

Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust

vom Fachbereich D,
Abteilung Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation

von
Christian Thienert, Düsseldorf

Dissertation eingereicht am: 13.10.2010

Datum der mündlichen Prüfung: 28.03.2011

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort
Bergische Universität Wuppertal

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thewes
Ruhr-Universität Bochum

Kurzfassung

Die Dissertation befasst sich mit der Verwendbarkeit und den Eigenschaften von zementfreien Mörteln zur Ringspaltverpressung beim Tunnelbau im Schildvortriebsverfahren mit Tübbingausbau. Vor dem Hintergrund, dass diese Verpressmaterialien in Abhängigkeit der Baugrundeigenschaften sehr zeitnah, d.h. mitunter schneller als ein konventioneller Zementmörtel, eine Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung durch Auspressen von Porenwasser in den umgebenden Baugrund erfahren können, sind mit dieser Art von Mörtel Vorteile gegenüber zementgebundenen Baustoffen zu erwarten. Die Untersuchungen zielen darauf ab, die unterschiedlichen Anforderungen an ein solches Material im Zuge der einzelnen Prozessschritte (Pumpförderung, Drainierung und Bettung der Tübbingröhre) genauer definieren zu können.

Dabei wird zunächst der Einfluss der Ortsbruststützung bei Tunnelvortriebsmaschinen mit Flüssigkeitsstützung erfasst und eine hybride Modellvorstellung der Stützdruckübertragung entwickelt. Diese berücksichtigt sowohl den Mechanismus der Filterkuchenausbildung wie sie in feinkörnigen Böden dominiert als auch die Eindringung einer Suspension mit Stagnation im Porenraum des Bodens.

Für die Festlegung von Materialanforderungen zur Gewährleistung der Pumpfähigkeit werden zunächst Pumpversuche im Zuge des Befüllens der Förderleitung durchgeführt und bodenmechanische Eigenschaften von sogenannten Stopfern betrachtet. Es folgen rheologische Oszillations-Messungen, mit denen der Einfluss des Blutens der zementfreien Ringspaltmörtel beobachtet werden soll. Schließlich werden Indexwerte zur Gewährleistung des Wiederanlaufens des Fördersystems nach ausgedehnten Stillstandszeiten ermittelt.

Die Beobachtung des Drainierungsvorganges erfolgt mittels eines modifizierten Filterpressenversuchs, in dem maßgebende Kennwerte des Drainierungsvorgangs zur quantitativen Beschreibung ermittelt werden können. Anhand eines rechnerischen Modells wird herausgestellt, welchen Anforderungen ein solches Verpressmaterial bei den speziellen örtlichen Baugrundeigenschaften genügen muss, um zielsicher eingesetzt werden zu können. Darüber hinaus werden Empfehlungen bezüglich des Mischungsentwurfs eines solchen Mörtels erarbeitet und dessen ökologischen Auswirkungen bewertet.

Abschließend erfolgt eine bodenmechanische Charakterisierung des verfestigten Ringspaltmörtels als künstliches Bodenmaterial und eine Abschätzung der Auswirkungen auf das Bettungsverhalten für die Tübbingröhre.

Zusammenfassend kann dargestellt werden, dass ein zementfreies Ringspaltmaterial bei geeignetem Umgebungsboden gleichwertig zu einem konventionellen Zementmörtel anzusehen ist und mitunter sogar eine höhere Früh-Bettungswirkung aufweist, die zur Vermeidung von Tübbingschäden von Bedeutung sein kann.

Abstract

The present thesis considers the applicability of grout mortar without any cement for tail gap grouting during hydro-shield tunnelling with segmental lining. This mortar develops a certain strength and a reasonable stiffness only by expelling porewater into the voids of the surrounding soil of the tunnel. According to this fact, the aim of the present investigation is to define the different requirements for this kind of grouting material during all the several steps of the different tunnelling process phases (including pumping, draining and bedding of the tunnel lining).

First the influence of a hydraulic face support pressure is regarded and a hybrid model of pressure transmission for bentonite slurries as supporting fluid is developed which takes into account the formation of a filtercake as well as a possible penetration depth of slurry into the soil.

In order to determine the material requirements to ensure pumpability, several pumping tests were carried out, including the description of geotechnical properties of blockages. In the following, rheological oscillation tests were used to quantify bleeding behaviour of such grout mortar and to define applicable index values to ensure the trouble-free restart of the grouting process after extended shutdown periods.

