für eine stabile Suspension.

$$\tau_{0,\text{min}} = \frac{4}{3} \cdot 27.200,00 - 12.000,00 \cdot \frac{0,0315}{2} = 319,20 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Die auftriebswirksame Fließgrenze entspricht der Differenz von gemessener Fließgrenze und Mindest-fließgrenze der stabilen Suspension.

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} = 400 - 319,20 = 80,80 \frac{N}{m^2}$$

Die effektive Auftriebskraft ergibt sich gemäß Gl. 6.5 damit zu:

$$f_{A_eff} = f_{A_stat} + f_{A_Delta\tau_f} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \Delta\tau_f$$

$$f_{A_eff} = \frac{0,315^2}{4} \cdot \pi \cdot -16.452,67 - 6 \cdot \frac{0,315}{2} \cdot \pi \cdot (80,80)$$

$$f_{A_eff} = -1.282,18 - 239,88 = -1.522,06 \frac{N}{m}$$

$$F_{A_eff} = f_{A_eff} \cdot L_{Rohr}$$

$$F_{A_eff} = -1.282,18 - 239,88 \cdot 1,78 = -2.282,28 - 426,99 = -2.709,27 N$$

Die errechnete effektive Auftriebskraft von ca. 2.709 N liegt etwa 13% über der Summe der tatsächlich gemessenen Auflagerkräfte von $1.325 + 1.080 = 2.405$ N. Aus der Berechnung ergeben sich gleichmäßige Auflagerkräfte von $2.709 \cdot \frac{1}{2} = 1.355$ N. Dieser Wert liegt ca. 2 % über dem gemessenen Maximalwert der Auflagerkraft von 1.325 N. Der statische Auftrieb nach dem Archimedisches Prinzip ergibt gleichmäßige Auflagerkräfte von 1.141 N und damit einen im Vergleich zur gemessenen Kraft um ca. 14% geringeren Wert.

7 Kanalbaumaßnahme an der Schluchtstraße in Wuppertal – Praxis-Versuche

7.1 Einleitung

Die WSW Energie & Wasser AG (Wuppertal) ermöglichte die Praxiserprobung der zuvor beschriebenen Messmethoden und Berechnungsansätze im Rahmen einer Kanalbaumaßnahme die zwischen März und Juni 2011 in der Schluchtstraße in Wuppertal durchgeführt wurde.

Bei der Baumaßnahme handelte es sich um eine Kanalerneuerung in offener Bauweise. Die gesamte Maßnahme umfasste die Erneuerung von 40 m Schmutzwasserkanal, dessen Graben in konventioneller Bauweise wiederhergestellt wurde, sowie einen 54 m langen und parallel zur Schmutzwasserhaltung verlaufenden Regenwasserkanal, bei welchem eine Rückverfüllung mit fließfähigem Verfüllbaustoff vorgesehen war. Das Bauvorhaben lag innerstädtisch im Bereich einer zu Schulzeiten hochfrequentierten Anliegerstraße. Der neue Regenwasserkanal DN 300 wurde jeweils mit 3 m langen Stahlbetonrohren ausgeführt. Die Tiefenlage der Haltung bewegte sich zwischen 2,3 m und 2,7 m unter Geländeoberkante (GOK). Das Haltungsgefälle lag bei ca. 8,7%, was in etwa auch der Neigung des Geländes entsprach.

Mit der Lieferung des Verfüllmaterials wurden voneinander unabhängige Baustoffhersteller beauftragt, um mögliche materialspezifische Eigenschaften der jeweiligen Baustoffe direkt vergleichen zu können. Als Lieferanten wurden die Firmen CEMEX Deutschland AG (Düsseldorf), ENREBA Neuss GmbH (Neuss) und TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG (Sprockhövel) mit der Lieferung von je ca. 30 bis 40 m³ fließfähigem Verfüllbaustoff pro Arbeitstag beauftragt. CEMEX Deutschland AG lieferte am 18.04.11 und 19.04.11, ENREBA Neuss GmbH am 20.04.11 und 21.04.11 sowie TER Transport Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG am 02.05.11 und 04.05.11. Eine Vermischung der unterschiedlichen Materialien wurde ausgeschlossen. Die Witterungsbedingungen waren zu diesen Zeitpunkten ideal und weitgehend gleichwertig.

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms wurden vorab folgende Aspekte festgelegt:

- Anpassung des Bauablaufes an die Baustellenbedingungen
- Test von Schraubankern zur Auftriebssicherung
- Auflagerung des Rohres
- Verbau und Querabschottung
- Überprüfung der Praxistauglichkeit des Flügelpendels
- Messung der Fließgrenze mit dem Flügelpendel
- Lastplattendruckversuch
- Zylinderdruckfestigkeit 28 Tage, 90 Tage

7.2 Anpassung des Bauablaufes an die Baustellenbedingungen

Der Bauablauf bei der Anwendung fließfähiger Verfüllbaustoffe im Kanalbau bedarf gegenüber der konventionellen Bauweise einiger Anpassungen. Im Rahmen der Baumaßnahme in der Schluchtstraße wurden die Auswirkungen auf den Bauablauf näher untersucht.

Die Arbeiten zur Herstellung der Kanalgräben wurden rückschreitend von der Stirnseite der Gräben (Bild 119) ausgeführt. Bodenaushub und Verbau erfolgten abschnittsweise jeweils für eine Rohrlänge von 3 m. Pro Tag wurden zwischen 9 m und 12 m Kanal verlegt, wobei die Rückverfüllung des arbeits-täglich hergestellten Grabenabschnittes und das Ziehen des Verbau jeweils kurz vor Arbeitseende erfolgten, so dass am nächsten Arbeitstag mit dem Aushub des folgenden Grabenabschnittes begonnen werden konnte.



BILD 119: GRABENAUSHUB VOR KOPF BEI VORÜBERGEHEND STANDFESTEN BODENVERHÄLTNISSEN

Für die Sicherung der Kanalgräben wurden Plattenverbausysteme mit einer lichten Breite von 1,30 m, einer Länge von 4 m und einer Höhe von 3 m eingesetzt. Die Grabensohle lag oberhalb des Grundwasserhorizontes, wodurch kein Grundwasserzutritt in den Graben zu erwarten war. Zudem waren die Witterungsverhältnisse mit ca. 20° C ohne Niederschlagsereignisse ideal, da hierdurch ebenfalls kein Zufluss von Schichten- oder Kluftwasser erfolgte.

Die Schichtenfolge entlang der alten Kanalgrabentrasse wurde vorab erkundet. Die Frost- und Trag-schicht reichte grundsätzlich bis in eine Tiefe von 0,5 m bis 0,6 m unter Geländeoberkante, bestehend aus Beton- und Schlackematerialien. In den tieferen Lagen stehen die ursprünglichen Auffüllungen des Kanalgrabens in Form rückverfüllter Böden, vorwiegend aus steinigem Lehm und stärker verwittertem Tonstein an. In Tiefen von ca. 2,5 bis 3,5 m wurden in Übereinstimmung mit der größten Kanaltiefe die gewachsenen Schichten erreicht. Hier stand ein schwach verlehmt, stückiges Sandsteinmaterial an, in dem die Rammkernsondierungen und überwiegend auch die Rammsondierungen nach kurzer Eindringtiefe aufgrund der hohen Rammwiderstände abgebrochen werden mussten. Die Auffüllung des alten Kanalgrabens erwies sich als vorübergehend standsicher, so dass die Grabenverbaugeräte nach dem Einstellverfahren im Anschluss an den Aushub eingebracht werden konnten.

Der Bauablauf erfolgte in der nachstehenden Reihenfolge:

1. Aushub einer Verbaugerätelänge
2. Einbau des Grabenverbaugerätes und Verspannen der Verbausteifen
3. Einbau des Zugankers für das entsprechende Rohr
4. Herstellung des Auflagers

5. Einbau und Fixierung des Rohres
6. Aushub der nächsten Verbaugerätelänge, Verlegung des nächsten Rohres
7. Verschluss der Rohrleitung nach der Verlegung der Rohrleitung gemäß eines Tagespensums
8. Einbau einer Querabschottung
9. Verspannung der Querabschottung gegen den Boden
10. Rückverfüllung mit Flüssigboden
11. Ziehen der Verbaugeräte
12. Ziehen der Querabschottung am folgenden Tag

Die Lieferung der fließfähigen Verfüllbaustoffe fand in Abstimmung mit den entsprechenden Herstellern statt. Gemäß Herstellerangaben werden für größere Liefermengen in der Regel Vorlaufzeiten von 2 bis 3 Tagen benötigt, um die erforderliche Anzahl an Transportfahrzeugen zum gewünschten Zeitpunkt zur Verfügung stellen zu können.

Die jeweiligen Lieferungen erfolgten planmäßig bedarfssynchron, um einen Stillstand der Baustelle aufgrund von Wartezeiten zu vermeiden und die Verbaugeräte zum optimalen Zeitpunkt ziehen zu können. Zu große Transportdistanzen können dazu führen, dass sich Material aufgrund der hydraulischen Bindemittel schon im Fahrmischer verfestigt. Daher sind die Randbedingungen zur Belieferung der Baustelle immer mit dem Hersteller abzustimmen.

7.3 Verbau

7.3.1 Grabensicherung

Die Verbauelemente der Grabensicherung werden nach der Kanalverlegung unmittelbar im Anschluss an die Verfüllung des Grabens gezogen, also zu einem Zeitpunkt, in dem der Verfüllbaustoff noch fließfähig ist. Verbauspur und Hohlräume können in diesem Zustand von dem Material vollständig gefüllt werden.

Generell sollte der Rückbauzustand des Grabens durch eine statische Berechnung nachgewiesen werden. Im betrachteten Fall war der Boden vorübergehend standsicher. Das Ziehen der Verbauelemente konnte somit auch bei Absinken des Suspensionsspiegels bis 50 cm unter die Geländeoberkante ohne Gefährdung der Standsicherheit der Grabenwände erfolgen.

Das Absinken des Suspensionsniveaus im Graben ist während des Rückbaus der Verbauelemente zu überwachen. Sofern der Flüssigkeitsspiegel unter den festgelegten Grenzwert absinkt, ist das fehlende Volumen mit Material aus dem Fahrmischer aufzufüllen (Bild 120). Bei der Ermittlung der erforderlichen Bestellmenge ist dieser Effekt zu berücksichtigen und der Fahrmischer ist ausreichend lange auf der Baustelle vorzuhalten. Sollte für ein Auffüllen aus dem der Fahrmischer der LKW an den offenen Graben heranfahren, sind hierfür Mindestabstände einzuhalten, die zuvor in der Statik des Rückbauzustandes festzulegen sind.



BILD 120: AUFFÜLLEN DES SUSPENSIONSVERLUSTES BEIM ZIEHEN DER VERBAUGERÄTE

7.3.2 Querabschottung

Die Querabschottung im Kanalgraben dient der Unterteilung in Arbeitsabschnitte. Die Abtrennung sollte so beschaffen sein, dass am Folgetag ein unproblematischer Anschluss an den bereits verlegten Rohrabschnitt möglich ist. Zudem muss das Eindringen des Verfüllbaustoffes in die Rohrleitung ausgeschlossen sein.

Bei der Baumaßnahme in der Schluchtstraße wurde die Rohrleitung zunächst mit einem Kunststoffstutzen und einer Metallplatte verschlossen. Die Abtrennung zum nächsten Arbeitsabschnitt erfolgte mit Hilfe einer Stahlplatte, die vor der verschlossenen Rohrleitung platziert wurde. Hierfür wurde mit Stahltafeln als zusätzlicher Grabensicherung zunächst ein Angleichen der Verbaulänge an die Rohrleitungslänge durchgeführt (Bild 121).



BILD 121: GRABENVERBAU MIT STAHLPLATTEN ALS LÄNGENAUSGLEICH UND QUERSCHOTT VOR KOPF (LINKS) UND ROHRLEITUNG MIT VERSCHLUSS UND QUERSCHOTT (RECHTS)

Die abschließende Stahlplatte wurde gegen die Stirnseite der Verbaubox abgestützt. Der Bereich hinter der Verfüllungszone wurde mit Kies aufgefüllt, der am folgenden Tag leicht zu entfernen war. Nach dem Ziehen des Verbaus verblieb die Stahlplatte zunächst im Boden und wurde erst nach dem Erhärten des Materials am nächsten Tag entfernt (Bild 122).

Alle eingesetzten Verfüllmaterialien entwickelten über Nacht eine ausreichende Festigkeit, um am folgenden Tag den Anschluss des folgenden Rohres ohne Nachbruch zu ermöglichen. In Bild 122 (rechts) ist der Anschluss des Rohres am Folgetag der Verlegung dargestellt.



BILD 122: QUERSCHOTT MIT SAND-/KIESHINTERFÜLLUNG (LINKS), ANSCHLUSS AN FOLGEROHR (RECHTS)

Die Anbindung des Haltungsanfangs an den bestehenden Schacht musste ohne Querschott errichtet werden, da Arbeiten in der Schachtbaugrube den Einsatz von Stahlplatte behinderten. Zur Herstellung des Anschlusses wurde dieser Kanalabschnitt mit einer Länge von 4 m konventionell verlegt und verfüllt (Bild 123).

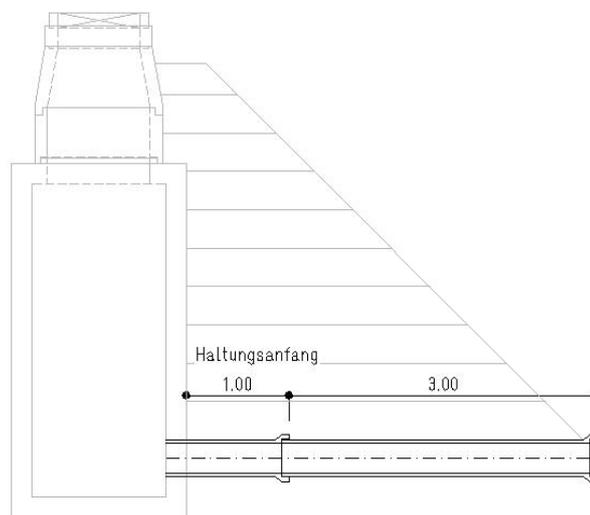


BILD 123: KONVENTIONELLE VERFÜLLUNG AM HALTUNGSANFANG EINER KANALLEITUNG

7.4 Messung der Suspensionsparameter auf der Baustelle

7.4.1 Messung der Wichte

Die Wichte der gelieferten Suspensionen werden durch Wiegen des Probengefäßes bei einem Füllvolumen von jeweils 2.000 cm³ ermittelt.

Aus dieser Wiegung ergeben sich die folgenden Suspensionswichten:

TABELLE 3: SUSPENSIONSWICHTEN DER VERWENDETEN VERFÜLLBAUSTOFFE

	Füma Boden (CEMEX)	RSS®-Flüssigboden (ENREBA)	fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER)
γ_{Sus} [kN/m ³]	19,3	21,7	19,8

7.4.2 Messung der Fließgrenze

Im Zuge der Begleitung der Baustelle „Schluchtstraße“ in Wuppertal wurden mit den Materialien der drei in Kapitel 7.1 aufgeführten Herstellerfirmen Messungen der Suspensionsparameter, insbesondere Messungen der Fließgrenze, mit dem Vertikal-Pendelgerät durchgeführt. Pro Versuchstag erfolgten jeweils zwei Lieferungen frischer Suspension und entsprechende Messungen bei unterschiedlichem Probenalter. Das Pendelgerät entspricht der in Kapitel 5.1 beschriebenen Ausführung (Bild 124). Eine detaillierte Anleitung zur Durchführung der Messungen enthält Kapitel 8.



BILD 124: FLÜGELPENDEL IM BAUSTELLENEINSATZ

Bei den Materialien der Firmen ENREBA Neuss GmbH und TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG zeigen die Messwerte den bereits im Labor beobachteten charakteristischen Kurvenverlauf. Die durch die Waage gemessene effektive Gewichtskraft des Probenbehälters nimmt bis zum Erreichen der Fließgrenze ab und steigt mit einsetzender Vertikalbewegung des Pendels wieder an. Dieser Vorgang wiederholt sich. Der Maximalwert stellte sich innerhalb der Messung in der Regel kurz vor Ende des

Versuchs ein. Bei dem Material der Firma CEMEX Deutschland AG ist dieser Effekt wesentlich weniger stark ausgeprägt. Die angezeigte Massendifferenz stieg stetig an, ohne einen Abfall der Messwerte infolge von Fließbewegungen erkennen zu lassen. Dieses Verhalten ist also materialspezifisch und kann somit zur Charakterisierung der einzelnen Baustoffe beitragen.

Mit Hilfe der maximalen Grammzahlen wurden die Messdaten in die Scherfestigkeitswerte umgerechnet und in einem Diagramm (Bild 125) über das Probenalter aufgetragen.