A modified filter-press set-up is presented in order to collect characteristic parameters of the draining process within the grout mortar. By means of different geotechnical models, the influences of soil properties around the tunnel in this process are rated and recommendations on the composition recipe of a well suited grout mortar are given. In addition possible ecological effects due to the expelled pore water as effected by the mortar ingredients are evaluated.

In a final step soil mechanical investigations on this drained mortar as some kind of type of artificial soil are executed and consequences on the bedding behaviour of the tunnel are presented.

To summarize it can be stated that tail gap grouting with cement free mortar can be at least as effective as using conventional cement based materials, provided that suited surrounding soil conditions with sufficient permeability are given. In certain cases a higher stiffness can be achieved already in early stages, compared to a conventional cement based mortar, which can be important to avoid damages in the lining segments.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 Einführung	1
1.1 Schildvortrieb	1
1.2 Ringspaltverpressung	3
1.2.1 Bedeutung und Begriffe	3
1.2.2 Entstehung des Ringspalts	3
1.2.3 Notwendigkeit der Ringspaltverpressung	4
1.2.4 Verfüllmethode für den Ringspalt	6
1.2.5 Maschinentechnische Einrichtungen	8
1.2.6 Qualitätskontrolle	10
1.3 Materialien für die Ringspaltverpressung	12
1.3.1 Ein-Komponenten-Mörtel	13
1.3.2 Zwei-Komponenten-Systeme	15
1.3.3 Sonderlösungen	16
1.4 Schäden am Tunnelausbau	18
2 Stand der Forschung	21
2.1 Feldmessungen	21
2.1.1 Panchiao-Linie in Taipeh	22
2.1.2 Okawa-Tunnel in Osaka	23
2.1.3 Weitere Ergebnisse aus Japan	23
2.1.4 Niederländische Tunnelprojekte	24
2.2 Modellversuche	25
2.3 Lagesicherheit der Tunnelröhre im Bauzustand	27
2.4 Filtration des Ringspaltmörtels	30
2.5 Strukturmechanische Untersuchungen	32
2.6 Baustofftechnologische Betrachtungen	34

3	Motivation, Ziele und Vorgehensweise	35
3.1	Motivation	35
3.1.1	Logistische Abhängigkeiten	35
3.1.2	Reduktion von Tübbingschäden	36
3.2	Lösungsansatz	37
3.3	Ziele	38
3.4	Vorgehensweise	39
4	Einfluss der Ortsbruststützung	41
4.1	Allgemeines	41
4.2	Erforderliche Stützdruckkraft	41
4.3	Stützdruckübertragung	44
4.3.1	Membranbildung	45
4.3.2	Suspensions-Stagnation	51
4.4	Suspensionsbedingte Einflüsse auf die Grenzflächenbildung	57
4.4.1	Separationstechnik	58
4.4.2	Randbedingungen in der Abbaukammer	64
4.4.3	Bentonitsuspensionen im stark wasserdurchlässigen Baugrund	68
4.5	Hybride Modellvorstellung der Stützdruckübertragung	69
4.5.1	Modellansatz	70
4.5.2	Numerische Umsetzung	71
4.5.3	Typische Berechnungsergebnisse	72
4.6	Schlussfolgerungen	73
5	Frischmörteleigenschaften	75
5.1	Pumpfähigkeit von Betonen und Mörteln	75
5.1.1	Theorie der Rohrströmung von Dickstoffen	76
5.1.2	Prüfung der Fließfähigkeit	79
5.1.3	Materialeigenschaften zur Sicherstellung der Pumpfähigkeit	81
5.1.4	Bildung von Stopfern	82
5.2	Eigene Untersuchungen zu Stopfern bei Ringspaltmörteln	84
5.2.1	Ausgangsstoffe für Ringspaltmörtel	84
5.2.2	Versuchsaufbau der Modellrohrstrecke	92
5.3	Untersuchungen zur Stopferbildung beim Anpumpen	93
5.3.1	Druckverläufe	93
5.3.2	Stopfereigenschaften	95
5.3.3	Reduzierte Leitungslänge	97
5.3.4	Modifikation der Materialeigenschaften	98
5.4	Untersuchungen zur Stopferbildung nach Stillständen	102
5.4.1	Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen	102
5.4.2	Ergebnisse der Zeit-Oszillations-Versuche über 48 Stunden	112
5.4.3	Beurteilung des Sedimentationsverhaltens anhand von Elementversuchen	114
5.4.4	Druckverläufe beim Wiederanpumpen	118
5.5	Zusammenfassung und Empfehlungen zum Mischungsentwurf	119
5.6	Lisenen-Restdruck	121

6	Drainierungsverhalten	125
6.1	Filtrationstheorie mit Berücksichtigung eines Filtermediums	126
6.2	Versuchstechnische Beobachtung von Drainierungsvorgängen	128
6.2.1	Großödometer	128
6.2.2	Modifizierter Filterpressenversuch	131
6.3	Eigene Untersuchungen	132
6.3.1	Bestimmung des mittleren Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes	133
6.3.2	Abhängigkeit vom Leimanteil	134
6.3.3	Einfluss der Grenzflächenpermeabilität	135
6.3.4	Einfluss stabilisierender Zusatzstoffe und Zusatzmittel	136
6.4	Rechnerischer Ansatz zur Prognose der Drainierungsdauer	138
6.4.1	Einwirkungsdauer der Bentonitsuspension	139
6.4.2	Drainierung während Vortriebsunterbrechungen	144
6.4.3	Modellhafte Ermittlung des Ringraumdrucks	145
6.4.4	Parameterstudie	148
6.5	Bodenmechanischer Modellversuch	151
6.5.1	Versuchsaufbau	152
6.5.2	Ergebnisse	155
6.6	Ökologische Bewertung des Drainierungsvorganges	159
6.6.1	Gesetzliche Grundlagen	159
6.6.2	Eigene Filtratuntersuchungen	160
6.6.3	Fazit	162
6.7	Schlussfolgerungen	163
7	Bodenmechanische Eigenschaften des drainierten Ringspaltmaterials	167
7.1	Allgemeines	167
7.2	Einfaches bodenmechanisches Versuchsprogramm	167
7.2.1	Einaxiale Druckversuche	169
7.2.2	Flügelscherfestigkeiten	170
7.2.3	Wassergehalte	171
7.2.4	Fazit	173
7.3	Erweitertes bodenmechanisches Versuchsprogramm	174
7.3.1	Steifigkeit	174
7.3.2	Drainierte Scherfestigkeit	176
7.3.3	Filterstabilität und Erosionsstabilität	179
7.4	Numerische Vergleichsberechnungen	182
7.4.1	Modellbildung für die Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit . . .	183
7.4.2	Modellbildung im Rahmen einer ebenen Verformungsberechnung	185
7.4.3	Ergebnisse	189
7.4.4	Schlussfolgerungen	193
7.5	Bodenmechanische Anforderungen	195
8	Zusammenfassung und Ausblick	197
8.1	Zusammenfassung	197
8.2	Ausblick	200

Literaturverzeichnis

201

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipskizze eines Hydroschildes mit Tübbingausbau	2
1.2	Ursachen des Ringspaltes	4
1.3	Setzungsmulde	5
1.4	Ringspaltverpressung durch den Schildmantel	6
1.5	Lisenenanordnung im Schildschwanzblech	7
1.6	Verfüllung des Ringraums durch Öffnungen in den Tübbing	8
1.7	Verpresseinrichtungen auf einer TVM	9
1.8	Lisenenanschluss mit Kugelhahn und Druckgeber auf einer TVM	9
1.9	ATDS-System von HOCHTIEF	10
1.10	Verpresste Mörtelmengen beim City-Tunnel Leipzig	11
1.11	Georadar-Messung des Ringraums nach theoretischer Erhärtungszeit	12
1.12	Seismische Erkundung von Fehlstellen im Ringraum	13
1.13	Bohrkern mit zementfreiem Ringspaltverpressmaterial	15
1.14	Ringspaltverpressung mit Zwei-Komponenten-Material	16
1.15	Wasserdurchlässiges Ringspaltmaterial	18
1.16	Typisches Schadensbild bei Überbelastung einer Topf-Nocke-Konstruktion	19
1.17	Versatz von bis zu 25 mm zwischen Tübbingringen	20
2.1	Piezometermessungen an der Panchiao-Linie Taipeh	22
2.2	Qualitative Entwicklung des beanspruchenden Erddrucks	23
2.3	Messquerschnitte beim Zweiten Heinenoord Tunnel	24
2.4	Druckmessungen im Ringraum beim Sophia-Tunnel	25
2.5	Mörtelausbreitversuch	26
2.6	Modellversuch beim Eupalinos-Projekt	26
2.7	Verformung der Tübbingröhre in Tunnellängsrichtung	27
2.8	Maximal mobilisierbare Mörtelwiderstandskraft im Ringraum	29
2.9	Wirksame Kräfte im Ringraum	29
2.10	Filtration von Mörtel im Ringraum eines Tunnels mit Tübbingausbau	30
2.11	Vergleich gemessener und modellhafter Porenwasserdrücke	31
2.12	3D-Finite-Elemente-Modell von KASPER	33
3.1	Verteilung der Vortriebszeit beim Tunnel Münster/Wiesing	36
3.2	Statisches Modell	37
3.3	Beispiel-tunnel	40
4.1	Bruchkörpermodell nach HORN	41
4.2	Wirksamer Stützdruck bei Suspensionsstagnation	42