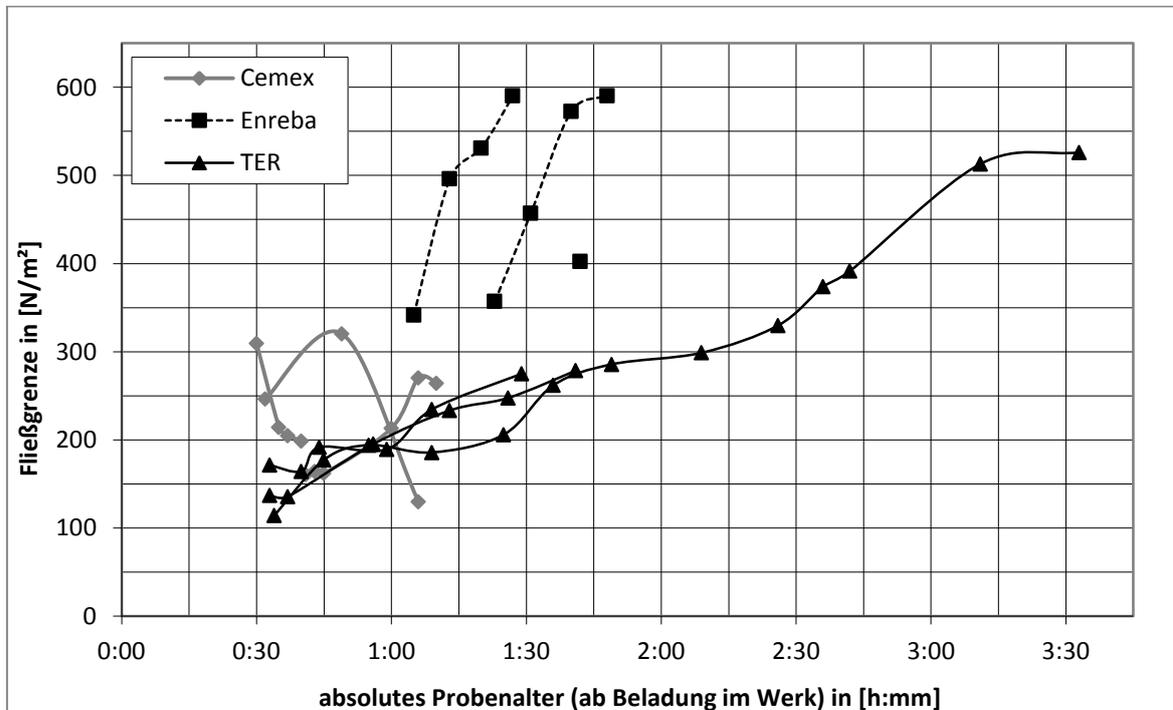


BILD 125: MESSUNG DER SCHERFESTIGKEIT MIT DEM FLÜGELPENDEL UNTER VERWENDUNG VERSCHIEDENER MATERIALIEN

Die verschiedenen Materialien zeigen ebenfalls Unterschiede bezüglich der Entwicklung der Scherfestigkeit über die Zeit. Als Trend lässt sich erkennen, dass die Materialien mit normierten Zuschlägen, dies ist bei den Verfüllstoffen der Firmen CEMEX Deutschland AG und TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG gegeben, eine vergleichbare Größenordnung der Fließgrenze aufweisen, während die Fließgrenze bei Materialien mit Boden als Zuschlagsstoff (vgl. Baustoff der Firma ENREBA Neuss GmbH) einen wesentlich höheren Startwert zeigen.

Das Verhalten entspricht den Erwartungen, da die Scherfestigkeit τ_f mit zunehmendem Tongehalt überproportional ansteigt. Je mehr bindige Anteile der Zuschlagsstoff enthält, desto höher ist die Größenordnung der Scherfestigkeit. Zudem zeigte sich beim Vergleich der einzelnen Bindemittelwirkungen bereits im Zuge der Laborversuche eine weitere Erhöhung der Fließgrenze durch das zugesetzte Compound mit einem für modifizierte Bentonite typischen Verlauf.

Die Entwicklung der Scherfestigkeit über die Zeit wird maßgebend durch den Zementgehalt bestimmt. Bereits in den Laborversuchen zeigte sich, dass die Entwicklung der Scherfestigkeit des Verfüllbaustoffes einen für die Hydratation von Zement typischen Verlauf aufweist. Eine Verdopplung des Zementgehaltes bewirkte eine deutliche Veränderung der Festigkeitsentwicklung mit einem ausgeprägt exponentiellen Zuwachs. Ohne Zugabe von hydraulischem Bindemittel erfolgte keine maßgebende Zunahme der Scherfestigkeit über die Zeit. Die Entwicklung der Scherfestigkeit der frischen Suspension gibt allerdings keine Auskunft über die Endfestigkeit des Materials. Auch bei rascher Zunahme der Scherfestigkeit muss nicht davon ausgegangen werden, dass sich eine komplette Vernetzung der Strukturen des Gefüges einstellt, die zu erhöhter Endfestigkeit führt.

Das hydraulische Bindemittel bewirkt die Bindung des freien und des in den Poren gebundenen Wassers. Je höher der Feinkornanteil eines Materials ist, desto mehr Wasser ist in stabilen Poren gebunden. Innerhalb der Poren herrscht ein Porenwasserüberdruck, der sich nur sehr langsam über die Zeit abbaut. Um das gebundene Wasser rasch aus den Poren zu entfernen und die notwendige Tragfähigkeit zur Überbauung zu erreichen, wird ein hydraulisches Bindemittel zugesetzt. Je weniger Feinkornanteil ein Boden aufweist, desto zügiger verläuft die Entwässerung und desto weniger hydraulisches Bindemittel wird zur Bindung des Porenwassers benötigt.

7.4.3 Kornverteilung der Zuschlagstoffe

Die Kornverteilung der Zuschlagstoffe wird den Herstellerangaben (vgl. Anhang 5) entnommen. Entscheidend für die Beurteilung der Suspensionsstabilität sind zunächst der Durchmesser des Größtkorns und die Kornwichte. Für diese Werte machen die Lieferanten die nachfolgend aufgeführten Angaben.

TABELLE 4: PARAMETER DER ZUSCHLÄGE DER VERWENDETEN VERFÜLLBAUSTOFFE

	Füma Boden (CEMEX)	RSS®-Flüssigboden (ENREBA)	fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER)
d_{\max} [mm]	8	31,5	4
γ_{Korn} [kN/m ³]	26,60	27,20	26,60

7.5 Nachweis der Suspensionseigenschaften

7.5.1 Nachweis der Stabilität der Suspension

Die für den Nachweis der Stabilität einer Suspension erforderliche Mindestfließgrenze kann nach dem Ansatz von Saak *et al.* (2001) berechnet werden:

$$\tau_{0,\min} = \frac{4}{3} \cdot (\gamma_{\text{Korn}} - \gamma_{\text{Fluid}}) \cdot r_{\text{Korn}} \quad \text{vgl. Gl. 3.10}$$

mit

γ_{Korn}	= Wichte des Zuschlagkorns	in [kN/m ³]
γ_{Fluid}	= Wichte des Fluids (tragende Mehlkorn-Suspension)	in [kN/m ³]
r_{Korn}	= Radius des Zuschlagkorns	in [mm]

Für die untersuchten Materialien ergeben sich die Mindestfließgrenzen für die jeweiligen stabilen Suspensionen zu:

TABELLE 5: ERMITTLUNG DER MINDESTFLIEßGRENZE NACH DEM KRITERIUM DER SUSPENSIONSSTABILITÄT DER VERWENDE- TEN VERFÜLLBAUSTOFFE

	Füma Boden (CEMEX)	RSS®-Flüssigboden (ENREBA)	fließfähigem Bodener- satzmaterial (TER)
γ_{Korn} [kN/m ³]	26,60	27,20	26,60
γ_{Fluid} [kN/m ³]	11,0*	12,0*	11,0*
r_{Korn} [mm]	4	15,8	2
$\tau_{0,min}$ [N/m²]	83	319	42

* auf der Grundlage der Rezeptur geschätzter Wert

Alle auf die Baustelle gelieferten Suspensionen erfüllen demnach die Anforderung $\tau_f \geq \tau_{0,min}$ für den Nachweis der Suspensionsstabilität.

7.5.2 Ermittlung der effektiven Auftriebskraft

Die effektive Auftriebskraft, die auf das Betonrohr im Zustand der Grabenverfüllung einwirkt, beträgt:

$$f_{A,eff} = f_{A,stat} + f_{A,\Delta\tau_f} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot \Delta\tau_f \quad \text{vgl. Gl. 6.8}$$

Daraus folgt

$$f_{A,eff} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot \gamma_{Rohr} - \gamma_{Sus} - 6 \cdot \Delta\tau_f$$

Mit

$$\gamma_{Rohr} = \frac{2.170,00}{1,0 \cdot \frac{0,440^2}{4} \cdot \pi} = 14.271,33 \frac{N}{m^3}$$

und

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} \quad \text{vgl. Gl. 3.9}$$

Folgt:

$$f_{A,eff} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot 14.271,33 - \gamma_{Sus} - 6 \cdot (\tau_f - \tau_{0,min}) \quad \text{Gl. 7.1}$$

Die rechnerischen Werte der effektiven Auftriebskräfte der verwendeten Verfüllbaustoffe sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

TABELLE 6: EFFEKTIVE AUFTRIEBSKRÄFTE DER VERWENDETEN VERFÜLLBAUSTOFFE

	Füma Boden (CEMEX)	RSS®-Flüssigboden (ENREBA)	fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER)
γ_{Sus} [N/m ³]	19.300	21.700	19.800
τ_f [N/m ²]	200	340	170
$\tau_{0,min}$ [N/m ²]	83	319	42
$f_{A,eff}$ [N/m]	1.249	1.216	1.371

Für die Abtragung dieser Auftriebskraft ist bei einem Rohrdurchmesser von DN 300 und der vorhandenen Länge je Rohr von 3,0 m gemäß der nachstehenden Gleichung ein Anker der Länge $L = 1,0$ m mit einer effektiven Einbindelänge von ca. 80 cm und einer im Versuch ermittelten Tragkraft von ca. 6 kN pro Rohrabschnitt ausreichend (Bild 126):

$$F_{A,eff} = f_{A,eff} \cdot L \quad \text{Gl. 7.2}$$

Die rechnerische Belastung der Ankerpfähle ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

TABELLE 7: RECHNERISCHE BELASTUNG DER ANKERPFÄHLE

	Füma Boden (CEMEX)	RSS®-Flüssigboden (ENREBA)	fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER)
$F_{A,eff}$ [kN]	3,75	3,65	4,12

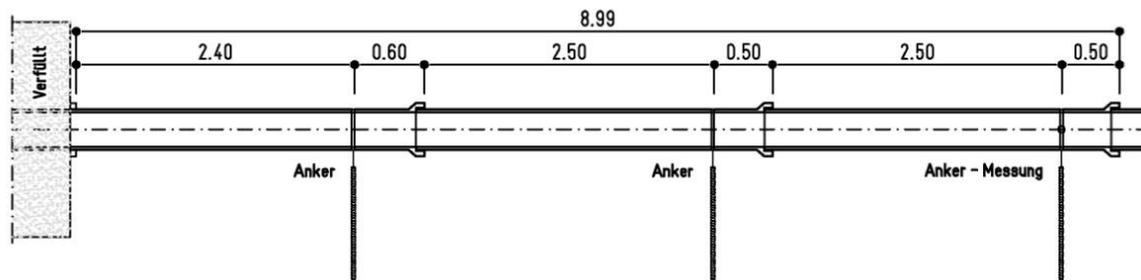


BILD 126: ANORDNUNG DER ANKERPFÄHLE ZUR AUFTRIEBSSICHERUNG

7.5.3 Nachweis des suspensionsgestützten Grabens

Der Nachweis der äußeren Standsicherheit des suspensionsgestützten Grabens erfolgt grundsätzlich nach DIN 4126 (vgl. Kap. 7.2). Für den Nachweis der inneren Standsicherheit wird eine Anpassung des Nachweisformats der DIN an die besonderen Eigenschaften fließfähiger Verfüllmaterialien vorgeschlagen (vgl. Kap. 7.8).

Der Nachweis gegen Herausbrechen einzelner Körner oder Bodenbereiche aus der Grabenwand sollte in Anlehnung an den Nachweis der Suspensionsstabilität von Frischbeton geführt werden (Bild 31). Hierbei ist wichtig, dass für den Nachweis die Wichte der Mehlkornsuspension betrachtet wird. Im

Schlitzwandbau entspricht die Wichte der Bentonitsuspension der Wichte der tragenden Mehlkornsuspension, wodurch eine Differenzierung nicht erforderlich wird. Für die Methode der flüssigen Grabenverfüllung ist diese Unterscheidung aber wesentlich für die Nachweisführung.

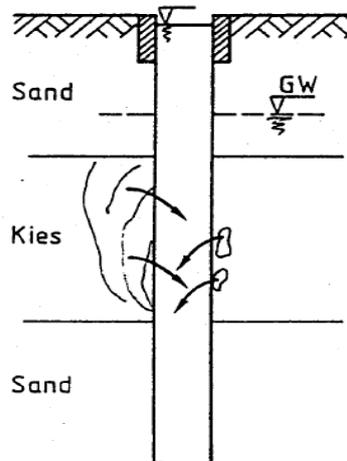


BILD 127: EINDRINGUNG DER SUSPENSION UND KRAFTÜBERTRAGUNG AUF DAS KORNGERÜST (WALZ, 1989)

Dieser Vorgang des Versinkens ist kongruent mit dem Absinken von Zuschlagkörnern in einer nicht stabilen Frischbetonsuspension, die ihrerseits mit Suspensionen vergleichbar ist, die für eine flüssige Grabenverfüllung üblicherweise im Kanalbau verwendet wird.

$$\tau_{f,min} \geq \Delta\gamma_{Korn} \cdot r_{Korn}$$

vgl. Gl. 3.16

$$\tau_{f,min} \geq (\gamma_{Korn} - \gamma_{Fluid}) \cdot r_{Korn}$$

mit

γ_{Korn}	= Wichte des Zuschlagskorns	in [kN/m ³]
γ_{Fluid}	= Wichte des Fluids (tragende Mehlkorn-Suspension)	in [kN/m ³]
r_{Korn}	= Radius des Zuschlagkorns	in [mm]

Für die untersuchten Materialien können Mindestfließgrenzen für den Nachweis der inneren Standsicherheit des suspensionsgestützten Grabens errechnet werden. Der anstehende Boden der Baustelle „Schluchtstraße“ hat ausreichend bindige Anteile, so dass er auch ohne Stützung vorübergehend standsicher und somit gegenüber einem Versagen im oben beschriebenen Sinne unempfindlich ist. Aus diesem Grund wird auf der Grundlage der gemessenen Fließgrenzen der Suspensionen das Größtkorn eines rolligen Bodens berechnet, für den der Nachweis noch erbracht werden könnte.

TABELLE 8: ERMITTLUNG DES GRÖßTKORNS EINES ROLLIGEN BODENS NACH DEM KRITERIUM DER INNEREN STANDSICHERHEIT DES SUSPENSIONSGESTÜTZTEN GRABENS

	Füma Boden (CEMEX)	RSS®-Flüssigboden (ENREBA)	fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER)
γ_{Korn} [kN/m ³]	26,60	27,20	26,60
γ_{Fluid} [kN/m ³]	11,0*	12,0*	11,0*
τ_f [N/m ²]	200	340	170
r_{Korn} [mm]	13	22	11

* auf der Grundlage der Rezeptur geschätzter Wert

Die Ergebnisse in Tabelle 8 zeigen, dass für den Fall grobkörniger Kiesböden, das Material RSS®-Flüssigboden gegenüber den Materialien mit normierten Zuschlägen die größere Sicherheit bietet.

7.6 Kraftmessung am Anker

Im Rahmen der messtechnischen Begleitung der Baustelle in der Schluchtstraße wurde die tatsächliche Auftriebswirkung von fließfähigen Verfüllmaterialien auf die Rohrleitung gemessen. Hierzu wurde einer der Zugpfähle der Auftriebssicherung mit einer Kraftmessdose (Bild 128) ausgestattet, um über die Ankerzugkraft die wirksame Auftriebskraft auf das Rohr zu ermitteln.



BILD 128: KRAFTMESSDOSE AM KOPF EINES ANKERPFAHLS

7.7 Ergebnisse der Auftriebsmessung

Die Messung der Auftriebskräfte auf das Betonrohr DN 300 während der Verfüllung des Kanalgrabens in der Schluchtstraße wurde am 02.05.2011 durchgeführt (Bild 129). An diesem Tag wurde das Verfüllmaterial der Firma TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG, Sprockhövel eingebaut.

Die Messung der Zugpfahlkräfte erfolgte durch eine Kraftmessdose, die zwischen Pfahlkopf und Ringmutter – die anschließend das Stahlband zur Befestigung des Rohres aufnimmt - installiert wurde.

Die am Kopf des Zugpfahls gemessene Kraft ist in Bild 130 über die Zeit der Messung aufgetragen.



BILD 129: BAUSTELLENVERSUCH ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON FLÜSSIGEM VERFÜLLMATERIAL

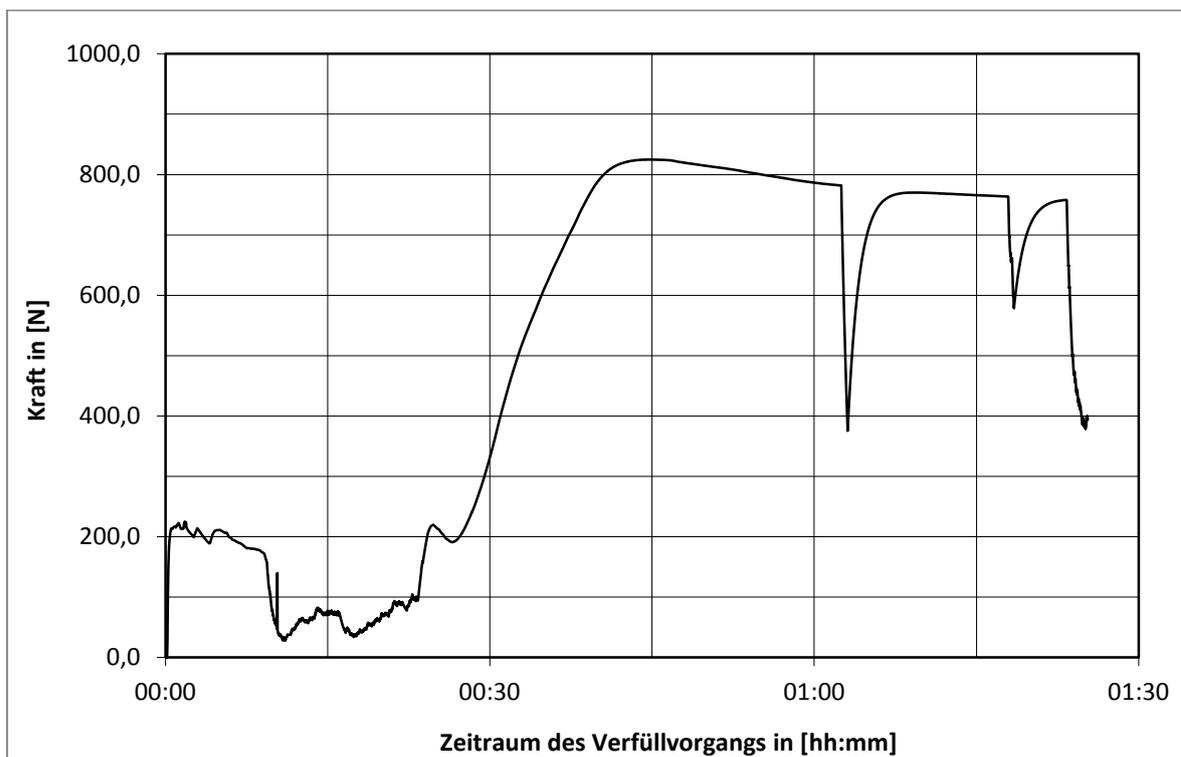


BILD 130: AUFTRIEBSWIRKUNG DER TER-SUSPENSION IM BAUSTELLENVERSUCH VOM 02.05.2011

Nachfolgend wird aus der gemessenen Zugkraft die Auftriebswirkung des flüssigen Verfüllmaterials auf das Betonrohr ermittelt.