4.3	Mechanismen der Stützdruckübertragung	44
4.4	Abhängigkeit des Höhenverhältnisses von der Suspensionsdichte	49
4.5	Einfüllen von Wasser für den Durchlässigkeitsversuch in der Filterpresse	50
4.6	Filtratwassermenge im Durchlässigkeitsversuch in der Filterpresse	51
4.7	Normative Idealisierung der thixotropen Verfestigung	53
4.8	Fließgrenzenentwicklung der untersuchten Bentonitsuspensionen	54
4.9	Fließgrenzen und Thixotropiezahlen der Bentonitsuspensionen	56
4.10	Druckverhältnisse bei der Ringraumverpressung nach Stützflüssigkeits-Stagnation	57
4.11	Microtunnelling-Separieranlage	58
4.12	Fließschema einer Separieranlage	59
4.13	Suspensions-Eindringversuch	61
4.14	Kornverteilungskurven der Modellböden	62
4.15	Kornverteilungskurven der mit Quarmehl aufgeladenen Bentonitsuspensionen	63
4.16	Kritische Eindringtiefen von aufgeladenen Bentonitsuspensionen	64
4.17	Förderkreislaufdaten und Vortriebsgeschwindigkeiten City-Tunnel Leipzig	65
4.18	Verteilung der Suspensionseinspeisung	66
4.19	Eindringversuch mit befrachteter Suspension	67
4.20	Kornverteilungskurven bei Bodenbefrachtung	68
4.21	Einsatzbereiche für Schilde mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust	68
4.22	Mehrausbruch der Ortsbrust in sehr durchlässigen Kiesen	69
4.23	Hybride Modellvorstellung der Stützdruckübertragung	70
4.24	Exemplarische Filterkuchenberechnung nach hybrider Modellvorstellung	73
4.25	Parameterstudie mit verschiedenen Modellböden	74
5.1	Kombinierte Scher- und Pfropfenströmung	76
5.2	Einfluss der Sättigung auf den Förderdruck	77
5.3	Rohr-Druckverläufe bei undrainierten und drainierten Scherverhältnissen	78
5.4	Versuchsaufbau zur Prüfung der Pumpfähigkeit nach BEST und LANE	80
5.5	Gleitrohr-Rheometer von Putzmeister	81
5.6	Mehlkornleim im Beton	82
5.7	Sieblinien der verwendeten Zuschläge im 1. und 2. Referenzmörtel	86
5.8	Konsistenzen des 1. Referenzmörtels für verschiedene Mehlkorntypen	87
5.9	Konsistenzen für verschiedene Mehlkorntypen mit und ohne Kaolin-Stabilisierer	88
5.10	Zeitabhängige Konsistenzen des 1. Referenzmörtels mit verschiedenen Mehlkorntypen	89
5.11	Komponenten der Modellrohrstrecke	92
5.12	Betonförderleitungen DN 65 mm	92
5.13	Druckverlauf beim Befüllen der Mörtelförderleitung	94
5.14	Druckerhöhung bei Ankündigung eines Stopfers	95
5.15	Verfestigtes Mörtelmaterial nach Stopferbildung	95
5.16	Verlauf verschiedener Kennwerte im Mörtelstopfer	96
5.17	Verlauf des Wassergehaltes im Mörtelmaterial nach verschiedenen Förderweiten	97
5.18	Schematische Darstellung von Zwickelleim und Überschussleim	98
5.19	Porengehalte verschiedener Kornverteilungskurven	100
5.20	Verlauf des Wassergehaltes im Mörtelmaterial bei verschiedenen Mischungsentwürfen	101
5.21	Zusammenhang von Überschussleimmenge und Stopferlänge	101
5.22	Rheometriesystem HAAKE Rheostress 600 mit Baustoffmesszelle	103