Rohr	-Länge	L_{Rohr}	=	3,00 m
	-Durchmesser	D_{Rohr}	=	0,440 m
	-Gewicht/m	$F_{\text{EG-Rohr}}$	=	2.170,00 N/m

Suspensions	-Wichte	γ_{Sus}	=	19.800,00 N/m ³
	-Größtkorn	d_{max}	<	0,004 m
	-Fließgrenze	τ_f	=	170 N/m ²
Kornrohrichte		γ_{Korn}	=	26.600,00 N/m ³
Gemessene Auflagerkraft		F_B	=	-830 N (Zugkraft)

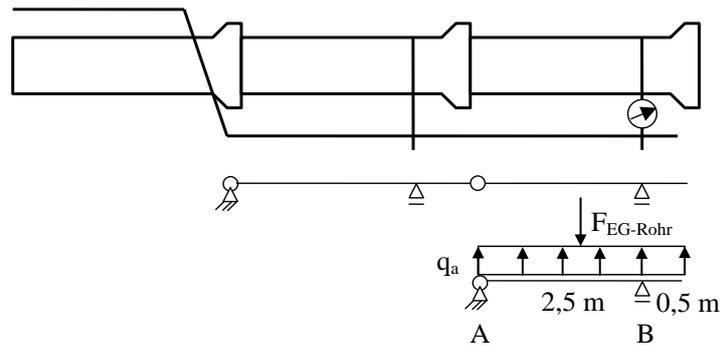


BILD 131: STATISCHES SYSTEM DER BAUSTELLENVERSUCHE ZUR AUFTRIEBSMESSUNG

Aus der gemessenen Auflagerkraft B wird zunächst die zugehörige Streckenlast q_a infolge Auftrieb unter Vernachlässigung des Eigengewichts berechnet:

$$\begin{aligned}\sum M_A = 0 \quad q_a \cdot 3,0 \cdot 1,5 - F_B \cdot 2,5 &= 0 \\ q_a \cdot 4,5 + 830 \cdot 2,5 &= 0 \\ q_a &= -461,11 \frac{N}{m}\end{aligned}$$

Die effektive Auftriebskraft beträgt gemäß Tabelle 6:

$$f_{A,eff} = -1.373,11 \frac{N}{m} \ll -461,11 \frac{N}{m}$$

Der statische Auftrieb nach dem Archimedisches Prinzip ergibt eine gleichmäßige Streckenlast von ca. -841 N/m.

$$f_{A,stat} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot \Delta\gamma_{Rohr}$$

$$f_{A,eff} = \frac{0,44^2}{4} \cdot \pi \cdot \gamma_{Rohr} - \gamma_{Sus}$$

$$f_{A,eff} = \frac{0,44^2}{4} \cdot \pi \cdot 14.271,33 - 19.800,00 = -840,65 \frac{N}{m}$$

Aus der gemessenen Auflagerkraft F_B errechnet sich eine effektive Auftriebsbelastung von -461,11 N/m, also rund 45 % weniger als der statische Wert von -840,65 N/m.

Aus der Anordnung der Messung und dem Einbauverfahren des Verfüllmaterials wird deutlich, dass im vorliegenden Fall die Kraftwirkung infolge Umfließen des Rohres teilweise gegen den statischen Auftrieb gerichtet ist.

Die wirksame Auftriebskraft ergibt sich im vorliegenden Fall demnach aus der Differenz – nicht aus der Summe – von statischer Auftriebskraft und behinderter unter dem Winkel α abwärts gerichteter Umströmung.

$$f_{A,eff} = -840,65 + 532,46 \cdot \sin \alpha = -461,11 \frac{N}{m}$$

$$\sin \alpha = \frac{379,54}{532,46} \rightarrow \alpha = 45,46^\circ$$

Der berechnete Wert für die abwärts gerichtete Strömungsrichtung mit einer daraus resultierenden, den statischen Auftrieb vermindernenden, Wirkung der Schubkraft entspricht dem tatsächlich gemessenen Wert der effektiven Auftriebskraft von 461 N/m, wenn angenommen werden kann, dass die resultierende Strömungskraft unter 45° gegen die Horizontale geneigt ist.

Im vorliegenden Fall macht die Kraftwirkung aus Suspensionsströmung ca. 45% der statischen Auftriebskraft aus. Die Art der Wirkung, also eine Addition der Kräfte oder eine teilweise Kompensation hängt wesentlich von der Art der Einbringung der Suspension in den Graben und der Position des betrachteten Auflagers ab (Bild 132 und Bild 133). Für die Bemessung von Rohr und Auftriebsicherung ist stets von der ungünstigsten Kombination auszugehen.



BILD 132: UMSTRÖMUNGSVORGANG DES ROHRES AUF DER BAUSTELLE

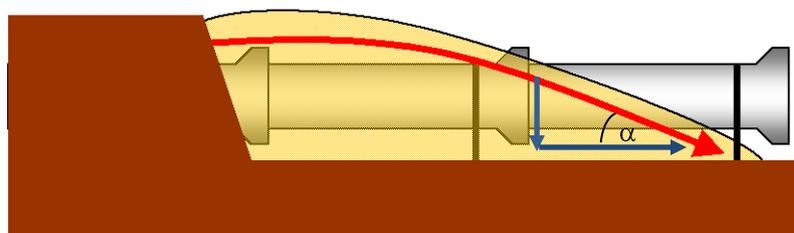


BILD 133: ABWÄRTS GERICHTETE RESULTIERENDE DER STRÖMUNGSKRÄFTE

7.8 Auftriebssicherung der Rohrleitung

Die Sicherung der Rohrleitung gegen Auftrieb kann nach den drei Prinzipien

- Ballastierung der Rohrleitung,
- Abschirmung des Rohres vor auftriebswirksamen Suspensionsdruck und
- Fixierung des Rohres durch Auflagerkonstruktionen

oder durch Maßnahmen erfolgen, die eine Kombination dieser drei Prinzipien darstellen.

Für die Durchführung der Baumaßnahme in der Schluchtstraße in Wuppertal hat sich der Unternehmer für eine Fixierung des Rohres durch Rückverankerung mittels Schraubpfählen entschieden.

Bei der Methode der Rückverankerung (Bild 138) wird ein Schraubpfahl in den Boden unterhalb der Grabensohle eingebracht, an dem eine Ringmutter befestigt wird. Durch die Ringmutter wird ein Stahlband gefädelt und um das Rohr geführt. Das Rohr selber kann auf Holzkeilen, Sandsäcken oder anderen geeigneten Unterstützungsstrukturen aufgelagert werden.

Vorteil dieser Art der Auftriebssicherung ist die vollständige Entkopplung der Lagesicherung des Rohres vom Verbausystem. Für einen reibungslosen Einbau der Pfähle ist je nach Bodenart ein Vorbohren erforderlich. Die eigentlichen Schraubpfähle werden anschließend mit einem Kraftschrauber in das Bohrloch eingeschraubt. Die Schraubpfähle eignen sich prinzipiell für alle Bodenarten, der Einbauaufwand kann jedoch je nach Bodenverhältnissen variieren und sollte vor Beginn der Baustelle überprüft werden.

7.8.1 Ballastierung der Rohrleitung

Die Wirksamkeit dieser Methode ist abhängig von der Rohrwichte und somit von Material sowie Durchmesser der Rohrleitung. Eine Ballastierung (Bild 134) kann beispielsweise durch eine Wasserfüllung der Rohre oder Beschweren der Leitung mit Sandsäcken, Stahlträger oder vergleichbaren Maßnahmen erfolgen. Aussichtsreich sind solche Maßnahmen nur bei Leitungen mit einer entsprechend hohen Rohrwichte. Bei dünnwandigen Rohren großen Durchmessers kann diese Methode nur unterstützend wirken.



BILD 134: BALLASTIERUNG EINES ROHRES (REHAU, 2009)

Als Beispiel für die Bemessung einer Auftriebssicherung mittels Ballastierung soll das Betonrohr der Probebaustelle „Schluchtstraße“ in Wuppertal unter Einbezug der zuvor ermittelten Randbedingungen dienen.

Zunächst wird das Raumgewicht des Beton-Rohres DN 300 ermittelt und die Differenz zur Wichte der tragenden Mehlkornsuspension berechnet. Die Wichte des Fluids (Mehlkornsuspension) berücksichtigt nicht das Gewicht der größeren Zuschläge und wird für die flüssigen Verfüllbaustoffe mit $\gamma_{\text{Fluid}} = 11,0 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt. Die Wichte von Wasser wird mit $\gamma_{\text{Wasser}} = 10,0 \text{ kN/m}^3$ angesetzt.

Für den statischen Auftrieb ergibt sich:

$$\rho_{\text{Rohr}} = \frac{2.170}{1,0 \cdot \frac{0,440^2}{4} \cdot \pi} = 14.271,33 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta\gamma_{\text{Rohr}} = 14.271,33 - 19.800,00 = -5.528,67 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Die effektive Auftriebswirkung ergibt sich insgesamt zu:

$$f_{A,eff} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot -5.528,67 - 6 \cdot 128,40 = -1.373,11 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Eine Wasserfüllung des Rohrquerschnittes erhöht die Gewichtskraft des Rohres um

$$f_{\text{Rohr-Füllung}} = \frac{0,3^2}{4} \cdot \pi \cdot 10.000 = 706,86 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

und genügt somit nicht, um das Betonrohr DN 300 ausreichend gegen Auftrieb zu sichern.

7.8.2 Abschirmung des Rohres vor auftriebswirksamen Suspensionsdruck

Um eine Leitung vor auftriebserzeugendem Suspensionsdruck abzuschirmen, können sogenannte Haltungsbanke (Bild 135) angeordnet werden. Haltungsbanke bestehen in der Regel aus Verfüllmaterial plastischer Konsistenz und werden vorwiegend bei der Verwendung von Flüssigboden-Material eingesetzt. Damit eine ausreichende Auftriebssicherung gewährleistet werden kann, muss abhängig von der Rohrwichte ein Teil des Rohrstranges mit nicht mehr fließfähigem Material umgeben werden, welches den Flüssigkeitsdruck wirksam abschirmt.



BILD 135: ARBEITSABLAUF BEI DER HERSTELLUNG VON LEITUNGSBÄNKEN (S&P GMBH)

Die effektive Auftriebskraft bezüglich des Betonrohres der Probebaustelle „Schluchtstraße“ in Wuppertal beträgt:

$$f_{A_{eff}} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot \gamma_{Rohr} - \gamma_{Suspension} - 6 \cdot \Delta\tau_f$$

$$f_{A_{eff}} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot 14.271,33 - 19.800,00 - 6 \cdot 128,40 = -1.373,11 \frac{N}{m}$$

Der Anteil der Rohrlänge, die abgedeckt werden muss um die Auftriebswirkung zu eliminieren, errechnet sich zu (1-X). Für X gilt der Ansatz:

$$f_{A_{eff}} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot 14.271,33 - 19.800,00 \cdot X - 6 \cdot 128,40 \cdot X = 0 \frac{N}{m}$$

$$3.139,69 - 4.356,00 \cdot X - 770,40 \cdot X = 0$$

$$X = 0,61$$

Für eine ausreichende Auftriebssicherung durch Abschirmen der Rohrleitung vor Suspensionsdruck muss im vorliegenden Beispiel eines Betonrohres DN 300 rund 2/5 der Rohrlänge von Auflagerbänken umschlossen werden. Das Gewicht der Auflagerbänke oberhalb der Rohrscheitel wird bei der Berechnung – im Sinne eines konservativen Ansatzes – nicht als zusätzliche Auflast berücksichtigt.

7.8.3 Fixierung des Rohres durch Auflagerkonstruktionen

Als Beispiele praktikabler Auflagerkonstruktionen zur Fixierung von Rohrleitungen werden nachfolgend die Rohrverlegehilfe von RSS® und die Methode der Rückverankerung in den Baugrund beschrieben.

RSS®-Rohrverlegehilfe

Bei der Verwendung der Rohrverlegehilfe (Bild 136 und Bild 137) wird die zeitliche Entwicklung der Auftriebswirkung auf das Rohr gemessen. Je nach Größe der gemessenen Kräfte im Stempel der Verlegehilfe wird der Zeitpunkt für den Rückbau der Verlegehilfe und anschließend des Grabenverbaus festgelegt. Bei Anwendung dieser Methode sind die Auswirkungen auf den Bauablauf und der Umstand, dass die Fließfähigkeit des Materials zum Zeitpunkt des Rückbaus des Grabenverbaus bereits eingeschränkt ist, zu berücksichtigen.

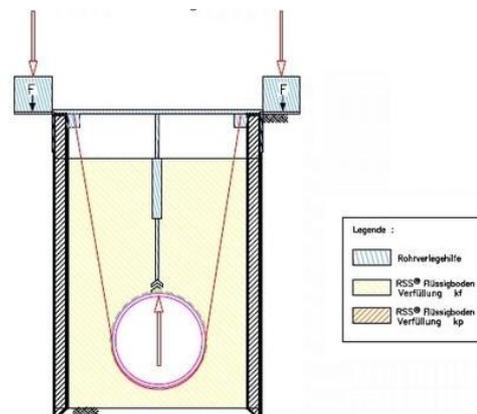
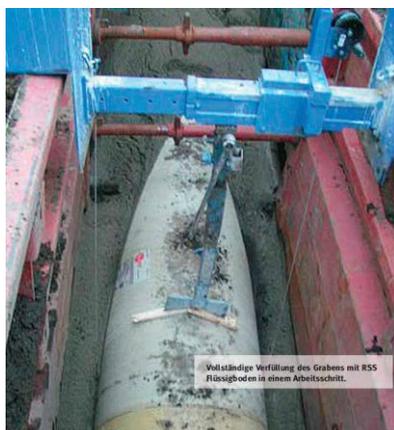


BILD 136: RSS®-ROHRVERLEGEHILFE (HILLMANN, 2009)

BILD 137: RSS®-ROHRVERLEGEHILFE (STOLZENBURG, 2009)

Rückverankerung

Bei der Methode der Rückverankerung (Bild 138) wird ein Schraubpfahl in den Boden unterhalb der Grabensohle eingebracht, an dem eine Ringmutter befestigt wird. Durch die Ringmutter wird ein Stahlband gefädelt und um das Rohr geführt. Das Rohr selber kann auf Holzkeilen, Sandsäcken oder anderen geeigneten Unterstützungsstrukturen aufgelagert werden.

Vorteil dieser Art der Auftriebssicherung ist die vollständige Entkopplung der Lagesicherung des Rohres vom Verbausystem. Für einen reibungslosen Einbau der Pfähle ist je nach Bodenart ein Vorbohren erforderlich. Die eigentlichen Schraubpfähle werden anschließend mit einem Kraftschrauber in das Bohrloch eingeschraubt. Die Schraubpfähle eignen sich prinzipiell für alle Bodenarten, der Einbauaufwand kann jedoch je nach Bodenverhältnissen variieren und sollte vor Beginn der Baustelle überprüft werden.

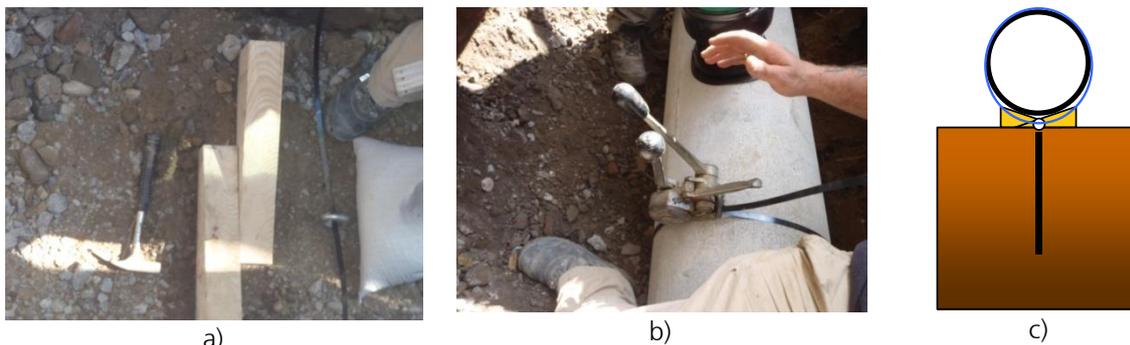


BILD 138: EINBAU DES SCHRAUBPFAHLS (A) UND BEFESTIGUNG DES ROHRES (B) SOWIE SCHEMA-SKIZZE DER RÜCKVERANKERUNG (C)

Eine Bemessung der Pfähle sollte auf der Grundlage von Probelastungen erfolgen. Für rollige Böden kann die Pfahltragfähigkeit auch nach dem Näherungsansatz von *Walz und Quarg (2002)* ermittelt werden. Eine Berechnung der Tragfähigkeit über den Ansatz der Mantelreibung wird in den meisten Fällen keine zutreffenden Werte liefern.

7.8.4 Schraubpfähle zur Auftriebssicherung

Zur Auftriebssicherung mittels der oben erläuterten Rückverankerung wurden Ankerpfähle Titan 30/16 mit einer Gesamtlänge von jeweils 1,00 m verwendet. Die Pfähle sind mit einer Metallspitze versehen. Auf den Ankerkopf wird nach Einbau eine Ringmutter geschraubt, die zur Aufnahme des Metallbandes dient, welches das Rohr umschließt.

7.8.5 Anordnung der Auflager und Anker

Die Anordnung der Auflager und Anker wurde in Anlehnung an die Technik zur Aufständigung von oberirdischen Leitungen im Rohrleitungsbau gewählt.

Im Hinblick auf die Betrachtung des statischen Systems der Rohrleitung im Bauzustand kann auf die Abbildung eines Durchlaufträgers mit beliebiger Felderzahl zurück gegriffen werden (Bild 139). Vor Verfüllung der Baugrube wirkt das Eigengewicht der Haltung als einzige Kraft. Durch die Auftriebswirkung des fließfähigen Verfüllbaustoffes ändert sich die Belastungsrichtung.