5.23	Rheometrischer Oszillationsversuch	105
5.24	Bestimmbare Größen im Oszillationsversuch	106
5.25	Verlauf eines Amplitudensweep-Versuchs	107
5.26	Verläufe relativer rheologischer Parameter im Zeit-Oszillationsversuch über 2 Stunden	109
5.27	Mobilisierungskurven einer Kalksteinmehl-Suspension	110
5.28	Flügelscherfestigkeiten und relative Speichermoduln einer Kalksteinmehl-Suspension	110
5.29	Speichermoduln nach 2 Stunden Ruhezeit/Oszillationszeit	111
5.30	Zeitverlauf des Speichermoduls im Zeit-Oszillations-Versuch über 48 Stunden	112
5.31	Wassergehaltverteilungen im stehenden Rohr DN 100 mm nach 24 Stunden	115
5.32	Beobachtung des Blutungsverhaltens in Abhängigkeit der Rohrgeometrie	115
5.33	Abhängigkeit des mittleren Wassergehaltes von der Rohrgeometrie	116
5.34	Zeitabhängige Parameter des ausgebluteten Mörtelmaterials	117
5.35	Pumpendrucke beim Wiederaanlaufen des Fördersystems	118
5.36	Mörtelförderung beim Wiederaanlauf des Pumpensystems nach 4 Tagen	119
5.37	Versuchsaufbau zur Bestimmung des Lisenen-Restdrucks	122
5.38	Lisenen-Restdrucke in Abhängigkeit von der Mörtelkonsistenz	122
6.1	Mörtelfiltration im Ringraum gegen Bentonit-Membran und stagnierte Stützflüssigkeit	125
6.2	Mittelung des Strömungswiderstandes nach BEZUIJEN und TALMON	127
6.3	Struktur kompressibler Filterkuchen	128
6.4	Großödometer	129
6.5	Setzungsverläufe und Porenwasserdruckentwicklung bei der Drainierung eines Mörtels	130
6.6	Modifizierter Filterpressenversuch	132
6.7	Abhängigkeit des Filterkuchen- $k_{F,Fk}$ -Wertes vom Volumenverlust infolge Drainierung	133
6.8	Abhängigkeit des Volumenverlustes infolge Drainierung vom Leimanteil im Mörtel	134
6.9	Abhängigkeit der Drainierungszeit vom Leimanteil im Mörtel	135
6.10	Abhängigkeit der Mörtel-Filterkuchenhöhe von Mörtel- und Grenzflächenpermeabilität	136
6.11	Abhängigkeit der Drainierungszeit vom relativen Speichermodul	138
6.12	Abhängigkeit des Volumenverlustes vom relativen Speichermodul	139
6.13	Geologischer Längsschnitt vom City-Tunnel Leipzig	140
6.14	Idealisierte Darstellung einer mit Mörtel und Bentonitsuspension umströmten TVM	140
6.15	Druckverlauf um die TVM im Bereich des Tübbingrings 1.200 beim City-Tunnel Leipzig	143
6.16	Federtopfmodell für Ringspaltmörtel	144
6.17	Druckmessungen im Ringraum des Tübbingringes 1.200 beim City-Tunnel Leipzig	146
6.18	Druckverläufe im Bereich ausgewählter Tübbingringe beim City-Tunnel Leipzig	147
6.19	Filterkuchenhöhen für den Beispieltunnel nach Modellrechnung	150
6.20	Druckverläufe für den Beispieltunnel nach Modellrechnung	151
6.21	Bodenmechanischer Modellversuch	153
6.22	Versuchsaufbau, Teil A	154
6.23	Versuchsaufbau, Teil B	154
6.24	Versuchsaufbau, Teil C	155
6.25	Druckverläufe im bodenmechanischen Modellversuch	156
6.26	Druckverläufe in Abhängigkeit von der Bodenart	157
6.27	Verpresstes Mörtelmaterial (Versuch gegen Kiessand)	158
6.28	Wassergehaltverteilungen der im Modellversuch gewonnenen Elementproben	159
6.29	Analyse-Geräte zur Bestimmung der Ionen- und Elementkonzentrationen	161