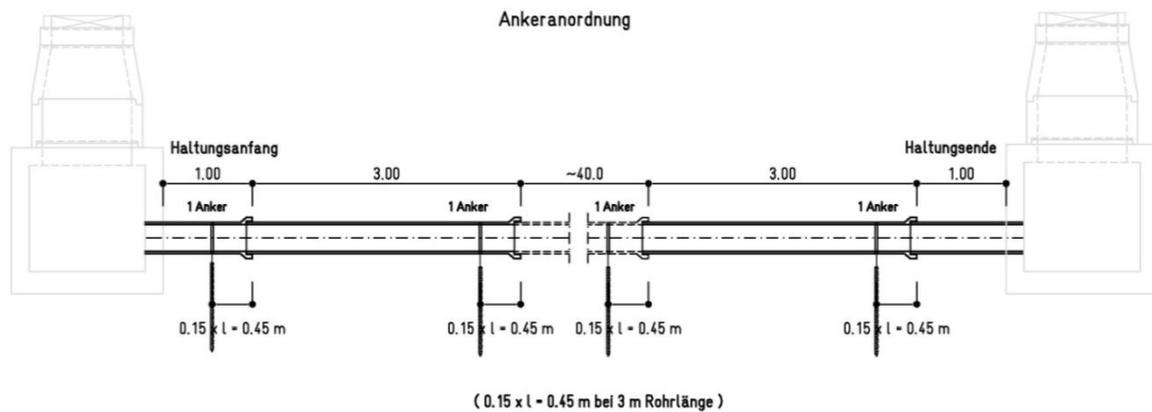


BILD 139: ERMITTELTE ANKERANORDNUNG AN DER PROBEBAUSTELLE

Die Abtragung der aus dem Eigengewicht resultierenden Kräfte erfolgt im Einbauzustand über Auflagerkeile (Holzkeile) und Sandsäcke als Auflagerkonstruktion (Bild 138).

Auftretende Zugkräfte werden über einen Schraubpfahl, der als Anker wirkt, in den Boden eingeleitet. Da das Betonrohr eine radialsymmetrische Bewehrung aufweist, ist eine gleichmäßige Abtragung der Kräfte unabhängig von der Belastungsrichtung sichergestellt. Der Belastungszustand der Rohre während der Bauphase ist mit dem Hersteller abzustimmen und beim statischen Nachweis der Rohre entsprechend zu berücksichtigen. Insbesondere bei der Verwendung von biegeweichen Rohren sind mögliche Schädigungen der Rohrleitung bereits beim Einbau auszuschließen.

7.8.6 Ankerzugtest

Der Auszieh Widerstand der Ankerpfähle kann für rollige Böden in Anlehnung an den Näherungsansatz von *Walz und Quarg (2002)* rechnerisch ermittelt werden. Eine Bemessung der Pfähle über den Ansatz der Mantelreibung wird in den meisten Fällen keine zutreffenden Werte liefern.

Nach *Walz und Quarg (2002)* wird die Grenzkraft eines Zugpfahls, der eingeschraubt oder durch Vermörtelung in Verbund mit einem mindestens mitteldicht gelagerten Fein-, Mittel- oder Grobsand steht, aus dem Gewicht eines vom Zugpfahl beanspruchten Bodenkörpers berechnet, dessen Geometrie durch einen Zylinder mit dem Radius $R = r + A$ im oberen Pfahlbereich und durch einen hieran nach unten anschließenden Kegelstumpf mit der Höhe $H = 0,43 \cdot L$ (Radius r an der Pfahlspitze) bestimmt ist (Bild 140).

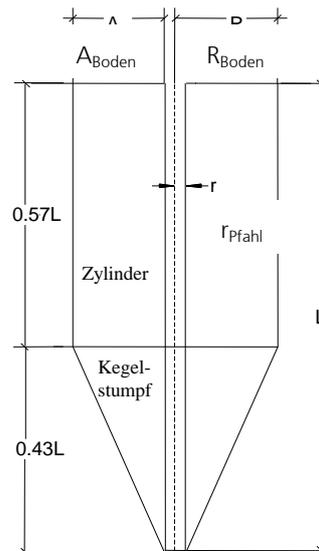


BILD 140: ABMESSUNGEN KEGELSTUMPF EINES ZUGPFAHLES

Die in Bild 140 aufgeführten Maße bedeuten:

r_{Pfahl} = Radius des Pfahls in [m]

A_{Boden} = Öffnungsweite des beanspruchten Bodenkörpers an der Geländeoberfläche in [m]

L = Pfahllänge im tragfähigen Boden in [m]

Für die Bemessung nach *Walz und Quarg (2002)* werden die dort angegebenen Näherungsgleichungen (Gl. 7.3 bis Gl. 7.5) und das Diagramm zur Bestimmung der Geometrie des angehängten Bodenkörpers (Bild 141), das ursprünglich für Pfähle ab einer Länge von $L = 3,0$ m gilt, für kurze Pfähle bis zu einer Länge von $1,50$ m angepasst.

Für die Öffnungsweite A_{Boden} des Bodenkörpers gilt in Bereichen bis zu einer Pfahllänge von $3,0$ m näherungsweise:

für Feinsand ($d_{50} = 0,1$ mm): $A_{\text{Boden}} = 0,28 \cdot \overline{L^{1,1}}$ Gl. 7.3

für Mittelsand ($d_{50} = 0,4$ mm): $A_{\text{Boden}} = 0,42 \cdot \overline{L^{1,4}}$ Gl. 7.4

für Mittelsand ($d_{50} = 1,2$ mm): $A_{\text{Boden}} = 0,50 \cdot \overline{L^{1,7}}$ Gl. 7.5

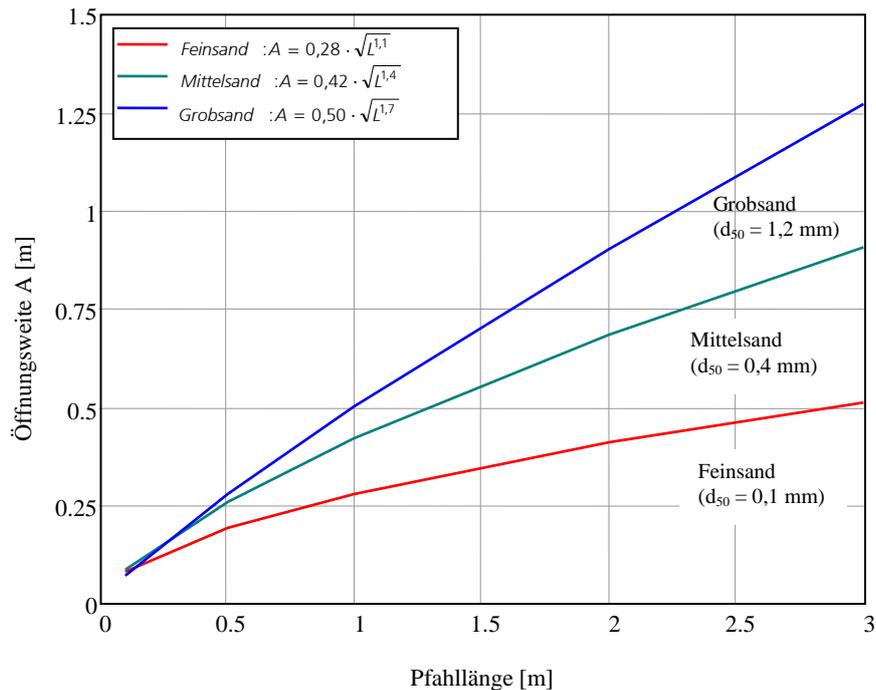


BILD 141: DIAGRAMM ZUR BESTIMMUNG DER GEOMETRIE DES ANGEHÄNGTEN BODENKÖRPERS

Zwischenwerte für die Öffnungsweite A_{Boden} dürfen in Abhängigkeit vom mittleren Korndurchmesser d_{50} interpoliert werden.

Als Ergebnis der Volumina von Zylinder und Kegelstumpf ergibt sich bspw. für einen Schraubpfahl oder einen vermörtelten GEWI-Pfahl eine charakteristische Grenzzugkraft von:

$$Z_{g,k} = \gamma_{\text{Boden}} \cdot \pi \cdot L \cdot A_{\text{Boden}} + r_{\text{Pfahl}}^2 - r^2 + \gamma_{\text{Pfahl}} \cdot \pi \cdot L \cdot r_{\text{Pfahl}}^2 \quad \text{Gl. 7.6}$$

Mit der Öffnungsweite des beanspruchten Bodenkörpers an der Geländeoberfläche A_{Boden} nach Gl. 7.3 bis 7.5 bzw. Diagramm in Bild 141 kann die Pfahlänge im tragfähigen Boden bestimmt werden.

Die zuverlässigste Methode der Ankerbemessung ist eine Probebelastung vor Ort. Ein solcher Ankerzugversuch wurde auf der Baustelle „Schluchtstraße“ durchgeführt. Hierzu wurde ein Probepfahl in den Baugrund unterhalb der Grabensohle eingeschraubt und mittels einer hydraulischen Ausziehvorrichtung (Bild 142) bis zum Bruch belastet. Die von einem Hydraulikzylinder über eine Kette in den Pfahl eingeleitete Kraft wird von einer Kraftmessdose registriert und mittels eines Datenloggers aufgezeichnet.

In Bild 86 ist die Belastung des Pfahls über die Zeit der Probebelastung aufgetragen. Die maximal aufnehmbare Zugkraft bis zum Versagen des Pfahls wurde mit über 6 kN gemessen.

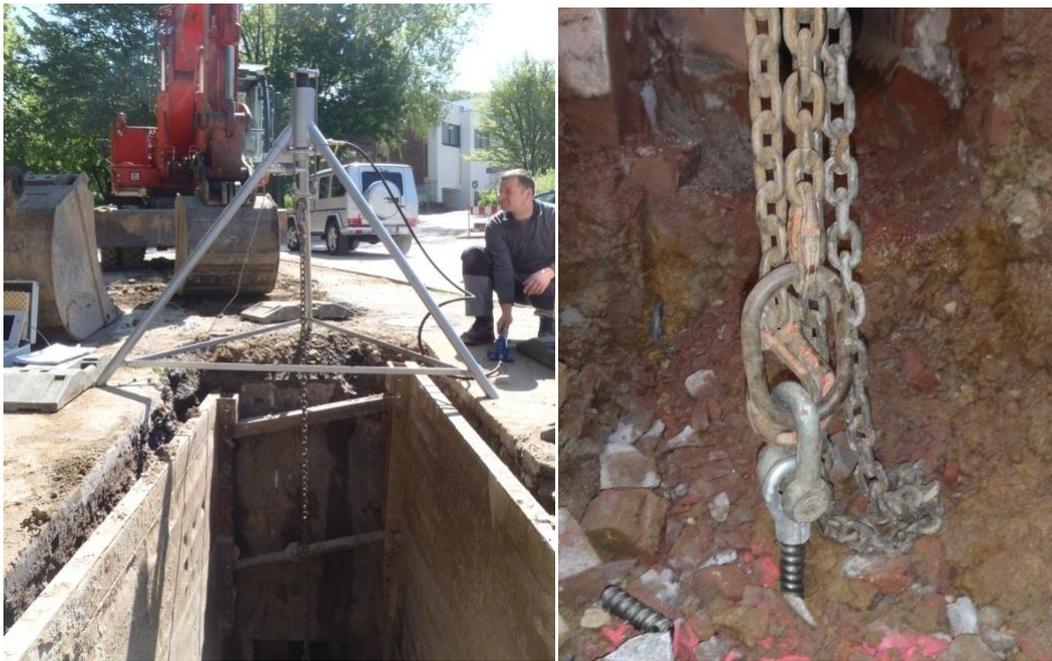


BILD 142: ANKER AUSZIEHVERSUCH

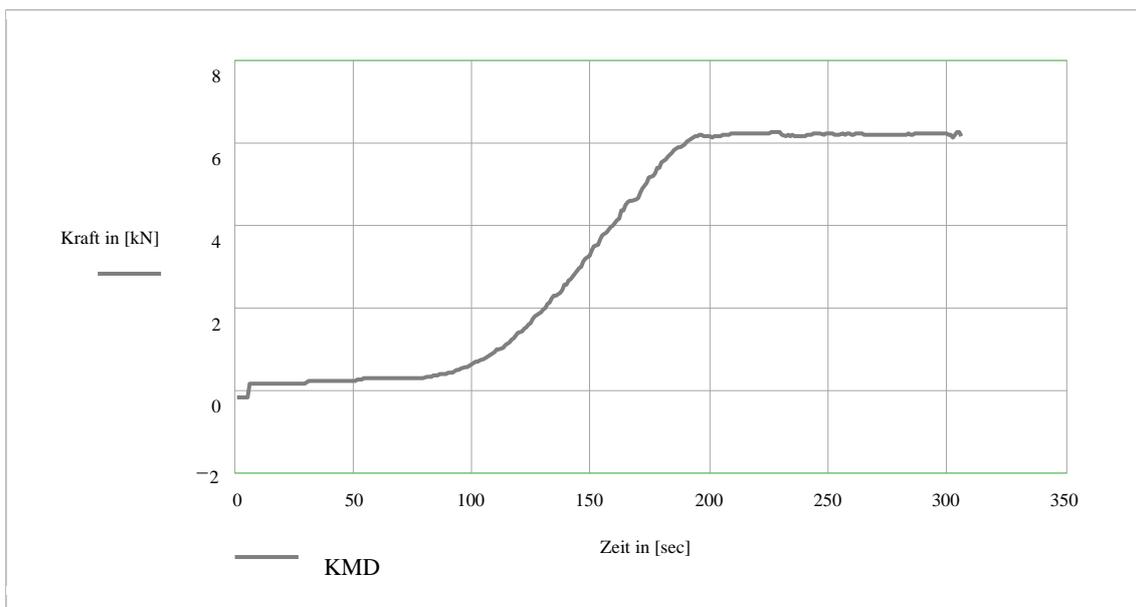


BILD 143: KRAFTMESSUNG WÄHREND DES ANKER AUSZIEHVERSUCHS

7.8.7 Einbau der Anker

Bei den gegebenen Bodenverhältnissen waren vor dem Einbau der Anker Lockerungsbohrungen empfehlenswert. Die Lockerungsbohrungen erfolgten mit einer Schlagbohrmaschine und einem Bohrmeißel mit 25 mm Durchmesser bis in eine Tiefe von ca. 80 cm. Das anschließende Eindrehen des Ankers erfolgte mit einer akkubetriebenen Schieberdrehmaschine (Kraftschrauber) (Bild 144). Die Maschine ist mit einem Getriebe mit großer Untersetzung ausgestattet, das bei einer langsamen Drehgeschwindigkeit und motorschonendem Vortrieb ein maximales Drehmoment von 900 Nm ermöglicht. Bohr- oder Schlagbohrmaschine eignen sich für das Einschrauben der Pfähle nicht.



BILD 144: VORBOHREN MIT BOHRMEißEL (LINKS) UND EINDREHEN DER ANKER (RECHTS)

7.9 Lastplattendruckversuch

Kanalerneuerungsmaßnahmen im innerstädtischen Bereich erfordern in der Regel eine zügige Verkehrsfreigabe. In diesem Sinne ist eine rasche Überbauung der Grabenverfüllung mit Frostschutz- und Tragschicht unerlässlich. Der Zeitpunkt, an dem die weiteren Schichten des Oberbaus mittels dynamischer Verdichtung eingebaut werden können, ist von einer Vielzahl Faktoren abhängig. Maßgebend sind die Materialeigenschaften des Verfüllbaustoffes, die Witterungsverhältnisse und die Einbaubedingungen vor Ort. Gemäß den Angaben der Hersteller können die verfüllten Materialien bereits ca. 4 bis 24 Stunden nach dem Einbau betreten werden.

Im Rahmen der Baumaßnahme an der Schluchtstraße in Wuppertal wurden zur Überprüfung der Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Verfüllbaustoffes nach dessen Verfestigung dynamische Plattendruckversuche gemäß deutscher Prüfvorschrift *TP-BF StB Teil B 8.3 (2003)* mit leichtem Fallgewichtsgerät (Bild 145) durchgeführt.



BILD 145: LEICHTES FALLGEWICHTSGERÄT

Das leichte Fallgewichtsgerät besteht aus einer Führungsstange, an deren oberen Ende ein 10 kg schweres Fallgewicht ausgeklinkt wird und auf eine am unteren Ende der Führungsstange sitzende Feder aufprallt. Über eine runde Stahlplatte mit einem Durchmesser von 30 cm wird der Stoß in den Boden eingeleitet und gleichzeitig mit einem elektronischen Beschleunigungsaufnehmer die Bewegung der Platte gemessen. Als Ergebnis wird der dynamische Verformungsmodul (E_{vd}) bestimmt. Mit Kenntnis dieses Wertes kann eine Umrechnung in den Verformungsmodul (E_{v2}) des Bodens bei Wiederbelastung erfolgen. Eine Korrelationsanalyse der Zusammenhänge zwischen dynamischen Verformungsmodul und dem Modul des Bodens bei Wiederbelastung wurde im Vorfeld der Versuche durchgeführt. Für die bestehenden Bodenverhältnisse und unter Betrachtung der Anforderungen an die Bauklasse ergibt sich ein geforderter E_{vd} -Wert von 20 MN/m², entsprechend einem Wert von $E_{v2} = 45$ MN/m².

Der dynamische Plattendruckversuch wurde jeweils am Tag nach dem Einbau ca. 15 Stunden nach Rückverfüllung durchgeführt. Die Betretbarkeit des Materials war nach 15 Stunden bei den Verfüllbaustoffen Füma Boden (CEMEX Deutschland AG), RSS[®]-Flüssigboden (ENREBA Neuss GmbH) und den fließfähigen Bodenersatzmaterial (TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG) gegeben.

Die Ergebnisse des dynamischen Lastplattendruckversuchs sind in der Tabelle 9 zusammengefasst.

TABELLE 9: ERGEBNISSE DER DYNAMISCHEN LASTPLATTENDRUCKVERSUCHE

Stunden nach Rückverfüllung	Füma Boden (CEMEX) E_{vd} [MN/m ²]	RSS [®] -Flüssigboden (ENREBA) E_{vd} [MN/m ²]	fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER) E_{vd} [MN/m ²]
ca. 15	12,4 - 23,3	keine Auswertung möglich – 1,7 cm bis 2,0 cm Setzung der Lastplatte messbar	12,5 - 16,9
ca. 39	keine Versuche durchgeführt	0 - 5,6	keine Versuche durchgeführt

Die Ergebnisse der dynamischen Lastplattendruckversuche weisen Werte auf, die je nach eingesetztem Verfüllbaustoff variieren. Dieser Streubereich verdeutlicht den Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auf die Entwicklung der Anfangsfestigkeit. Die Witterungsverhältnisse können bei der betrachteten Baustelle als annähernd konstant angenommen werden, so dass dieser Faktor für alle Materialien gleich ist.