7.1	Drainierung des Mörtelmaterials	168
7.2	Last-Verformungs-Diagramm der einaxialen Druckversuche	169
7.3	Mobilisierungskurven bei Ermittlung der Flügelscherfestigkeiten	171
7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse des einfachen bodenmechanischen Versuchsprogramms	172
7.5	Zeit-Setzungs-Kurve für den 2. Referenzmörtel im Großödometerversuch	175
7.6	Dreiaxialer Druckversuch	176
7.7	Mobilisierungskurven in den dreiaxialen Druckversuche	177
7.8	Triaxial- und Ödermetermoduln	178
7.9	Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter im $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ -Diagramm	179
7.10	Anwendung des mechanischen Filterkriteriums nach v. TERZAGHI für 2. Referenzmörtel	180
7.11	Versuchsaufbau Pinhole-Test	181
7.12	Modifizierter Pinhole-Test nach BAW-Richtlinie	181
7.13	Unterseite der Durchflusskanäle nach Versuchsende	182
7.14	Berechnungsmodell für Tübbingschalen	183
7.15	Betongelenk	184
7.16	Berechnungsausschnitt in PLAXIS	186
7.17	Momenten-Rotations-Beziehung für ein Betongelenk mit Gelenkhalshöhe $d = 0,20$ m . .	187
7.18	Berechnungsergebnisse für die Parameterkombination Mittelsand und 2. Referenzmörtel	190
7.19	Schnittgrößenverläufe für die Parameterkombination Mittelsand und 2. Referenzmörtel .	191
7.20	Maximale Verformungen der Tunnelschale	191
7.21	Maximale Biegemomente in der Tunnelschale	192
7.22	Üblicher Bettungsansatz nach DUDDECK	193
7.23	Einfluss der gemittelten Bettungsmoduln	194

Tabellenverzeichnis

1.1	Ausgewählte Mischungsentwürfe für Ringspaltmörtel	14
1.2	Mischungsentwürfe für ein größeres Verkehrstunnelprojekt	14
1.3	Mischungsentwurf eines 2-Komponenten-Verpressmaterials	16
4.1	Auszug aus dem Suspensionsprotokoll vom City-Tunnel Leipzig	48
4.2	Eigenschaften der untersuchten Bentonitsuspensionen	54
4.3	Thixotropiezahlen und Verhältnisse $\tau_{F,stat,i}/\tau_F$ für verschiedene Zeitspannen	55
4.4	Trennschnitte von Separieranlagenkomponenten bei Schildvortrieben	60
5.1	Konsistenzklassen von Frischbeton nach DIN EN 206-1	80
5.2	Mischungsentwurf des 1. Referenzmörtels	85
5.3	Eigenschaften der untersuchten Mehlkorntypen	87
5.4	Kies- und Sandanteile verschiedener Sieblinien	99
5.5	Mischungsentwürfe und Leimanteile in den absolvierten Pumpversuchen	100
5.6	Geräteparameter für das Messprofil in den Amplitudensweep-Versuchen	107
5.7	Geräteparameter für das Messprofil in den Daueroszillations-Versuchen	108
5.8	Kosten für verschiedene Stabilisierertypen	113
6.1	Mörtel- und Filterkuchenparameter	137
6.2	Randbedingungen für den Tübbingring 1.200 beim City-Tunnel Leipzig	142
6.3	Randbedingungen in der Parameterstudie	149
6.4	Allgemeine Parameter und Anionen-Konzentrationen	162
6.5	Element-Konzentrationen	163
6.6	Druckverhältnisse in den Vergleichsrechnungen	165
7.1	Einaxiale Druckfestigkeiten q_u des nicht drainierten Mörtelmaterials nach 28 Tagen	170
7.2	Flügelscherfestigkeiten τ_F des drainierten Mörtelmaterials	171
7.3	Steifigkeiten E_{Oed} des 2. Referenzmörtels im Großödometerversuch	175
7.4	Ergebnisse der dreiaxialen Druckversuche	177
7.5	Berechnungsparameter der Mörteltypen	189
7.6	Berechnungsparameter der Modellböden	190