Maßgebend für die Ergebnisse bezüglich des dynamischen Verformungsmoduls ist in erster Linie die Zusammensetzung des jeweiligen Verfüllbaustoffes. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Materialien mit normierten Zuschlagstoffen (hier CEMEX und TER) eine vergleichbare Entwicklung der Anfangsfestigkeit zeigen und die notwendige Tragfähigkeit zur Überbauung schneller erreichen als das Material mit Boden als Zuschlagstoff (hier ENREBA).

Die Stellen, an denen die Lastplattendruckversuche durchgeführt wurden, sind im Lageplan (Bild 146) eingetragen.

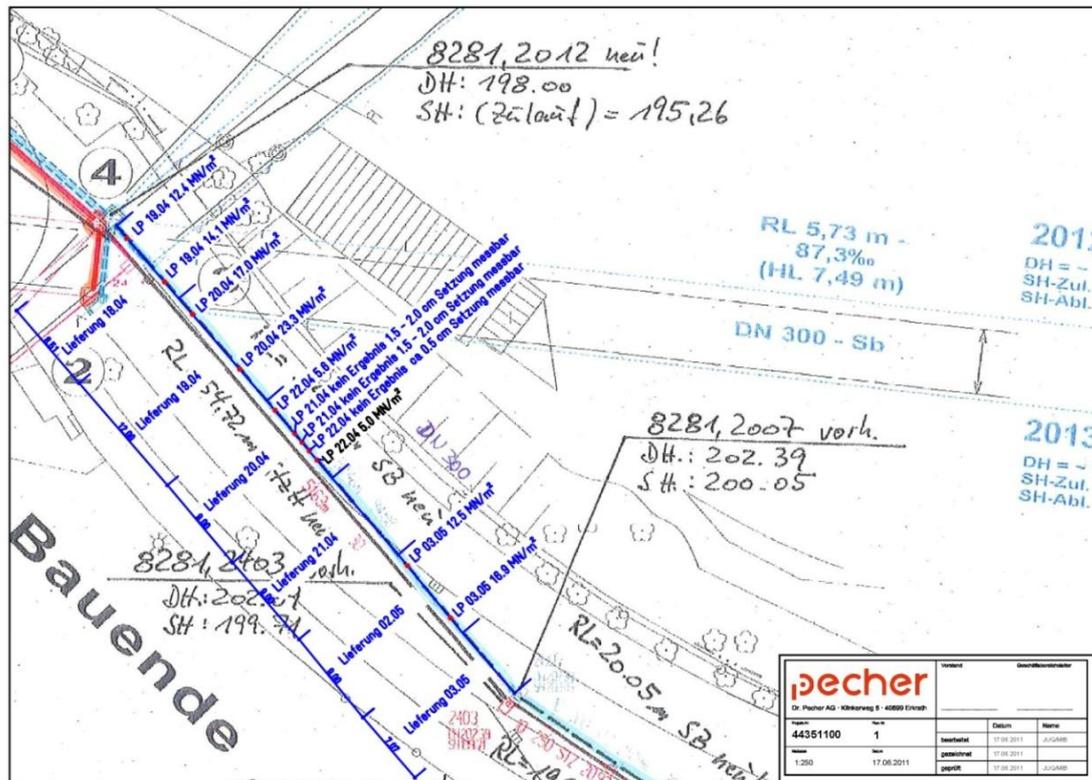


BILD 146: LAGEPLAN DER DYNAMISCHEN LASTPLATTENDRUCKVERSUCHE

7.10 Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit als Kontrollwert des Verfüllbaustoffes

Die Lösbarkeit und Wiederausbaufähigkeit des Verfüllbaustoffes muss für spätere Aufgrabungen sichergestellt bleiben. Eine unerwünschte, langfristige Festigkeitszunahme gilt es daher zu vermeiden. In der Literatur wird eine sogenannte Spatenlösbarkeit gefordert. Der Verfüllbaustoff gilt als ‚spatenlösbar‘ oder ‚von Hand lösbar‘, wenn eine Aufgrabung dauerhaft im Handaushub mit Schaufel oder Spaten möglich ist. Dieses Kriterium wird durch die DIN 18300 („VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Erdarbeiten“, 2010) jedoch nicht ausreichend beschrieben. Eine eindeutige Zuordnung zwischen Lösbarkeit und Bodenklasse besteht nicht.

Da eine spätere Aufgrabung der der Kanaltrasse zu Versuchszwecken im Rahmen der Baustelle in der Schluchtstraße nicht möglich ist, entfällt eine subjektive Kontrolle zur Überprüfung. Als Hilfsmittel zur Beurteilung der Lösbarkeit wird eine Untersuchung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten nach 28 und 90 Tagen durchgeführt (Tabelle 11). Bezüglich einer Einhaltung des Kriteriums der Spatenlösbarkeit liefert das Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen der FGSV (2010) Anhaltswerte für die Zuordnung zwischen Druckfestigkeit und Wiederausbaufähigkeit (Tabelle 10). Da der Wertebereich der Druckfestigkeit des Verfüllbaustoffes erwartungsgemäß außerhalb des Messbereiches von Betondruckfestigkeiten liegt, werden die einaxialen Druckfestigkeiten gemäß *DIN 18136* (einaxiale Druckfestigkeit von Bodenproben bei unbehinderter Seitendehnung) nach 28 bzw. 90 Tagen ermittelt (Tabelle 11). Bei den Probekörpern handelt es sich um zylinderförmige Proben mit einem Durchmesser von rund 10 cm und einer Probenhöhe zwischen 14,4 cm und 15,8 cm.

TABELLE 10: ANHALTSWERTE FÜR DIE WIEDERAUSBAUFÄHIGKEIT VON ZEITWEISE FLIEBFÄHIGEN SELBSTVERDICHTENDEN VERFÜLLBAUSTOFFEN (FGSV, 2010)

	Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen		
	Bis 300 kN/m ²	300 bis 800 kN/m ²	Über 800 kN/m ²
Wiederausbaufähigkeit	leicht	mittel	schwer
	von Hand	mit Hilfe leichter Geräte	nur mit Geräteeinsatz
Lösewerkzeuge	Schaufel, Spaten	z. B. Spitzhacke, Löffel des Minibaggers	Baggerlöffel, Pressluft- oder Hydraulikmeißel

TABELLE 11: ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG ZUR EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT GEMÄß *DIN 18136 (2003)* NACH 28 BZW. 90 TAGEN

Materialbezeichnung	Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen in [kN/m ²]	Zylinderdruckfestigkeit nach 90 Tagen in [kN/m ²]
Füma Boden (CEMEX) 18.04.2011	12,99	25,98
Füma Boden (CEMEX) 19.04.2011	64,95	90,93
RSS [®] -Flüssigboden (ENREBA) 20.04.2011	38,97	51,96
RSS [®] -Flüssigboden (ENREBA) 21.04.2011	51,98	298,78
fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER) 02.05.2011	129,90	77,94
fließfähiges Bodenersatzmaterial (TER) 04.05.2011	90,95	153,29

Die Auswertung ergab nach 28 Tagen bei allen Proben eine deutlich geringere Druckfestigkeit als die FGSV als Empfehlung für Spatenlösbarkeit angibt. Auch die Zylinderdruckfestigkeiten nach 90 Tagen zeigen bei allen Proben die Einhaltung der 300 kN/m².

Beim Vergleich der Scherfestigkeitsentwicklung der frischen Suspension über die Zeit mit der 28 Tage Druckfestigkeit wird deutlich, dass kein Rückschluss vom Verhalten der frischen Suspension auf die Endfestigkeit gezogen werden kann. Die wesentlich höhere Scherfestigkeit des RSS[®]-Flüssigbodens führt zu keiner erhöhten Festigkeitsentwicklung der Verfüllung.

8 Entwurf eines Praxisleitfadens für die Anwendung der flüssigen Grabenverfüllung

8.1 Einleitung

Die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung bei Tiefbaumaßnahmen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dabei werden vermehrt in Baugruben sowie Gräben im Einbauzustand fließfähige, selbstverdichtende und anschließend selbstverfestigende Verfüllmaterialien auf der Basis von Baustoff- oder Boden-Bindemittel-Gemischen eingesetzt. Diese Füllmaterialien werden im Kanalbau überwiegend zur Verfüllung der Leitungszone, teilweise auch zur Herstellung der Hauptverfüllung verwendet.

Im Vergleich zur herkömmlichen offenen Bauweise sind bei der Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung unter Berücksichtigung eines fachgerechten Einsatzes folgende Vorteile herauszustellen:

- Schnellere Grabenverfüllung und geringere Grabenbreiten bei einem optimierten Arbeitsverlauf und somit Möglichkeit von Kosteneinsparungen durch Bauzeitreduzierung und kleinere wiederherzustellende Oberflächen.
- Es ergibt sich durch die flüssige Verfüllung eine ideale Bettung des neu eingebauten Rohres, die einer Schädigung als Folge schlechter Verdichtung entgegenwirkt, so dass die Lebens- bzw. Nutzungsdauer optimiert werden kann und sich Betriebs- sowie Folgekosten verringern.
- Mittels einer geeigneten Auswahl des Verfüllmaterials kann eine zusätzliche Barriere gegenüber Abwasserexfiltration aus der Rohrleitung sowie Grundwasserinfiltration in die Rohrleitung geschaffen werden. Somit entsteht eine Systemdichtheit bei Schäden der Rohrleitung.
- Es können Hohlräume im Bereich von komplizierten Leitungsknotenpunkten bzw. Engpässen (Zwickelverfüllung) sowie beim Ziehen des Verbaus (Verbauspur) vermieden werden. Im Zuge dessen kommt es zu einer erheblichen Reduzierung von Setzungsschäden.
- Es ist keine mechanische Verdichtung erforderlich, da eine homogene und mischungsstabile Arbeitsraumverfüllung erfolgt, Verdichtungsfehler werden so ausgeschlossen.
- Durch Wegfall der mechanischen Verdichtung ist weiterhin ein Schutz gegen Lärm- und Staubemission gegeben und gleichzeitig werden potentielle Schäden an Bauteilen oder angrenzenden Bauwerken vermieden.
- Vermeidung unnötiger Kosten beim Umgang mit Boden und bodenähnlichen Materialien im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes durch Wiederverwendung von Aushubböden beim Herstellungsprozess des Verfüllbaustoffes. Dadurch erhebliche Einsparungsmöglichkeiten infolge des Entfalls von Entsorgungs- und Transportkosten.

Insgesamt bietet die Methode der flüssigen Grabenverfüllung bei optimaler Anwendung ein erhebliches Potenzial an wirtschaftlichen Vorteilen.

Der Schwerpunkt bei der Bearbeitung des Forschungsprojektes lag bei der Klärung von Fragestellungen bezüglich der Materialeigenschaften von fließfähigen Verfüllbaustoffen sowie der Abläufe bei der entsprechenden Verwendung auf der Baustelle. Für einen monetären Vergleich mit der konventionellen Bauweise bzw. eine ökonomischen Abschätzung der genannten Vorteile sind ganzheitliche Betrachtungen erforderlich, da bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit nicht nur die reinen Baukosten zu berücksichtigen sind. Aufgrund der beschriebenen idealen Bettungsverhältnisse können weiterhin Ersparnisse durch geringere Instandhaltungskosten prognostiziert werden. Gemäß einer Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung nach *Simon et al., 2012* ergibt

sich bei der Verwendung von Flüssigboden im Leitungsbau ein Kostenvorteil von 65% gegenüber der konventionellen Verfüllung.

Um die aufgeführten Vorteile nutzen zu können, sind die besonderen Eigenschaften der fließfähigen Verfüllbaustoffe insbesondere im Einbauzustand zu berücksichtigen.

Die wichtigsten Eigenschaften der noch flüssigen Verfüllbaustoffe sind:

- Stabilisierung der Suspension
- Übertragung von Schubspannungen auf das Rohr während des Einbauvorgangs
- Stützung des offenen, unverbauten Grabens

Es stellt sich eine besondere Nachhaltigkeit im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise heraus, jedoch hat sich die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung noch nicht flächendeckend durchgesetzt, was vor allem auf folgende Punkte zurück zu führen ist:

- Höhere Kosten des Verfüllmaterials selbst gegenüber den konventionellen Verfüllbaustoffen.
- Fehlender Nachweise der auf die Rohre beim Einbau wirkenden Kräfte, der Bemessung der notwendigen Auftriebssicherung und Sicherstellung der Stabilität der Rohrgräben im Einbauzustand.
- Fehlende geeignete und herstellerunabhängige Methoden zur Qualitätssicherung der eingesetzten Materialien und der Praxisbedingungen auf der Baustelle.

Die wichtigsten Parameter zur Quantifizierung der Eigenschaften einer Suspension sind:

- Wichte der Suspension
- Kornverteilung der Zuschläge
- Fließgrenze der Suspension

Um die wichtigsten Charakteristika der Suspensionen im Zustand des Einbaus überwachen zu können, sind deren Parameter auf der Baustelle zu messen. Während die Messung der Suspensionswichte nur einen geringen Aufwand bedeutet und die Kornverteilung der Zuschläge aus der Rezeptur ersichtlich sind, ist eine zuverlässige Messung der Fließgrenze mit den bekannten einfachen Messverfahren, bspw. aus der Geotechnik (Kugelharfe oder Pendelgerät) oder aus der Betontechnologie (z. B. Ausbreitversuch), nicht möglich.

Für eine Messung der Fließgrenze unter Baustellenbedingungen wurde das Vertikalpendelgerät entwickelt (vgl. vorangegangene Kapitel). Die Handhabung des Gerätes und die Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden eingehend beschrieben.

Mit der Kenntnis der oben genannten Parameter können die Nachweise der Suspensionsstabilität, der maximalen Auftriebswirkung und die ausreichende Dimensionierung der Auftriebssicherung sowie die Stützwirkung auf den unverbauten Graben überprüft werden.

Die nachfolgenden Beschreibungen enthalten eine detaillierte Anleitung zur Messung der Suspensionsparameter Wichte und Fließgrenze unter Baustellenbedingungen. Anschließend wird der Nachweis der Suspensionseigenschaften Stabilität, Auftriebswirkung und Stützwirkung in Abhängigkeit der oben

genannten Suspensionsparameter beschrieben. Schließlich werden Berechnungsansätze für die Dimensionierung der Auftriebssicherung sowie für den Nachweis der inneren Standsicherheit des suspensionsgestützten Grabens erläutert.

An einem Berechnungsbeispiel wird die Anwendung von Bemessungsdiagrammen zur möglichst unkomplizierten Durchführung der oben genannten Berechnungen demonstriert. Die verwendeten Diagramme sind in kopierfähiger Form im Anhang angefügt.

8.2 Messung der Fließgrenze mit dem Vertikalpendelgerät

8.2.1 Versuchsaufbau



BILD 147: VERTIKALPENDELGERÄT

Das Vertikalpendelgerät (Bild 147) besteht im Wesentlichen aus einem Traggestell und einem Tauchkörper (Kugel oder Flügel), welcher über einen Kunststofffaden und zwei Umlenkrollen mit einem Gewichtskörper verbunden ist.

Der Gewichtskörper ist ein geschlossener, wassergefüllter Zylinder, der sich als Kolben in einem offenen äußeren Zylinder bewegt. Der äußere Zylinder wird ebenfalls mit Wasser gefüllt, wodurch der Kolben bei steigendem Wasserspiegel im Zylinder auftriebt, da seine Wichte aufgrund eines geringen Restvolumens an Luft im Kolben geringer ist als die des Wassers.

Der Tauchkörper am anderen Ende des Kunststofffadens wird in einem mit Suspension gefüllten Probehälter abgesenkt.

Der Probehälter, einschließlich Tauchkörper, befindet sich auf einer Waage, die das Gesamtgewicht von Behälter und Suspension anzeigt, während die Gewichtskraft des Tauchkörpers über den

Kunststofffaden auf den Kolben wirkt. Wird nun der Wasserstand im Zylinder reduziert, verringert sich die Eintauchtiefe des Kolbens, wodurch sich die Auftriebswirkung auf den Kolben ebenfalls reduziert. Das Gewicht des Kolbens, das über den Kunststofffaden auf den Tauchkörper wirkt, nimmt zu. Der nur noch teilweise eingetauchte Kolben hat nun das Bestreben, den Tauchkörper aus der Suspension herauszuziehen. Aufgrund ihrer Fließgrenze können in der Suspension Scherkräfte mobilisiert werden, die der Vertikalbewegung des Tauchkörpers in der Suspension entgegenwirken.

Die Größe der mobilisierten Scherkräfte entspricht der Abnahme der gemessenen Gewichtskraft des gefüllten Probenbehälters während der Versuche.

Eine ausführliche Anleitung zur Durchführung der Messung der Fließgrenze ist in Anhang 1 beigefügt. In Kapitel 5 ist die Erprobung des oben beschriebenen Vertikalpendelgerätes eingehend erläutert.

8.2.2 Ermittlung der Wichte

Vor Versuchsbeginn ist die Wichte der Suspension zu ermitteln. Für die Wichtebestimmung wird das Volumen und das Gewicht der Suspensionsprobe gemessen, wobei das Gewicht des Probenbehälters zu berücksichtigen ist.

Für eine möglichst unkomplizierte Ermittlung der Wichte aus der gemessenen Masse des Suspensionsvolumens enthält Anhang 1.2 ein entsprechendes Diagramm.

8.2.3 Ermittlung der Fließgrenze

Aus den Versuchen am Vertikalpendelgerät lassen sich über die gemessene maximale Gewichtsänderung des Probenbehälters während des Versuches und der Geometrie des Tauchkörpers (Flügel oder Kugel) die Fließgrenze der Suspension bestimmen.

Bei der Verwendung des Flügelpendels wird als Scherfläche die Oberfläche des Flügels angesetzt. Diese beträgt bei dem verwendeten Gerät ca. 84 cm². Die Änderung der angezeigten Massenkraft entspricht der zwischen Flügel und Suspension übertragenen Scherkraft, somit kann die Scherfestigkeit unmittelbar aus der Gewichtsmessung ermittelt werden:

$$\text{Scherfestigkeit } \frac{N}{m^2} \approx \frac{\text{Betrag der Grammmzahl } g \cdot 100 [-]}{84 [cm^2]} = 1,19 \cdot \text{Betrag der Grammmzahl } [g]$$

Im Zuge der Umrechnung von abgelesener Grammmzahl in den Parameter Scherfestigkeit der Suspension ergibt sich bei Verwendung des Flügelpendels der Faktor 1,19.

Bei der Verwendung des Kugelpendels kann die Umrechnung nicht über den einfachen Ansatz der Kugeloberfläche als Scherfläche vorgenommen werden. Eine ausführliche Darstellung des mathematischen Ansatzes ist in Kapitel 3.4 bzw. Kapitel 5.1 dargestellt.

Beim Kugelpendel muss die abgelesene Grammmzahl (mit positivem Vorzeichen) zur Bestimmung der Scherfestigkeit mit dem Faktor 0,866 multipliziert werden.

Für eine möglichst einfache Ermittlung der Fließgrenze anhand der gemessenen maximalen Gewichts-differenz des Probenbehälters ist in Anhang 1.2 ein entsprechendes Diagramm abgebildet.

8.3 Nachweis der Suspensionseigenschaften

8.3.1 Nachweis der Stabilität der Suspension

Ein Absinken der Grobzuschläge der Suspension kann ausgeschlossen werden, wenn nach dem Ansatz von *Saak et al. (2001)* eine Mindestfließgrenze $\tau_{0,min}$ der Suspension nachgewiesen werden kann.

$$\tau_{0,min} = \frac{4}{3} \cdot (\gamma_{Korn} - \gamma_{Fluid}) \cdot r_{Korn} \quad \text{vgl. Gl. 3.10}$$

mit:

$$\begin{aligned} \gamma_{Korn} &= \text{Wichte des Zuschlagskorns in [kN/m}^3\text{]} \\ \gamma_{Sus} &= \text{Wichte der Suspension in [kN/m}^3\text{]} \\ r_{Korn} &= \text{Radius des Zuschlagskorns in [m]} \end{aligned}$$

Für nicht poröse mineralische Zuschläge kann die Wichte der Zuschlagkörner mit $\gamma_{Korn} = 27,2 \text{ kN/m}^3$ angesetzt werden. Aus dem maximalen Korndurchmesser der Zuschläge und der Wichte der Suspension ergibt sich die Mindestfließgrenze der stabilen Suspension.

Für eine unkomplizierte Ermittlung von $\tau_{0,min}$ ist in Anhang 1.3 ein entsprechendes Diagramm beige-fügt.

8.3.2 Bestimmung der effektiven Auftriebskraft

Die effektive Auftriebskraft, die eine Suspension im Zustand der Umströmung auf einen eintauchenden Körper ausübt, ermittelt sich aus dem statischen Auftrieb infolge verdrängtem Suspensionsvolumen und der auf den Körper übertragenen Schubkräfte. Bei geeigneten Verfüllbaustoffen handelt es sich in der Regel um stabile Suspensionen, für deren effektive Auftriebswirkung die Suspensionswichte und die wirksame Fließgrenze maßgebend sind.

Die wirksamen Fließgrenze $\Delta\tau_f$ wird als Differenz der gemessenen Fließgrenze τ_f und der Mindestfließgrenze $\tau_{0,min}$, die für den Nachweis der Stabilität der Suspension (*Saak et al., 2001*) ermittelt wird, berechnet.

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} \quad \text{vgl. Gl. 3.9}$$

Bei Berücksichtigung der vollen Suspensionswichte wird nur dieser Differenzbetrag $\Delta\tau_f$ für den Auftrieb maßgebend.

Für den konkreten Fall des umströmten Rohrs ergibt sich aus Gl. 6.1 für die Ermittlung der Wichte des Rohres:

$$\rho_{Rohr} = \frac{M_{Rohr}}{A_{Rohr} \cdot L_{Rohr}} \quad \text{vgl. Gl. 6.1}$$

mit:

$$\begin{aligned} M_{Rohr} &= \text{Masse des Rohres in [kg]} \\ L_{Rohr} &= \text{Länge des Rohres in [m]} \\ A_{Rohr} &= \text{Querschnittsfläche des Rohres in [m}^2\text{]} \end{aligned}$$

hieraus folgt:

$$\gamma_{Rohr} = \frac{M_{Rohr}}{\frac{d_{Rohr}^2}{4} \cdot \pi \cdot L_{Rohr} \cdot 100}$$

$$\gamma_{Rohr} = \frac{M_{Rohr}}{d_{Rohr}^2 \cdot L_{Rohr} \cdot 78,54}$$

mit:

M_{Rohr} = Masse des Rohres in [kg]

L_{Rohr} = Länge des Rohres in [m]

d_{Rohr} = Außendurchmesser des Rohres in [m]

Für eine möglichst unkomplizierte Ermittlung der Wichte des Rohres ist im Anhang 1.3 ein entsprechendes Diagramm zu finden.

Für die Berechnung der Auftriebskraft wird die Differenzwichte von Suspension und Rohr ermittelt:

$$\Delta\gamma_{Rohr} = \gamma_{Rohr} - \gamma_{Sus}$$

mit:

γ_{Sus} = Wichte der Suspension in $\frac{kN}{m^3}$

Hiermit errechnet sich die effektive Auftriebskraft gemäß Gl. 6.8 zu:

$$f_{A_{eff}} = r \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot \Delta\tau_f$$

Die Gleichung kann hinsichtlich einer einfacheren Auswertung umgestellt werden:

$$f_{A_{eff}} = \frac{d_{Rohr}}{2} \cdot \pi \cdot \frac{d_{Rohr}}{2} \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot \Delta\tau_f$$

$$f_{A_{eff}} = d_{Rohr} \cdot 0,79 \cdot d_{Rohr} \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 12 \cdot \Delta\tau_f$$

Mit Kenntnis der effektiven Auftriebskraft lassen sich Maßnahmen zur Auftriebssicherung zutreffend dimensionieren und die tatsächliche Belastung der Rohre während der flüssigen Grabenverfüllung ermitteln.

8.4 Nachweis der Auftriebssicherung der Rohrleitung

Fließfähige Verfüllbaustoffe versetzen die Rohrleitung temporär unter Auftrieb. Hinsichtlich einer entsprechenden Lagesicherung müssen daher sowohl Maßnahmen zur Auflagerung als auch zur Auftriebssicherung getroffen werden. Das Rohraulager dient der zeitlich begrenzten Lagesicherung sowie als Auflager und Auftriebssicherung des Rohres während der flüssigen Grabenverfüllung. Die Auftriebssicherung eignet sich somit zur nicht dauerhaften Sicherung des Rohres gegen Lageänderungen im Einbauzustand.

Die Lagesicherung ist gemäß „Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen“ (FGSV, 2010) so herzustellen, dass die Auflagerstabilität, Lagesicherheit sowie Setzungsfreiheit gewährleistet wird und die Herstellerangaben bezüglich des Baustoffes berücksichtigt werden. Dabei gilt es, die Lagerung an die Baustellenbedingungen anzupassen und alle Rohre in ausreichenden Abständen zu sichern.

Die Sicherung der Rohrleitung gegen Auftrieb kann nach den drei Prinzipien

- Ballastierung der Rohrleitung,
- Abschirmung des Rohres vor auftriebswirksamen Suspensionsdruck und
- Fixierung des Rohres durch Auflagerkonstruktionen

oder durch Maßnahmen erfolgen, die eine Kombination dieser drei Prinzipien darstellen.

8.4.1 Ballastierung der Rohrleitung

Die Wirksamkeit dieser Methode ist abhängig von der Rohrwichte und somit von Material sowie Durchmesser der Rohrleitung. Eine Ballastierung kann beispielsweise durch eine Wasserfüllung der Rohre oder Beschweren der Leitung mit Sandsäcken, Stahlträgern oder vergleichbare Maßnahmen erfolgen. Aussichtsreich sind solche Maßnahmen nur bei Leitungen mit einer entsprechend hohen Rohrwichte. Bei dünnwandigen Rohren großen Durchmessers wird diese Methode sinnvollerweise nur unterstützend angewandt.

Der Nachweis einer ausreichenden Ballastierung erfolgt durch den Vergleich der Gewichtskraft des Ballasts und der effektiven Auftriebskraft.

8.4.2 Abschirmung des Rohres vor auftriebswirksamen Suspensionsdruck

Um eine Leitung vor auftrieberzeugendem Suspensionsdruck abzuschirmen, können sogenannte Haltungsbanke angeordnet werden (Bild 148). Haltungsbanke bestehen in der Regel aus Verfüllmaterial plastischer Konsistenz und werden vorwiegend bei der Verwendung von Flüssigbodenmaterial eingesetzt. Damit eine ausreichende Auftriebssicherung gewährleistet werden kann, muss abhängig von der Rohrwichte ein Teil des Rohrstranges mit nicht mehr fließfähigem Material umgeben werden, welches den Flüssigkeitsdruck wirksam abschirmt.

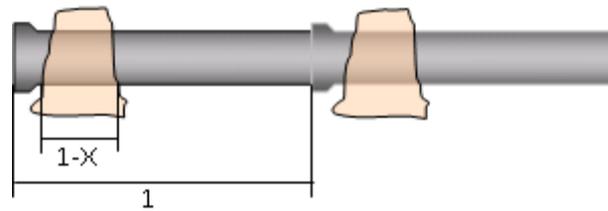


BILD 148: BEISPIELHAFTES AUSBAUEN EINER HALTUNGSBANK SOWIE SCHEMATISCHE DARSTELLUNG

Der Anteil der Rohrlänge, die abgedeckt werden muss, um die Auftriebswirkung weitestgehend zu verhindern, errechnet sich zu $(1-X)$. Für X gilt der Ansatz:

$$F_{Ares} = d_{Rohr} \cdot 0,79 \cdot d_{Rohr} \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 12 \cdot \Delta\tau_f$$

$$0 = d_{Rohr} \cdot 0,79 \cdot d_{Rohr} \cdot \gamma_{Rohr} - \gamma_{Sus} \cdot X - 12 \cdot \Delta\tau_f \cdot X$$

$$0 = d_{Rohr} \cdot \gamma_{Rohr} - \gamma_{Sus} \cdot X - 12 \cdot \Delta\tau_f \cdot X$$

$$d_{Rohr} \cdot \gamma_{Sus} \cdot X + 12 \cdot \Delta\tau_f \cdot X = d_{Rohr} \cdot \gamma_{Rohr}$$

$$X = \frac{d_{Rohr} \cdot \gamma_{Rohr}}{d_{Rohr} \cdot \gamma_{Sus} + 12 \cdot \Delta\tau_f}$$

$$X = \frac{\gamma_{Rohr}}{\gamma_{Sus} + \frac{12 \cdot \Delta\tau_f}{d_{Rohr}}}$$

Gl. 8.1

8.4.3 Fixierung des Rohres durch Auflagerkonstruktionen

Bei der Fixierung der Rohre durch Auflagerkonstruktionen bestimmt die Anordnung der Auflager das statische System für den Nachweis der Auflagerkräfte und der Rohrbelastung, wobei sich die maßgebende Streckenlast aus der effektiven Auftriebskraft ergibt.

Als Beispiele praktikabler Auflagerkonstruktionen zur Fixierung von Rohrleitungen seien an dieser Stelle die Rohrverlegehilfe von RSS® und die Methode der Rückverankerung in den Baugrund erwähnt.

8.4.3.1 RSS®-Rohrverlegehilfe

Bei der Verwendung der Rohrverlegehilfe wird die zeitliche Entwicklung der Auftriebswirkung auf das Rohr gemessen. Je nach Größe der gemessenen Kräfte im Stempel der Verlegehilfe wird der Zeitpunkt für den Rückbau der Verlegehilfe und anschließend des Grabenverbaus festgelegt. Bei Anwendung dieser Methode sind die Auswirkungen auf den Bauablauf zu berücksichtigen und der Umstand, dass

die Fließfähigkeit des Materials zum Zeitpunkt des Rückbaus des Grabenverbaus bereits eingeschränkt ist.

8.4.3.2 Rückverankerung

Bei der Methode der Rückverankerung wird ein Schraubpfahl in den Boden unterhalb der Grabensohle eingebracht, an dem schließlich eine Ringmutter befestigt wird. Durch die Ringmutter wird ein Stahlband gefädelt und um das Rohr geführt. Das Rohr selber kann auf Holzkeilen, Sandsäcken oder anderen geeigneten Unterstützungsstrukturen aufgelagert werden.

Vorteil dieser Art der Auftriebssicherung ist die vollständige Entkopplung der Lagesicherung des Rohres vom Verbausystem. Für einen reibungslosen Einbau der Pfähle ist je nach Bodenart ein Vorbohren erforderlich. Die eigentlichen Schraubpfähle werden anschließend mit einem Kraftschrauber in das Bohrloch eingeschraubt. Die Schraubpfähle eignen sich prinzipiell für alle Bodenarten, der Einbauaufwand kann jedoch je nach Bodenverhältnissen variieren und sollte vor Beginn der Baustelle überprüft werden.

Für eine überschlägige Bemessung der Zugpfähle ist im Anhang 1.4 ein Bemessungsdiagramm nach *Walz und Quarg (2000)* beigefügt.

8.5 Nachweis des suspensionsgestützten Grabens

Bei der Verwendung fließfähiger Verfüllmaterialien wird in Bezug auf den offenen Graben insbesondere der Nachweis der inneren Standsicherheit maßgebend.

Bei dem Nachweis der inneren Standsicherheit des offenen Grabens wird das Korngefüge des Bodens als Kugelpackung idealisiert, dessen Kugeln das Bestreben haben, aus der unverbauten Grabenwand herauszurollen und dann in dem suspensionsgestützten Graben zu versinken. Analog zu dem Nachweis der Suspensionsstabilität wird die Mindestfließgrenze der Suspension bestimmt, bei der ausreichend große Schubkräfte auf das Korngerüst übertragen werden können, um ein Absinken der Kugeln in der Stützsuspension zu verhindern.

Aus Gleichung 3.16 ergibt sich insgesamt der folgende Nachweis für die innere Standsicherheit:

$$\tau_{F,erf} \geq \Delta\gamma_{Korn} \cdot \gamma_{Korn}$$

Wird für Suspensionen mit porenfreien mineralischen Zuschlägen die Gleichung verallgemeinernd angesetzt,

$$\gamma_{Korn-Roh} = 27,2 \frac{kN}{m^3}$$

$$\gamma_{Fluid} = 11,0 \frac{kN}{m^3}$$

ergibt sich für die Differenzwichte von Suspension und Zuschlag:

$$\Delta\gamma_{Korn} = 27,2 - 11,0 \cdot 1.000 = 16.200 \frac{N}{m^3}$$

Der Nachweis vereinfacht sich zu:

$$\tau_{F,erf} \geq \Delta\gamma_{Korn} \cdot r_{Korn}$$

$$\tau_{F,erf} \geq 16.200 \cdot \frac{d_{Korn}}{2} \frac{N}{m^2}$$

$$\tau_{F,erf} \geq 8.100 \cdot d_{Korn} \frac{N}{m^2}$$

Maßgebend wird der Nachweis in der vorgeschlagenen Form bei nichtbindigen Böden.

Für den Nachweis ist der Korndurchmesser d_{90} , also die Maschenweite bei 90% Siebdurchgang, maßgebend.

$$\tau_{F,erf} \geq 8.100 \cdot d_{90} \frac{N}{m^2}$$

Für eine möglichst unkomplizierte Ermittlung der erforderlichen Fließgrenze ist im Anhang 1.3 ein entsprechendes Diagramm zu finden.

8.6 Anwendungsbeispiel

Die Anwendung des Vertikalpendelgeräts und der Nachweis der erforderlichen Suspensionseigenschaften werden nachfolgend am Beispiel der mit dem Material der Firma TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH & Co. KG durchgeführten Baustellenversuche in der Schluchtstraße in Wuppertal demonstriert.

Eine detaillierte Vorgehensweise zur Bestimmung der Scherfestigkeit von fließfähigen Verfüllbaustoffen ist dem Anhang 1.1 beigefügt.

8.6.1 Messung der Suspensionswichte

Das in Kapitel 5 ausführlich beschriebene Vertikalpendelgerät kam an der oben genannten Probearbeitsstelle in Wuppertal zum Einsatz. Der Tauchkörper bzw. das Flügelpendel wurde in einen mit Suspension gefüllten Behälter abgesenkt. Der Behälter wird mit der Suspensionsprobe auf einer Waage positioniert (Bild 149).



BILD 149: GEWICHTSMESSUNG DER SUSPENSION MIT EINGETAUCHTEM FLÜGELPENDEL

Nachfolgend wird die Bestimmung der Suspensionswichte anhand entsprechender Diagramme zur Auswertung (Bild 150) näher dargestellt. Der Eingangswert umfasst das gemessene Gewicht der Suspension, abzüglich des Gewichts des Probenbehälters. Mit dem Eintrag dieses Wertes kann bei einem Probenvolumen von 2.000 cm^3 als Ergebnis der Suspensionswichte (Ausgangswert) im Diagramm der Wert $19,80 \text{ kN/m}^3$ abgegriffen werden.

Diagramm Eingangswert = gemessenes Gewicht – ohne Behälter – 3950 g
 Ausgangswert = Suspensionswichte 19,80 kN/m³

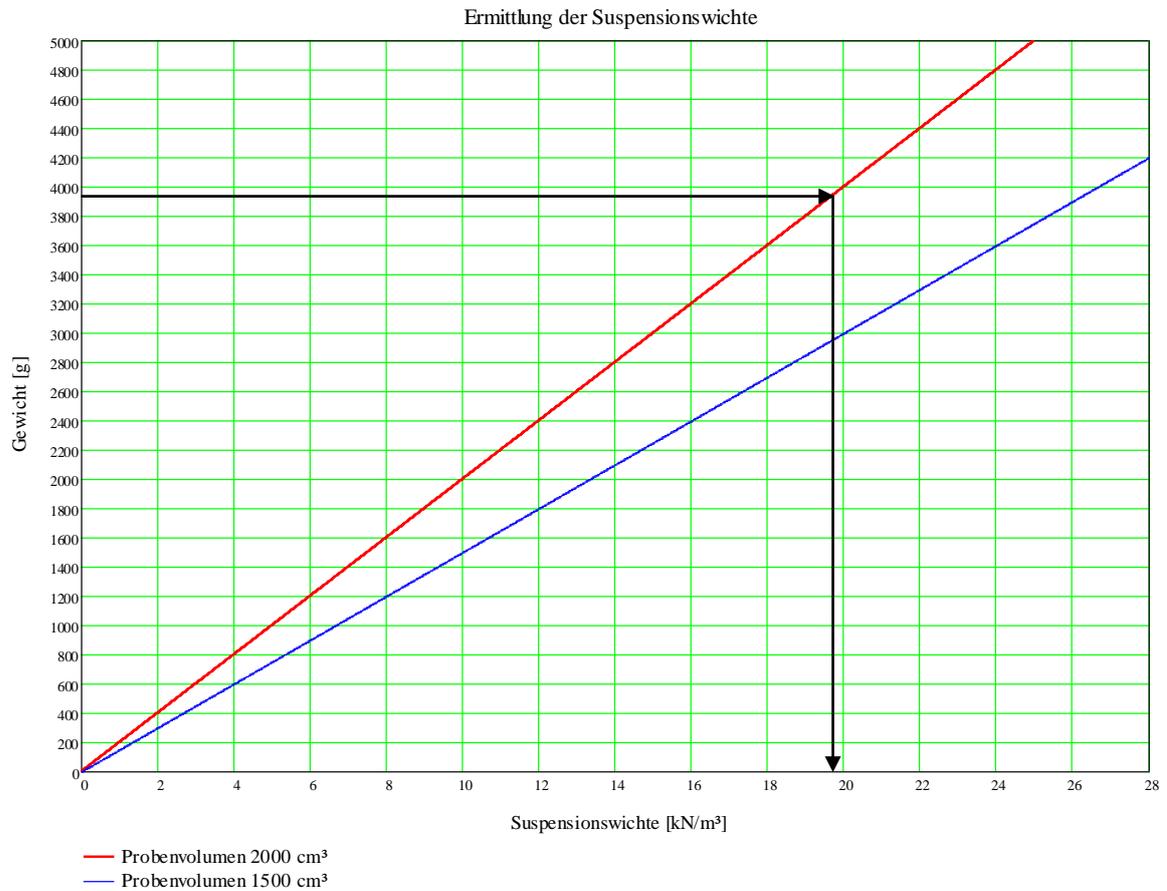


BILD 150: AUSWERTEDIAGRAMM FÜR DIE ERMITTLUNG DER SUSPENSIONSWICHTE

8.6.2 Messung der Fließgrenze

Für die Messung der Fließgrenze wurde das Flügelpendel verwendet. Die während des Versuchs auf der Waage (Bild 151) angezeigte maximale Änderung der Gewichtskraft ist die Eingangsgröße für das Auswerte-Diagramm (Bild 152).

Der Eingangswert umfasst somit die gemessene maximale Gewichtsabnahme. Mit dem Eintrag dieses Wertes kann bei dem Flügelpendel als Ergebnis der Fließgrenze (Ausgangswert) im Diagramm der Wert 170 N/m² abgegriffen werden.



BILD 151: VERTIKALPENDELGERÄT IM BAUSTELLENEINSATZ

Diagramm Eingangswert = gemessene maximale Gewichtsabnahme = 144 g
 Ausgangswert = Fließgrenze = 170 N/m²

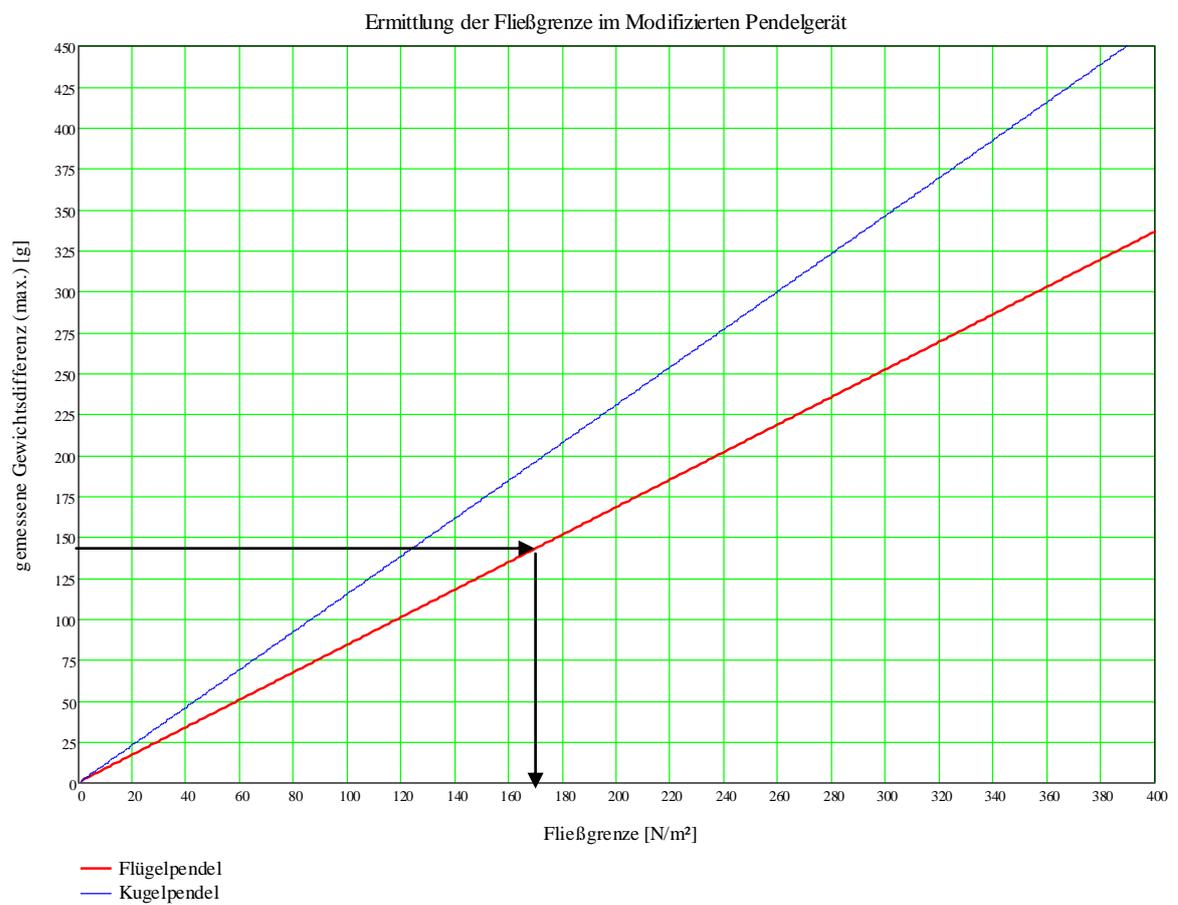


BILD 152: AUSWERTEDIAGRAMM FÜR DIE ERMITTLUNG DER FLIEßGRENZE

8.6.3 Nachweis der Stabilität der Suspension und Ermittlung der auftriebswirksamen Fließgrenze

Das Größtkorn der verwendeten Suspension wird von der Herstellerfirma TER Transportbeton Ennepe-Ruhr GmbH mit 4 mm angegeben.

Für die Wichte der tragenden Mehlkornsuspension (Fluid) wird $\gamma_{\text{Fluid}} = 11 \text{ kN/m}^3$ angesetzt. Zusammen mit dem Durchmesser des Größtkorns von $d_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$ ergibt sich durch Auswerten des Diagramms eine erforderliche Fließgrenze von $\tau_{0,\text{min}} = 86 \text{ N/m}^2$ für eine stabile Suspension.

Diagramm Eingangswert 1 = maximaler Korndurchmesser 4 mm
 Eingangswert 2 = Wichte der Mehlkornsuspension (Fluidwichte) 11 kN/m³
 Ausgangswert = Mindest-Fließgrenze 42 N/m²

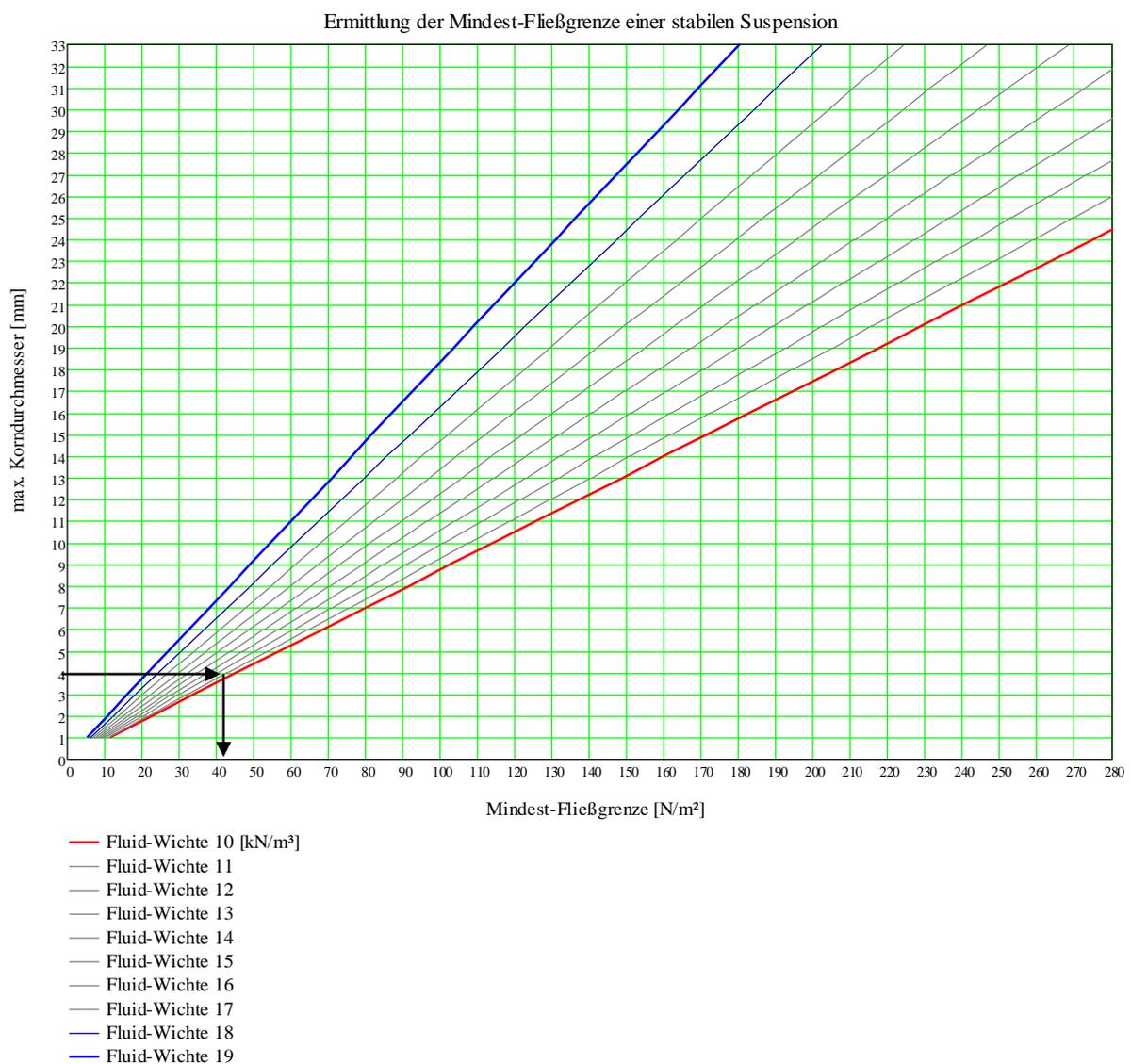


BILD 153: AUSWERTEDIAGRAMM FÜR DIE ERMITTLUNG DER MINDEST-FLIEßGRENZE

Da die gemessene Fließgrenze mit $\tau_f = 170$ größer ist als die errechnete Mindestfließgrenze, handelt es sich bei dem untersuchten Material um eine stabile Suspension.

Die auftriebswirksame Fließgrenze $\Delta\tau_f$ entspricht der Differenz von gemessener Fließgrenze und Mindestfließgrenze der stabilen Suspension

$$\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min} = 170 - 42 = 128 \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta\tau_f = 0,128 \frac{kN}{m^2}$$

8.6.4 Nachweis der Auftriebssicherung

Für den Nachweis der Auftriebssicherheit wird zusätzlich zur auftriebswirksamen Fließgrenze der Suspension auch die Rohrwichte der verwendeten Rohrleitung ermittelt.

Die Rohrwichte lässt sich aus dem folgenden Diagramm aus Rohrgewicht je Meter Rohrlänge und Außendurchmesser ermitteln.

Diagramm Eingangswert 1 = Rohrgewicht 217 kg/m
 Eingangswert 2 = Außendurchmesser des Rohres 0,44 m
 Ausgangswert = Rohrwichte $\gamma_{\text{Rohr}} = 14 \text{ kN/m}^3$

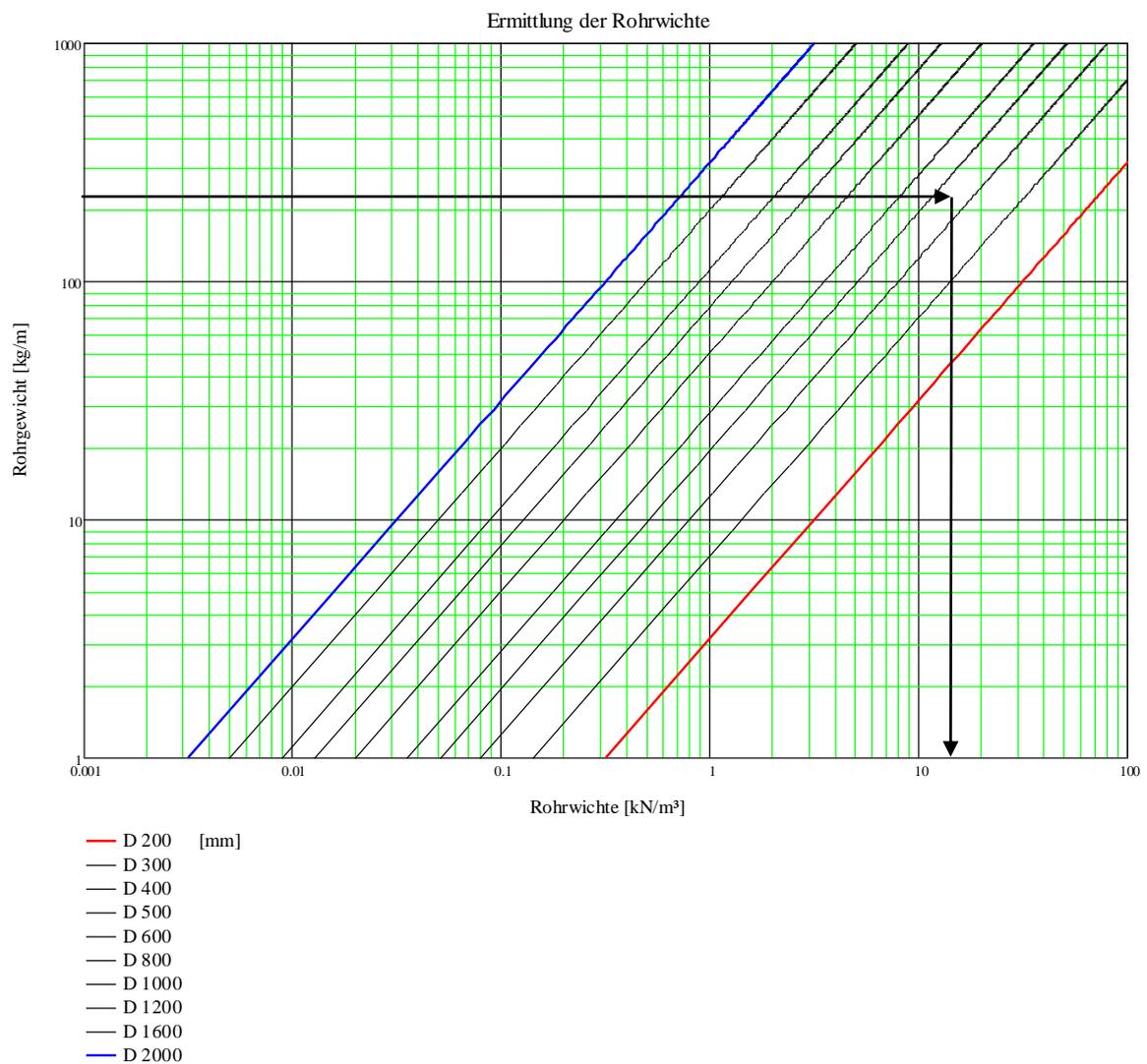


BILD 154: AUSWERTEDIAGRAMM ZUR ERMITTLUNG DER ROHRWICHTE

Anschließend wird die Differenz der Raumgewichte des Rohres zur Wichte der Suspension berechnet. Die Wichte der Suspension wurde zu $\gamma_{\text{Suspension}} = 19,8 \text{ kN/m}^3$ ermittelt.

Daraus ergibt sich die Differenzwichte von Rohr und Suspension zu:

Für den statischen Auftrieb ergibt sich:

$$\Delta\gamma_{\text{Rohr}} = \gamma_{\text{Rohr}} - \gamma_{\text{Sus}}$$

$$\Delta\gamma_{\text{Rohr}} = 14,0 - 19,8 = -5,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Die effektive Auftriebskraft ergibt sich insgesamt zu:

$$f_{A_{eff}} = r_{Rohr} \cdot \pi \cdot r_{Rohr} \cdot \Delta\gamma_{Rohr} - 6 \cdot \Delta\tau_f$$

$$f_{A_{eff}} = \frac{0,44}{2} \cdot \pi \cdot \frac{0,44}{2} \cdot -5,8 - 6 \cdot 0,128 = -1,41 \frac{kN}{m}$$

8.6.4.1 Auftriebssicherung durch Ballast

Eine Wasserfüllung des Rohrquerschnittes erhöht das Gewicht des Rohres um

$$f_{Rohr-F\u00fcllung} = \frac{0,3^2}{4} \cdot \pi \cdot 10,0 = 0,71 \frac{kN}{m}$$

$$f_{resultierend} = f_{Rohr-F\u00fcllung} + f_{A_{eff}} = 0,71 - 1,41 = -0,70 \frac{kN}{m}$$

und gen\u00fcgt somit nicht, um das Betonrohr DN 300 ausreichend gegen Auftrieb zu sichern.

8.6.4.2 Auftriebssicherung durch Haltusb\u00e4nke

F\u00fcr das Betonrohr DN 300 ergibt sich gem\u00e4\u00df Bild 155 ein abzudeckender Anteil des Rohrstranges von:

$$X = \frac{\gamma_{Rohr}}{\gamma_{Suspension} + \frac{12 \cdot \Delta\tau_f}{d_{Rohr}}}$$

$$X = \frac{14,00 \frac{kN}{m^3}}{19,80 \frac{kN}{m^3} + \frac{12 \cdot 0,128 \frac{kN}{m^2}}{0,44 m}} = 0,60$$

$$1 - X = 1 - 0,60 = 0,40$$

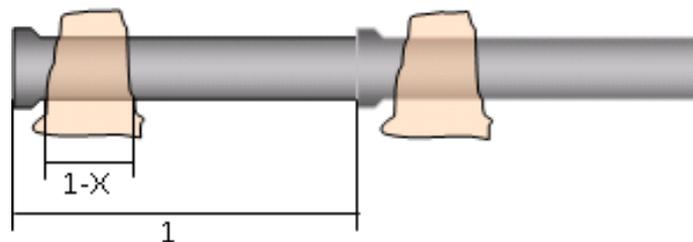


BILD 155: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER HALTUSBANK

F\u00fcr eine ausreichende Auftriebssicherung durch Abschirmen der Rohrleitung vor Suspensionsdruck, muss im vorliegenden Beispiel rund 2/5 der Rohrl\u00e4nge von Auflagerb\u00e4nken umschlossen werden. Das Gewicht der Auflagerb\u00e4nke oberhalb der Rohrscheitel wird bei der Berechnung – im Sinne eines konservativen Ansatzes – nicht als zus\u00e4tzliche Auflast ber\u00fccksichtigt.

8.6.5 Nachweis des Suspensionsgestützten Grabens

Beispielhaft soll für einen typischen groben Kiesboden die minimale Fließgrenze zur Gewährleistung der inneren Standsicherheit des Grabens ermittelt werden.

Für einen groben Kies kann der typische d_{90} -Wert bei 32,5 mm liegen. Hieraus errechnet sich eine minimale Fließgrenze von:

$$d_{90} = 32,5 \text{ mm} \rightarrow r_{Korn} = 16,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\gamma_{Korn-Roh} = 27,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_{Fluid} = 11,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta\gamma_{Korn} = 27,2 - 11,0 \cdot 1.000 = 16.200 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\tau_{F,erf} \geq 16.200 \cdot 0,01625 = 263 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\tau_{F,erf} \geq 8.100 \cdot d_{Korn} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Dieser Wert wird nicht von allen Verfüllmaterialien, die bei der Probebaustelle in der Schluchtstraße eingebaut wurden, bereits im Lieferzustand erreicht. Eine Stunde nach dem Einbau in den Graben kann für alle Baustoffe von einer ausreichenden Fließgrenze ausgegangen werden. Dieser Aspekt demonstriert die Bedeutung der Fließgrenze für die Standsicherheit des offenen Grabens bei grobkörnigen Böden. In diesen Fällen ist mit dem Hersteller vorab ein ausreichender τ_f -Wert im Lieferzustand zu vereinbaren. Des Weiteren ist die zeitliche Entwicklung der Fließgrenze zu beobachten und der Rückbau der Grabensicherung entsprechend gegebenenfalls zu verzögern.

Diagramm Eingangswert 1 = Korndurchmesser bei 90%-Siebdurchgang, $d_{90} = 32,5$ mm
Ausgangswert = Mindestfließgrenze $\tau_{f,min} = 263$ N/mm²

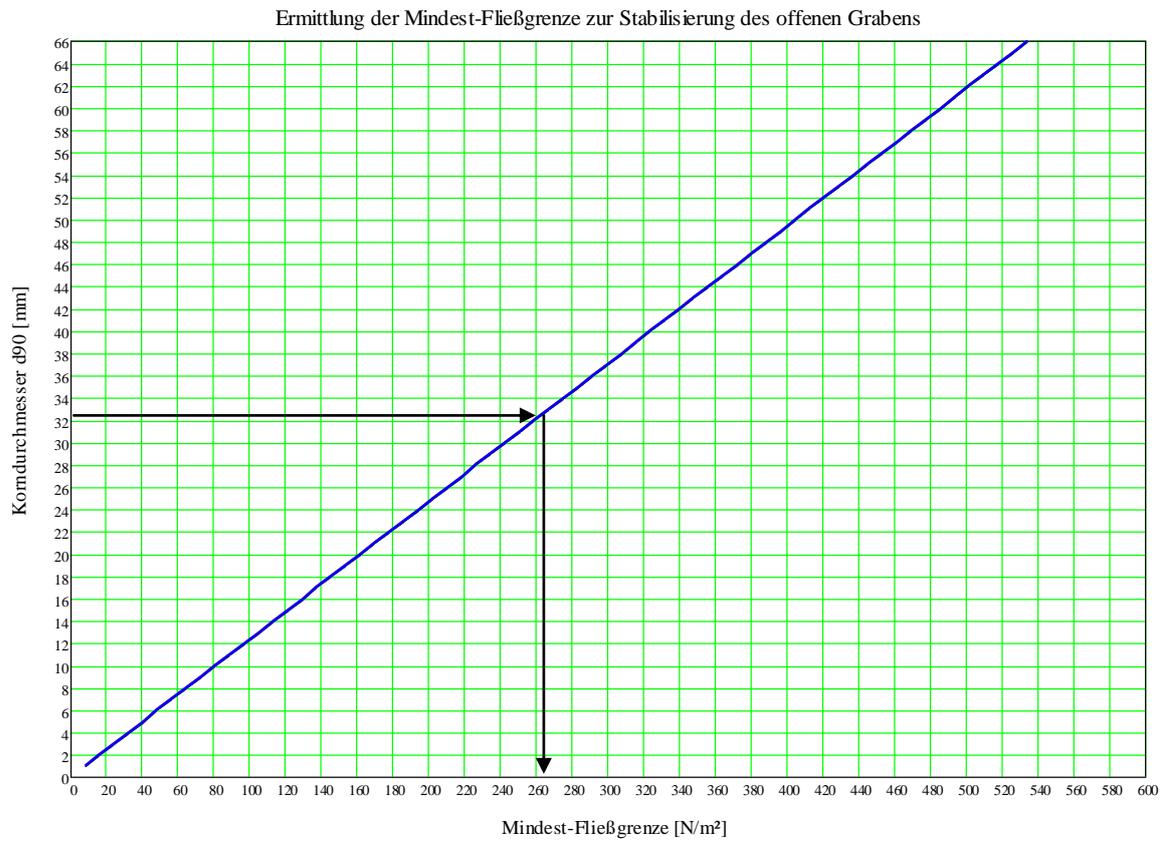


BILD 156: AUSWERTEDIAGRAMM ZUR ERMITTLUNG DER FLIEßGRENZE

9 Zusammenfassung

Die problemlose Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung setzt einen sicheren Umgang mit dem fließfähigen Verfüllbaustoff auf der Baustelle voraus. In der Praxis und in den zurzeit gültigen Vorschriften sowie Empfehlungen bestehen hierzu noch Unsicherheiten. Da verbindliche Regelungen und Bemessungsgrundlagen weitgehend fehlen, werden im vorliegenden Bericht zunächst die Grundlagen für das Stoffverhalten hochkonzentrierter Suspensionen im Allgemeinen und fließfähiger Verfüllbaustoffen im Besonderen betrachtet.

Die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung hat sich weiterhin aufgrund der höheren Kosten des Flüssigbodens selbst gegenüber konventioneller Baustoffe noch nicht flächendeckend durchgesetzt, jedoch liegt das Potential des selbstverdichtenden Verfüllbaustoffs insbesondere in seiner Nachhaltigkeit und somit in der Wirtschaftlichkeit der Gesamtbaumaßnahme. Es sind erhebliche Kosteneinsparungen u. a. durch verkürzte Bauzeiten, Wiederverwendung von Bodenaushüben sowie geringere Instandhaltungskosten infolge der idealen Bettungsverhältnisse und dem Wegfall der mechanischen Verdichtung. Vor allem in urbanen Räumen respektive in Bereichen von komplizierten Leitungsknotenpunkten bzw. Engpässen ergeben sich wesentliche Vorteile bei der Anwendung fließfähiger Verfüllbaustoffe.

Im Rahmen von Experimenten und Laborversuchen werden die wesentlichen Mechanismen der flüssigen Grabenverfüllung untersucht und Berechnungsansätze zur quantitativen Beschreibung des Suspensionsverhaltens, insbesondere hinsichtlich der Stabilität, der Auftriebswirkung und dem Stützvermögen der Suspension im offenen, unverbauten Graben entwickelt.

Neben der Wichte wird die Fließgrenze der Suspension als maßgebender Parameter für deren Eigenschaften identifiziert und da baustellengeeignete Messverfahren hierfür nicht verfügbar sind, wird ein einfaches Gerät zur Ermittlung der Fließgrenze entwickelt und erprobt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen kann die Stabilität von Suspensionen beurteilt, eine Auftriebsicherung dimensioniert, Belastungszustände der Rohre beim Einbau ermittelt und schließlich die Standsicherheit des offenen, unverbauten Grabens nachgewiesen werden.

Die im ersten Teil des Abschlussberichtes vorgestellten Versuche und Messungen sowie das neue Vertikal-Pendelgerät werden im weiteren Verlauf eingehend beschrieben und dokumentiert. Der letzte Teil der Ausführungen enthält eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung zur Messung der Fließgrenze sowie Diagramme zur unkomplizierten Auswertung der Ergebnisse.

In kleinmaßstäblichen Laborversuchen an der Universität Wuppertal und der Hochschule Bochum wurde ein Messverfahren zur Ermittlung der Fließgrenze hochkonzentrierter Suspensionen erprobt.

Die Versuche wurden exemplarisch an dem Material RSS[®]-Flüssigboden des Herstellers ENREBA Neuss GmbH durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurde das Originalrezept zur Herstellung des Verfüllmaterials variiert, um den Einfluss der Rezeptur auf die Suspensionseigenschaften und die korrekte Erfassung durch das Messgerät zu überprüfen. Hinsichtlich der Referenzmethode zur Messung der Fließgrenze diente eine Laborflügelsonde als Standardgerät.

Als Ergebnis der Untersuchungen lässt sich die generelle Eignung des neu konzipierten Vertikalpendelgerätes als baustellentaugliche Messvorrichtung für den untersuchten Messbereich feststellen.

Bei den durchgeführten Variationen der Rezeptur des Verfüllbaustoffes zeigte sich, dass es praktisch nicht möglich ist, einzelne Eigenschaften der Suspension, wie z. B. die Auftriebswirksamkeit, gezielt zu beeinflussen ohne gleichzeitig weitere - ungewollte - Änderungen des Suspensionsverhaltens (bspw. die Stabilität) zu bewirken.

In großmaßstäblichen Versuchen wurden die Berechnungsansätze zur effektiven Auftriebswirkung von Suspensionen während der flüssigen Grabenverfüllung durch Messungen überprüft und bestätigt.

Im Rahmen von Baustellenversuchen konnte schließlich die Praxistauglichkeit des Messgerätes überprüft und die Auftriebskräfte auf den zu verlegenden Kanal beim Einbau des flüssigen Verfüllmaterials gemessen werden.

Die Messung der Fließgrenze kann durch eine Person problemlos und schnell durchgeführt werden. Eine vorhandene Netzspannung ist nicht erforderlich. Das Gerät kann an beliebigen Orten aufgestellt werden, wobei darauf zu achten ist, dass dieser Ort weitgehend erschütterungsfrei und eben sein sollte. Ein provisorisches Baubüro eignet sich nur bedingt, sofern durch Personenverkehr Vibrationen erzeugt werden.

Auftretende Erschütterungen können zu einer vorzeitigen Bewegung des Flügels in der Suspension führen, wodurch die Messwerte eine zu geringe Fließgrenze der Suspension ausweisen.

Im Rahmen des Baustelleneinsatzes zeigten sich bei dem verwendeten Gerät Einschränkungen hinsichtlich des Messbereiches. Während die Messungen an Verfüllbaustoffe mit normierten Zuschlägen unproblematisch verliefen, kam das Gerät bei der Untersuchung von älteren Flüssigbodenproben an die Grenzen des Messbereiches.

Für den Einsatz des Gerätes auf der Baustelle „Schluchtstraße“ in Wuppertal erwies sich das Gerät als tauglich. Auch der Messbereich war für den eigentlichen Zweck der Überprüfung der Suspensionsparameter bei Anlieferung des Materials kurz vor dem Einbau ausreichend, da zu diesem Zeitpunkt die Fließgrenze der Suspension deutlich unterhalb der Obergrenze des Messbereichs von 600 N/m^2 liegen sollte.

Eine Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Fließgrenze, wie dies im Rahmen der Baustellenbegleitung durchgeführt wurde, wird in der Praxis keine große Bedeutung haben. Gleichwohl lässt sich im Bedarfsfall durch einfache Modifikationen, wie z. B. eine Vergrößerung von Zylinder und Kolben, zukünftig der Messbereich des Gerätes vergrößern, ohne die Funktion des Gerätes zu beeinträchtigen.

10 Literatur

Arsic I.; (2009): Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden. Bochum, Institut für Grundbau und Bodenmechanik

Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K. (1989): An Introduction to Rheology. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Bendix R. (1999): Chemie für Bauingenieure. Teubner Verlag Stuttgart und Leipzig

Berger W. (2009): WBM Weimarer Boden-Mörtel: Erfahrungsbericht. FITR - Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V.

DAfStb (2003): Richtlinie Selbstverdichtender Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.

DIN 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18136 (2003): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN 18300 (2010): VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Erdarbeiten. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4126 (2008): Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4127 (1986): Erd- und Grundbau, Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten, Anforderungen, Prüfverfahren, Lieferung, Güteüberwachung. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 12350-5 (2009): Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 12350-8 (2010): Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 12350-9 (2010): Prüfung von Frischbeton – Teil 9: Selbstverdichtender Beton - Auslauftrichter-versuch. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 12350-10 (2010): Prüfung von Frischbeton – Teil 12: Selbstverdichtender Beton – L-Kasten-Versuch-Versuch. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 12350-12 (2010): Prüfung von Frischbeton – Teil 12: Selbstverdichtender Beton – Blockiering-Versuch. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 1610 (2010): Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 459-2 (2001): Baukalk - Teil 2: Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DWA-A 139 (2009): Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.

Einstein A. (1906): Eine neue Bestimmung der Moleküldimension. In: Analen der Physik, 19, S. 289-306

Einstein A. (1911): Eine neue Bestimmung der Moleküldimension. In: Analen der Physik, 34, S. 591-592

Feickert R. (2008): Selbstverdichtendes Verfüllmaterial – Vielfältige Vorteile in der Praxis. bi Umwelt-Bau: 4 (08), S. 33-36

Ferraris C. F., de Larrard F. (1998): Testing and modelling of fresh concrete rheology. National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 8094

FGSV (2010): Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Gerlach J. (1999): Grundbau Teil 2 – Baugruben und Gründungen. B.G. Teubner Stuttgart-Leipzig

Gropengießer A. J. (2010): Verfahren zur Eignungsprüfung von Flüssigboden für Kanalgrabenverfüllungen. Diplomarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal, unveröffentlicht. Günthert F. (2006): Projekterfahrung mit SVM. Steinzeug-Information 2006, S. 35-37. Fachverband Steinzeug e.V.

Haist M. (2005): Zur Rheologie und dem physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen. Karlsruher Reihe Massivbau, Bautechnologie, Materialprüfung, Heft 66

Hillmann C. (2009): Innovative Lösung in der Lübecker Altstadt, bi UmweltBau 2 | 09

Hillmeier B., Buchenau G. (2001): Kapitel 3: Rheologie. In: Reinhardt H.W. (Hrsg.) et al. Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB), DAfStb Heft 516, Beuth Verlag, Berlin

Hochschule Bochum – Bochum University of Applied Sciences (2010): Untersuchung der Mischungsstabilität von fließfähigen Verfüllbaustoffen. Unveröffentlicht

Kammerdiener H. (2010): Belastung und Verformung von Kunststoffrohren in sandigem Boden. Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen

Kisselbach G. (1999): Projektstudie über die Verfüllung von Künetten. Magistrat der Stadt Wien, Magistratabteilung 22 - Umweltschutz

ONR 23131 (2005): Verfüllung mit stabilisierten, fließfähigen Verfüllmaterialien (SVM). Kriterienkatalog für stabilisierte Verfüllmaterialien

Österreichisches Patent AT Nr. 374163 (1984): Gießfähige Mischungen, vorzugsweise zum Verfüllen von Künetten, Gräben und dgl.

Rehau (2009): <http://www.rehau.de/beitrag04072009.shtml>

S&P GmbH: Stein R., Brauer A., Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH (2005): Einsatz von hydraulisch gebundenen Verfüllbaustoffen zur Rückverfüllung von Leitungsgräben im Kanalbau. 23.02.2005, Bochum

Saak A. W., Jennings H. M., Shah S. P. (2001): New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete. ACI Materials Journal, 98 (2001), No. 6, S. 429-439

Schade H.-W. (2010): Bodenbehandlung in der neuen ZTVE-StB09 sowie in den neuen Merkblättern. 5. Fachtagung Zementstabilisierte Böden, Chemnitz, 27. Januar 2010. GBB-Gütegemeinschaft Bodenverbesserung Bodenverfestigung

Simon J., Middendorf B., Kimm-Friedenberg S. (2012): Flüssigboden – ein nachhaltiger und wirtschaftlicher Verfüllbaustoff. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 59. Jahrgang, Heft-Nr. 11

Stolzenburg, O. (2009): Fluch oder Segen eines neuen Verfahrens – Was ist Flüssigboden wirklich? LOGIC Logistic Engineering GmbH. bi UmweltBau: 1 (09), S. 56-61

Tanner R. I. (2000): Engineering Rheology. Oxford engineering science series 52 Oxford University Press, New York, 2nd edition

Triantafyllidis T., Arsic I.(2009): Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 40, ISSN 1439-9342

TP-BF StB Teil B 8.3 (2003): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau

Walz B. (1989): Grundlagen der Flüssigkeitsstützung von Erdwänden. 4. Christian Veder Kolloquium, Graz

Walz B., Quarg J. (2002): Die Grenztragfähigkeit von Zugpfählen und Zugpfahlgruppen in Sand. Bautechnik 79 (2002), Heft 1

Weiß F. (1971): Schlitzwandbauweise. Schriftenreihe der Tiefbau-Berufsgenossenschaft, H. 7

Wille Geotechnik (2010): www.wille-geotechnik.com/129.0.html?&L=0

Wüstholtz T. (2005): Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation an der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.