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	[m ²]	Fläche
a	[-]	Suspensions-Eindringungsbeiwert
a	[m]	Ausbreitmaß
a_v	[-]	Volumenverlust infolge Drainierung
c	[N/m ²]	Kohäsion
c_R	[-]	Raumkonzentration
D	[m]	Durchmesser (allgemein)
d	[m]	Korndurchmesser
E	[.]	Einwirkung (allgemein)
E	[N]	Erddruckkraft
E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
e	[m]	Exzentrizität
E_s	[N/m ²]	Steifeziffer
EI	[Nm ²]	Biegesteifigkeit
F	[N]	Kraft (allgemein)
f	[N/m ³]	Druckgefälle
f	[Hz]	Oszillations-Frequenz
G	[N]	Gewichtskraft
G	[N/m ²]	Schubmodul
G	[Nm]	relativer Schubmodul im rheologischen Oszillationsversuch
g	[kg/m ³]	Tongehalt
g	[m]	Spaltweite
h	[m]	Höhe
i	[-]	hydraulisches Gefälle
K	[-]	Erddruckbeiwert
k_F	[m/s]	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
k_r	[N/m ³]	radialer Bettungsmodul
$k_{\dot{\gamma}}$	[.]	Schergeschwindigkeitskonstante
k_{τ}	[.]	Schubspannungskonstante
L	[m]	Länge
M	[Nm]	Biegemoment
m	[-]	Krümmungsparameter im Stoffgesetz „Hardening Soil Model“
N	[N]	Normalkraft
n	[-]	Porenanteil
p	[N/m ²]	Druck

\bar{p}	[N/m ²]	Druck unter Berücksichtigung von Thixotropieeffekten
Q	[N]	Querkraft
q	[m ³ /s]	Durchflussrate
q_u	[N/m ²]	einaxiale Druckfestigkeit
R	[.]	Widerstand (allgemein)
r	[m]	Radius
S	[N]	Stützkraft
s	[m]	Setzung; Eindringtiefe
t	[s]	Zeit
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
V	[m ³]	Volumen
v	[m/s]	Geschwindigkeit
W	[N]	Wasserdruckkraft
w	[-]	massebezogener Wassergehalt
\bar{x}	[.]	Mittelwert

Griechische Buchstaben

α	[rad]	Verdrehungswinkel
Δ	[.]	Differenz
Δr	[m]	Ringraumweite
δ	[°]	Wandreibungswinkel, Phasenwinkel
ϵ	[-]	Dehnung
ϕ	[-]	Drehwinkel im Oszillationsversuch
φ	[°]	Reibungswinkel
γ	[N/m ³]	Wichte
γ	[-]	Teilsicherheitsbeiwert, Verzerrung
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Geschwindigkeitsgefälle
η	[-]	Anpassungsfaktor
η	[Pa·s]	Viskosität
κ	[-]	Thixotropiezahl
λ	[N/m ² ·s/m]	Viskositätsbeiwert
μ	[-]	Konsolidierungsgrad
ν	[-]	Querkontraktionszahl
ϑ	[°]	Gleitflächenwinkel
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[-]	Standardabweichung
σ	[N/m ²]	Spannung
τ	[N/m ²]	Schubspannung
τ_F	[N/m ²]	Fließgrenze, Scherfestigkeit
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit
ψ	[°]	Dilatanzwinkel

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

AT	Arbeitstag
AUA	American Underground Construction Association
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V.
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EPB	Earth Pressure Balance
FA	Flugasche
FEM	Finite Elemente Methode
HSM	Hüttensandmehl
KSM	Kalksteinmehl
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LV	Leistungsverzeichnis
ITA	International Tunnelling Association
ÖVBB	Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik
PE	Polyethylen
PIV	Particle Image Velocimetry
TAC	Zwei-Komponenten-Verpresssystem der TAC Corporation (Japan)
TBM	Tunnelbohrmaschine (für Festgesteinsvortriebe)
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
VT	Vortrieb
WU	wasserundurchlässig (Wasserundurchlässiger Beton)
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

Abkürzungen für Gesetze und Verordnungen

AbwV	Abwasserverordnung
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz