



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur Institute for Underground Infrastructure

Forschungsbericht

Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau

Laboruntersuchungen und Versuche im Maßstab 1:1



Wissenschaftliche Leitung Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Triantafyllidis (RUB) Dr.-Ing. B. Bosseler (IKT)

Projektleitung und Bearbeitung Dipl.-Ing. Igor Arsic (RUB) Dipl.-Ing. Martin Liebscher (IKT)





Auftraggeber:



Bearbeitung:



des Landes NRW Ruhr-Universität Bochum: Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik Prof. Dr.-Ing. habil. Theodor Triantafyllidis

Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Ministerium für

Umwelt und Naturschutz,

Prof. Dr.-Ing. habil. Theodor Triantafyllidis Universitätsstr. 150 44801 Bochum



Institute for Underground Infrastructure

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur Exterbruch 1 45886 Gelsenkirchen

Zur Durchführung des Vorhabens sowie Auswahl von Materialien und Verfahren waren die Netzbetreiber für uns eine unverzichtbare Hilfe. Wir bedanken uns bei den beteiligten Netzbetreibern für die Unterstützung des Vorhabens und die fachliche Diskussion:

- Tiefbauamt der Stadt Dortmund: Straße Kanal Grün Stadtentwässerung
- Stadtentwässerungsbetrieb der Stadt Düsseldorf (SEB)
- Emschergenossenschaft, Essen
- Stadtwerke Essen AG
- Stadtentwässerungsbetriebe Köln (AöR)





Inhaltsverzeichnis:

1	Veranlassung und Problemstellung5								
2	Zielstellung und Vorgehensweise								
3	Stan	d der 1	Fechnik		8				
	3.1	Verlegung von Kanalisationen							
	3.2	Fließfä	ähige Verfü	Ilmaterialien	11				
	3.3	Schütt	güter		15				
	3.4	Verleg	ehilfen		17				
4	Voru	ntersu	chungen .		20				
	4.1	Proble	mstellung.		20				
	4.2	Labor	versuche		25				
		4.2.1	Korngröße	enverteilung	25				
		4.2.2	Proctorver	rsuch	28				
		4.2.3	Bestimmu	ng der lockersten und dichtesten Lagerung	34				
		4.2.4	Einaxialer	Druckversuch	36				
		4.2.5	Kompress	ionsversuch	37				
		4.2.6	Korndichte	3	49				
		4.2.7	Bestimmu	ng des Wassergehalts	50				
		4.2.8 Glühverlust							
	4.3	Auswa	ahl der Bett	ungsmittel für die Großversuche	51				
5	Vers	uche ii	m Maßstal	b 1:1	53				
	5.1	Versu	chskonzept	t	53				
	5.2	Versu	chsaufbau	und -durchführung	59				
		5.2.1	Randbedir	ngungen	59				
		5.2.2	Messtech	nik	61				
			5.2.2.1 5.2.2.2	Allgemeines Messstern	61				
			5.2.2.3	Dehnungsmessstreifen	67				
			5.2.2.4	Erddruckgeber	68				
			5.2.2.5	Spannungsmessfolien	69				
			5.2.2.6	Niveaumessungen	69				
		5.2.3	Versuchsa	ADIAUT Definition der Versuchsnhasen	70				
			5.2.3.1	Phase 1: Einbauzustand	72				
			5.2.3.3	Phase 2: Ziehen der senkrechten Verbauelemente	75				
			5.2.3.4	Phase 3: Statische und zyklische Belastung	75				
			5.2.3.5 5.2.3.6	Phase 4: Simulation von Grundwasserspiegelveranderung	//				
			5.2.3.7	Versuchsausbau	78				
		5.2.4	Vorberech	inungen	82				
	5.3 Versuchsergebnisse								
		5.3.1	Allgemein	es	83				
		5.3.2	Dehnungs	messungen	84				
			5.3.2.1	Umfangsrichtung	84				
			5.3.2.2	Axiale Richtung	92				
		5.3.3	Messstern)	93				





	5.3.4 5.3.5 5.3.6 5.3.7	5.3.3.1 5.3.3.2 5.3.3.3 5.3.3.4 5.3.3.5 Bodenpa 5.3.4.1 5.3.4.2 5.3.4.3 5.3.4.4 5.3.4.5 5.3.4.6 Bodensp Lageabw Folienme	Phase 1: Einbauzustand Phase 2: Ziehen der Spunddielen Phase 3: Statische und zyklische Belastung Phase 4: Simulation von Grundwasserspiegelveränderung Phase 5: Simulation von Sackungen rameter Densitometerversuche nach DIN 18125 Kompressionsversuche nach DIN 18135 Triaxialversuche nach DIN 18137 Einaxiale Druckversuche nach DIN 18136 Plattendruckversuche nach DIN 18134 Rammsondierungen nach DIN 4094 annungen mit Erddruckgebern reichungen	95 105 125 129 138 138 138 150 162 162 172 174 176 179 181		
Vers	uchsa	uswertun	g und Bewertung der Bettungsmaterialien	184		
6.1	Einba	uzustand.		184		
6.2	Zieher	n der Spur	nddielen	190		
6.3	Simula	ation des Z	Ziehens der Verbauwände mit der FE-Methode	195		
6.4	Statiso	che und zy	/klische Belastung	195		
6.5	Simula	ation von (Grundwasserspiegelveränderung	199		
6.6	Simula	ation von S	Sackungen	204		
Ansä	itze fü	Bemess	ung und Qualitätssicherung	210		
7.1	Beme	ssung		210		
7.2	Qualita	ätssicheru	ing	212		
3 Zusammenfassung und Ausblick						
9 Literatur						
	/ers 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 Ansä 7.1 7.2 Zusa _itera	5.3.4 5.3.5 5.3.6 5.3.7 Versuchsau 5.1 Einbau 5.2 Zieher 5.3 Simula 5.4 Statiso 5.5 Simula 5.6 Simula 5.6 Simula 5.6 Simula 7.1 Bemes 7.2 Qualita 7.2 Qualita	5.3.3.1 5.3.3.2 5.3.3.3 5.3.3.4 5.3.3.5 5.3.4 Bodenpa 5.3.4.1 5.3.4.2 5.3.4.3 5.3.4.3 5.3.4.4 5.3.4.5 5.3.4.6 5.3.5 Bodensp 5.3.6 Lageabw 5.3.7 Folienme Versuchsauswertun 5.3.7 Folienme Versuchsauswertun 5.3.7 Folienme Versuchsauswertun 5.3.6 Lageabw 5.3.7 Folienme 5.3.6 Lageabw 5.3.7 Folienme 5.3 Simulation des 2 5.4 Statische und zy 5.5 Simulation von 6 5.6 Simulation von 6 5.6 Simulation von 8 7.1 Bemessung 7.2 Qualitätssicheru Zusammenfassung Literatur	5.3.3.1 Phase 1: Einbauzustand		



1 Veranlassung und Problemstellung

Die Aufwendungen der Netzbetreiber für den Neubau und die Erneuerung von Abwasserleitungen und –kanälen sind zurzeit und auch zukünftig beachtlich. Die erforderlichen Investitionen für den Neubau und die Erneuerung der deutschen Kanalisation wurden in einer Studie des BDE [1] für einen Zeitraum von 20 Jahren monetär abgeschätzt und mit jährlich ca. 2,4 Milliarden € bis zum Jahr 2015 beziffert. Dieser Betrag ist der Mittelwert aus einer optimistischen und einer pessimistischen Trendberechnung. Er vermittelt, dass ein hohes Einsparungspotential bei den Netzbetreibern möglich ist, sofern innovative, kostengünstige und umweltfreundliche Kanalbautechniken angewendet werden.

Von Städten und Gemeinden wird bundesweit über weitere zu erwartende Gebührensteigerungen im Bereich der Abwasserbeseitigung in den nächsten Jahren berichtet. Nach Angabe von Dudey und Pecher [2] ist die Kanalisation mit rund $^2/_3$ an den Kosten der Abwasserbeseitigung und damit auch zu $^2/_3$ an den Abwassergebühren beteiligt. Die Bevölkerung bzw. die Lastenträger der Abwassergebühren sind stark für dieses Thema sensibilisiert, so dass weitere Gebührensteigerungen politisch nur schwerlich durchzusetzen sind. Für die Kommunen entsteht dadurch ein enormer Kostendruck bei unveränderten Qualitätsanforderungen.

Derzeit werden Schäden bei der Herstellung von Abwasserkanälen in vielen Fällen durch ungeeignete Bauverfahren und nicht fachgerechte Bauausführungen verursacht. Diese so genannten Anfangsschäden haben oftmals erhebliche negative wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen, denn z.B. Risse, Scherben und Rohrbruch können früher oder später in Abhängigkeit vom Schadensumfang und der weiteren Entwicklung des Schadens Undichtigkeiten zur Folge haben. Undichtigkeiten führen entweder zur Infiltration von Grundwasser in die Kanalisation oder zur Exfiltration von Abwasser. Maßgebend sind die jeweiligen geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse und hier insbesondere die Lage des jeweiligen Leitungsabschnittes zum Grundwasserspiegel.

Die Exfiltration, aber auch die Infiltration bilden in jedem Fall Ausgangspunkte für mögliche weitere Folgeschäden und Schadensfolgen [3].

Folgeschäden der Abwasserexfiltration sind:

- Schadstoffeintrag in Grundwasser und Boden,
- > schädigende Auswirkungen auf Leitungen, Bauwerke oder Straßenoberbau,
- Änderungen der Bettungsbedingungen mit Folgeschäden, wie Lageabweichungen, Verformungen, Risse und Einsturz.

Schadensfolgen der Infiltration sind:

Erhöhung des Fremdwasseranteils, dadurch Erhöhung der Belastung des Vorfluters sowie der Kosten für Abwassertransport und Abwasserreinigung,





- Absenkung des Grundwasserspiegels, verbunden mit Schäden an der Bebauung und am Bewuchs,
- Änderung der Bettungsbedingungen mit Folgeschäden, wie Lageabweichungen, Verformung, Risse, Rohrbruch oder Einsturz,
- > Hohlraumbildung, verbunden mit Setzungen und/oder Einstürzen
- > Erosion im Bereich der der Bettung mit Abtrag von Feinmaterial

Derzeit stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und Bettungsmittel für die Neuverlegung von Abwasserkanälen und –leitungen und deren Einbettung in den Baugrund zur Verfügung. Gerade die Ausführung der Einbettung wirkt sich dabei wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit einer Kanalbaumaßnahme, das Tragverhalten der verlegten Rohre, ihre Wechselwirkung mit dem umgebenden Baugrund und die zu erwartende Nutzungsdauer aus.

In der Baupraxis gibt es viele negative Beispiele für eine unzureichende Verdichtung in der Leitungszone infolge einer unangebrachten Bauausführung. Dies wird nicht zuletzt dadurch verschärft, dass im innerstädtischen Bereich durch Platzmangel infolge der Vielzahl im Untergrund liegender Leitungen eine regelgerechte Verdichtung häufig technisch nicht möglich oder aufgrund des hohen Zeitaufwandes nicht wirtschaftlich ist (vgl. Abschnitt 3.1).

Einzelne Netzbetreiber nahmen dies bereits zum Anlass, verschiedene innovative Bettungsmittel einzusetzen, mit dem vorrangigen Ziel eine einfache und sichere Handhabbarkeit, d.h. die geforderte Einbauqualität, zuverlässig zu erreichen. In einigen Fällen sollte darüber hinaus auch die Dichtheit und die Standsicherheit des Systems verbessert werden.

Bisher besteht allerdings Unklarheit, wie die Ausführungsrisiken bei der Verwendung verschiedener Bettungsmittel zu bewerten sind. Die Auswahl eines Bettungsmittels wird bisher allein aufgrund von Herstellerinformationen und der subjektiven Erfahrung des jeweiligen Betreibers getroffen.

Das nahm das MUNLV NRW zum Anlass, den Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr Universität Bochum und das IKT mit dem nachfolgend dargestellten Forschungsvorhaben "Ausführungsrisiken beim Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau" zu beauftragen (Aktenzeichen IV-9-042 383).



2 Zielstellung und Vorgehensweise

Zur zuverlässigen Planung und Ausführung von Investitionsmaßnahmen im Kanalbau müssen die Ausführungsrisiken beim Einsatz der verschiedenen Bettungs- und Verfüllmaterialien bekannt sein. Die Auswahl von Bettungsmitteln ist nur möglich, wenn entsprechende Bewertungsparameter definiert und die für den Einbau relevanten Einflussgrößen und Ausführungsrisiken durch messbare Größen beschrieben sind.

Im Rahmen des Projektes sollten daher die aus Betreibersicht maßgeblichen Bettungsmittel im direkten Vergleich untersucht und entsprechende Bewertungsparameter und Messgrößen abgeleitet werden. Dies geschah insbesondere vor dem Hintergrund eines wirtschaftlichen Kanalbaus bei geringer Grabenbreite, einfachem Einbau und sicherer Zwickelverfüllung unter besonderer Berücksichtigung der Ausführung von Kanälen im Grundwasser und in Gebieten mit hohen Setzungen und Verschiebungen, z.B. Bergsenkungsgebieten. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung von geeigneten Qualitätssicherungsmaßnahmen für die Baustelle.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden fünf der zurzeit auf dem Markt erhältlichen Verfüllmaterialien vergleichend untersucht. Diese sollten die im Interesse der Netzbetreiber liegenden Varianten zur Verfüllung des Leitungsgrabens abdecken. Hierzu wurden sowohl Schüttgüter für den lagenweise verdichteten Bodeneinbau als auch fließfähige Verfüllmaterialien auf Basis umfangreicher Voruntersuchungen ausgewählt (vgl. Abschnitt 4).

Mit jedem der 5 ausgewählten Bettungsmaterialien wurden vergleichende Versuche im Maßstab 1:1 im Großversuchsstand des IKT in Gelsenkirchen durchgeführt. Begleitet wurden diese Versuche durch umfangreiche Messungen und bodenmechanische Untersuchungen am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum (vgl. Abschnitt 5). Darüber hinaus wurden die aus dem bestehenden Normenund Regelwerk bekannten Berechnungsmodelle analysiert und für den vorliegenden Anwendungsfall in Form von Bemessungskonzepten angepasst (vgl. Abschnitt 7). Auf Basis der durchgeführten Großversuche wurden Hinweise zur Qualitätssicherung für die eingesetzten Verfüllmaterialien zusammengestellt (vgl. Abschnitt 8). Schließlich wurden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftig noch zu lösende Fragestellungen gegeben (vgl. Abschnitt 9).



3 Stand der Technik

3.1 Verlegung von Kanalisationen

Die Herstellung von Kanalisationen in der offenen Bauweise erfolgt in der Regel durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials. Die wichtigste Norm für den Bau von Kanälen in offener Bauweise ist die DIN EN 1610 [4].

Bei dieser Bauweise ergeben sich unterschiedliche Baugrundzonen (Bild 3.1).

Bild 3.1 Baugrundzonen nach DIN EN 1610 [4]

Diese werden als ungestörter Baugrund und als Leitungsgraben bezeichnet. Im Leitungsgraben unterscheidet man wiederum zwischen oberer und unterer Bettungsschicht, Seitenverfüllung, Abdeckung und Hauptverfüllung.

Die Bettungsschichten umfassen den Bereich zwischen Grabensohle und der durch den Auflagerwinkel α gegebenen Höhe am Rohrumfang. Bei direkter Auflagerung auf gewachsenen Boden gehört auch dieser zur Bettung.

Die Abdeckung stellt den Bereich im Leitungsgraben unmittelbar über dem Rohrscheitel dar. Ihre Mindestmaße sind mit 150 mm über dem Rohrschaft bzw. 100 mm über der Rohrverbindung angegeben. Die Seitenverfüllung ist gemäß [4] der Bereich zwischen Bettung und Abdeckung. Der Bereich oberhalb der Abdeckung bis zu einer gegebenenfalls vorhandenen Straßen- oder Gleiskonstruktion wird als Hauptverfüllung bezeichnet.





Je nach Erfordernis sind unterschiedliche Grabenquerschnitte vom geböschten Graben bis hin zu Gräben mit senkrechten Wänden möglich. Die Mindestbreite von Rohrgräben ist in DIN EN 1610 [4] festgelegt.

Die untere Bettungsschicht soll eine gleichmäßige Druckverteilung sicherstellen und muss daher in Anpassung an die Werkstoff- und Verbindungsart der einzelnen Rohre ausgebildet sein.

Als Voraussetzung für alle weiteren Arbeitsgänge wird zunächst die untere Bettungsschicht als stabile und feste Unterlage zur Aufbringung der Rohrleitung hergestellt, um spätere Bodensetzungen und Rohrverschiebungen zu vermeiden. Wird die Grabensohle als untere Bettungsschicht verwendet, so soll sie nicht aufgelockert sein oder muss ihre ursprüngliche Lagerungsdichte (Tragfähigkeit) durch besondere Maßnahmen (Verfestigung, Bodenaustausch) wieder erhalten. Anschließend ist die obere Bettungsschicht und die Seitenverfüllung herzustellen. Dabei muss die eingebaute Rohrleitung mit Bodenmaterial umgeben sein, dessen Zusammensetzung (z.B. Größtkorn 20 mm; kein Brechsand oder Splitt > 11 mm) im Hinblick auf die mechanische Widerstandfähigkeit der Rohre und der Rohrumhüllung geeignet ist [4]. Wenn die Rohre mit einer werkseitigen Schutzumhüllung umgeben sind oder wenn der Rohrwerkstoff keine Rohrumhüllung erfordert (z.B. Betonrohre), können besondere Vereinbarungen über die Anforderungen an das Material getroffen werden. Hierbei ist zu beachten, dass keine negativen Einflüsse hinsichtlich folgender Gesichtspunkte auftreten:

- > aktiver und passiver Korrosionsschutz,
- > Dränagewirkung im Rohrgraben,
- > Standfestigkeit der Bettung gegenüber dem umliegenden Boden.

In Verkehrsflächen ist nach [5] für den Bereich der Leitungszone, also untere/obere Bettungsschicht, Seitenverfüllung und Abdeckung, ein gut verdichtbarer Füllboden einzubringen, sofern nicht besondere Vereinbarungen oder Anforderungen vorliegen. Dieser ist lagenweise einzubauen und ausreichend zu verdichten. Bei Außendurchmessern der Rohre von mehr als 400 mm muss die Leitungszone in mehr als zwei Arbeitsgängen verfüllt und verdichtet werden. Bereiche der Leitungszone, die sich nicht einwandfrei verfüllen und verdichten lassen (z.B. obere Bettungsschicht unter beengten Verhältnissen), sind mit Beton, Porenleichtbeton oder einem Boden-Bindemittel-Gemisch zu verfüllen [6].

Die Sicherheit einer Rohrleitung hängt wesentlich von der Gestaltung und Ausführung der Bettungsschichten und der Seitenverfüllung ab [6]. Nur durch eine fachgerechte Ausführung können Risse, Verformungen, Punktlagerungen usw. vermieden werden, die ansonsten zu Undichtigkeiten, Nutzungseinschränkungen, Sanierungsbedarf oder gar zur Unbrauchbarkeit führen. Die entscheidenden Problemzonen stellen dabei die schwer zugänglichen Zwickel (vgl. Bild 3.1) dar.





Die Zwickel bringen besonders in schmalen Rohrleitungsgräben durch eine eingeschränkte Erreichbarkeit erhebliche Schwierigkeiten bei der Unterstopfung und Verdichtung mit sich.

Im Bild 3.2 werden die beengten Platzverhältnisse in einem Rohrleitungsgraben und der Versuch der Verdichtung des Zwickelbereiches in der Praxis gezeigt.



Bild 3.2 Rohrgraben und Verdichtung des Zwickelbereiches in der Praxis [Güteschutz Kanalbau]

Zum fachgerechten Einbau der Rohrleitung ist in der oberen Bettungsschicht eine Lagerungsdichte herzustellen, die mindestens der Lagerungsdichte der unteren Bettungsschicht entspricht. Hierbei ist das Beistopfen im Bereich der seitlichen Rohrzwickel mit besonderer Sorgfalt durchzuführen. Der Einsatz von schmalen, dem Rohrleitungsdurchmesser angepassten Handstampfern ist in der Regel hier unumgänglich [7]. Die im Norm- und Regelwerk geforderten Werte für die Verdichtung werden dabei allerdings in der Regel nicht erreicht. Eine unzureichende Verdichtung dieses Zwickelbereichs und wirtschaftliche Zwänge haben zur Folge, dass der in der Bemessung des Rohres vorgesehene Auflagerwinkel oftmals nicht eingestellt werden kann.

Die bestehenden Schwierigkeiten bei der Verdichtung des Zwickelbereichs haben in der Praxis dazu geführt, dass häufig das einzubauende Bodenmaterial bis auf Höhe des Kämpfers geschüttet und anschließend verdichtet wird (Bild 3.3) [8].

Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Bodenverdichtung bis in den Zwickelbereich hineinreicht. Es wird deutlich, dass eine solche Vorgehensweise oftmals nicht den Forderungen des Normen- und Regelwerkes nach einem definierten Verdichtungsgrad im Zwickelbereich, der dem des Bodens unterhalb des Rohres entspricht, gerecht wird [8].

In der Praxis wird daher eine Vielzahl verschiedener Verfüllmaterialien, in Einzelfällen auch ergänzt um Verlegehilfen, eingesetzt. Verfüllmaterialien können unterschieden werden in fließfähige Verfüllstoffe und Schüttgüter (siehe auch [9]).





Bild 3.3 Anschüttung bis zur Höhe des Kämpfers und anschließende Verdichtung

3.2 Fließfähige Verfüllmaterialien

Fließfähige Verfüllmaterialien zeichnen sich dadurch aus, dass sie nach ihrer Herstellung für eine gewisse Zeit in einem fließfähigen Zustand verbleiben und sich danach durch einen gezielten Abbindeprozess stabilisieren bzw. verfestigen. Die Plastizität sowie die zu erreichenden Festigkeiten sind meist einstellbar und werden auf die aus unterschiedlichen Anwendungsfällen resultierenden Anforderungen angepasst. Diese fließfähigen Verfüllmassen (vgl. Bild 3.4) sind in ihrer Herstellung und Verarbeitung vergleichbar mit Mörtel und Fließestrich, unterscheiden sich aber z. T. in ihren Ausgangsund Zusatzstoffen und je nach Anwendungsgebiet in ihren Endprodukteigenschaften.



Da fließfähige Verfüllmaterialien weder lagenweise eingebaut noch verdichtet werden müssen, können die erforderliche Grabenbreite für das Verlegen von Rohrleitungen und





Kabeln bei vollständiger Zwickelverfüllung beträchtlich reduziert und damit Bodenbewegungen sowie Aufbruch- und Wiederherstellungsarbeiten für die Straßenbefestigung erheblich verringert werden.

Nachfolgend soll auf einige der fließfähigen Verfüllmassen, ihre Eigenschaften und Anwendungsgebiete näher eingegangen werden (vgl. auch [9]):

• Erdbeton (vgl. [10])

Aufgrund seiner geringen Wasserdurchlässigkeit findet Erdbeton vorrangig beim Bau von Dichtwänden (Schlitzwandverfahren oder Rammprofilwänden) Anwendung. Festigkeiten der Betonfestigkeitsklasse B5 werden mit diesem Baustoff erreicht. Der Erdbeton besteht aus einer Mischung von Aktivbentonit, Zement, Stein- oder Tonmehl, Sand, Kies und Wasser.

• Porenleichtbeton (vgl. [11], [12], [13])

Als Verfüllmaterial fand dieser Baustoff erstmals im Bereich der Brennstoffindustrie beim Verfüllen von stillgelegten Tanks Anwendung. Aber auch in der Kanalsanierung wird Porenleichtbeton eingesetzt.

Porenleichtbeton wird aus Sand, Zement und Wasser unter Zugabe eines feinporigen Proteinschaums hergestellt. Er ist frost- und volumenbeständig sowie wärmedämmend. Die erreichbaren Festigkeiten liegen in der Größenordnung von gewachsenem Boden.

Als nachteilig wirkt sich die hohe Schwindneigung dieses Materials aus, was einerseits besondere Ausgangsstoffe und andererseits besondere Einbaubedingungen erfordert.

• Dämmer[®] und Blitzdämmer[®] (vgl. [14])

Dämmer ist ein hydraulisch abbindender Trockenmörtel, der insbesondere aufgrund seiner Fließfähigkeit für das Verfüllen von unterirdischen Hohlräumen und stillgelegten Gas-, Wasser- und Abwasserleitungen geeignet ist. Die Fließfähigkeit des Dämmers wird allein durch die Wasserzugabe geregelt. Es können mehrere hundert Meter Leitungsgraben mit diesem Material ohne Entmischung volumenbeständig verfüllt werden. Außerdem kann dieses Verfüllmaterial als Verpress-, Injektions- und Abdichtmaterial verwendet werden. Dämmer[®] erreicht Festigkeiten zwischen 0,5 und 5 N/mm² und Blitzdämmer[®] durch Zusätze zwischen 15 und 30 N/mm².

Blitzdämmer[®] ist für Wasserschutzzonen I nur bedingt zugelassen. Die Umweltverträglichkeit von Dämmer[®] ist dagegen auch für Wasserschutzzonen I und II sichergestellt.

• Füllmix[®] (vgl. [15])

Füllmix[®] ist ein hydraulisch abbindender Verfüllstoff, der aus Zement und feinkörnigen mineralischen Zusätzen (z. B. Steinkohlenflugasche) besteht. Neben einer guten Volumenbeständigkeit weist Füllmix[®] gute Fließ- und Dämmeigenschaften auf. Laut Werksangabe werden die Inhaltsstoffe je nach Anwendungsfall zusammengestellt und so die geforderten Materialeigenschaften eingestellt. Anwendung findet dieses Verfüllmaterial zum Verfüllen von Hohlräumen aller Art sowie als Injektions-/Verpressmörtel. Es sind





Festigkeiten bis 15 N/mm² erreichbar. Dieses Material kann nach [15] außerhalb der Wasserschutzzone I und II eingesetzt werden.

• Füma[®] und Füma[®]-Boden (vgl. [16], [17])

Füma[®] ist ein dem Transportbeton ähnliches Verfüllmaterial, welches zum Verschließen von Gruben, aber auch unterirdischen Hohlräumen wie Kanälen, Rohrleitungen und bei der Ringraumverfüllung eingesetzt wird. Das extrem fließfähige Material ist pumpfähig und kann je nach Anwendungsfall Festigkeiten von 0,5 – 5 N/mm² erreichen. Füma[®] ist frostbeständig, wärmedämmend und volumenbeständig und kann aufgrund seiner guten Umweltverträglichkeit in allen Wasserschutzgebieten eingesetzt werden.

Bei "Füma[®]-Boden" sowie "Füma[®]-Boden R" (R für "rapid") handelt es sich um spatenfest erhärtende Produkte, welche vorwiegend als Verfüll- und Bettungsbaustoffe im Leitungs- und Kanalbau eingesetzt werden. Sie sollen die verdichtungs- und hohlraumfreie Bettung und Umschließung von Rohren ermöglichen.

• Doroflow[®] (vgl. [18])

Doroflow[®] N, H, R wird werksseitig auf der Basis von hydraulisch erhärtendem Ölschiefer hergestellt und ist sehr gut fließ- und pumpfähig. Dieses Material weisen eine gute Raumbeständigkeit und eine geringe Wasserdurchlässigkeit auf. Die Druckfestigkeit liegt sortenabhängig bei 0,7 bis 41,5 N/mm².

Das Material eignet sich zum Verfüllen und Verpressen von Hohlräumen aller Art, wie stillgelegte Tanks und Kanäle, Tunnel und Stollen. Bei Neuverlegungen von Rohrleitungen wird Doroflow[®] zum Verfüllen von Ringräumen eingesetzt. Außerdem kann der Baustoff zum Einbetten von Kabeln, für Unterfangungen von Fundamenten sowie zur Herstellung von Schmalwänden bzw. als Injektionsmaterial eingesetzt werden.

• Stabilisierte Sandmischung (SSM) (vgl. [19])

Die "Stabilisierte Sandmischung" ist ein in Österreich Anfang der achtziger Jahre speziell für das Verfüllen von Rohrleitungsgräben entwickeltes fließfähiges Verfüllmaterial. Es besteht aus Sand, Wasser, diversen Betonzusatzstoffen, dem mineralischen Bindemittel Zement und einem Fließmittel auf der Basis von mit Druckluft und Wasser aufgeschäumten alkalibeständigen Proteinen. Bei Eignung des Aushubmaterials kann dieses (fraktionsabhängig) wiederverwertet werden und damit der Zuschlagsand z. T. ersetzt werden. Ein Umschließen der Rohrleitungen ohne Verdichtungsarbeit wird durch das Fließverhalten der "Stabilisierten Sandmischung" möglich.

Aufgrund der überwiegenden Bestandteile an Sand der Fraktion bis 8 mm und des niedrigen Zementanteils werden Endfestigkeiten erreicht, die denen des gewachsenen Bodens entsprechen und ein späteres Freilegen der Rohrleitung (Spatenlösbarkeit) ohne Probleme ermöglichen.

• RSS[®]-Flüssigboden (vgl. [20])

Der RSS[®]-Flüssigboden ist ein Gemisch, bestehend aus einem Grundmaterial, dem sogenannten Compound (FB-C) und Wasser. Das Grundmaterial kann aus Sand,





Schluff oder Ton bzw. aus Gemischen hieraus bestehen. Des Weiteren können auch Recycling-Material oder Bodenaushub verwendet werden. Das "Compound" kann abhängig vom Grundmaterial eine unterschiedliche Zusammensetzung haben.

Der RSS[®]-Flüssigboden ist ein Stoffgemisch, das nach Vermischen der Bestandteile je nach Einstellung eine vorübergehend steife, weiche oder breiige Konsistenz erreicht und in diesem Zustand verdichtungsfrei eingebaut werden kann. Das Gemisch verfestigt sich anschließend dauerhaft und zwar soweit, dass es nach Herstellerangaben entsprechend der Bodenklasse 4 (DIN 18300 [21]) gelöst werden kann.

• Weimarer Boden-Mörtel[®] (vgl. [9])

Der Weimarer Boden-Mörtel[®] kann aufgrund seiner Zusammensetzung als konsequente Weiterentwicklung von Boden-Bindemittel-Gemischen angesehen werden. Er besteht zu über 90 % aus Recyclingmaterial und/oder natürlichen Aushubböden, wie Kies, Sand, Schluff und/oder Ton. Neben dem Vorteil der Boden-Bindemittel-Gemische, durch die Zugabe von hydraulischen Bindemitteln Böden wiedereinbaubar zu machen, weist der Weimarer Bau-Mörtel®, wie die "Stabilisierte Sandmischung", den Vorteil auf, fließfähig und damit verdichtungslos einbaubar zu sein. Als Plastifikator fungiert hierbei eine Mischung aus Wasser, Ton sowie speziellen Zusätzen und als Stabilisator Zement.

Dieses fließfähige Verfüllmaterial wurde vorrangig für das Verfüllen von Leitungsgräben entwickelt, aber auch bereits erfolgreich zum Verfüllen von unterirdischen Hohlräumen und Tankanlagen eingesetzt. Je nach Ausgangsmaterial wird eine auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Rezeptur im Labor erstellt. Die Verarbeitungskonsistenz, die Druckfestigkeiten ($> 0,25 \text{ N/mm}^2$) wie auch die Verformbarkeit ($E_{v2} = 35 - 130 \text{ MN/m}^2$ nach [5]) sind hierbei in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial einstellbar.

Erste Untersuchungen zeigen, dass durch Veränderung der Mischungszusammensetzung und Erhöhung des Stabilisatoranteils höhere Druckfestigkeiten erzielt, die Tragfähigkeit der Boden-Mörtel erhöht und damit die Anforderungen an Tragschichten im Straßenbau unter bestimmten Randbedingungen erreicht werden können.

Nach [9] sollen bei Einsatz neuartiger fließfähiger, stabilisierender Verfüllmaterialien, wie dem Bodenmörtel, auch besondere Anforderungen an die Dichtheit des Rohr-Bodensystems erfüllt werden. Durch entsprechende Korngrößenverteilungen des Ausgangsmaterials und Rezepturoptimierung der Boden-Mörtel-Mischung soll eine hohe Wasserundurchlässigkeit bei gleichzeitig guter Spatenlösbarkeit des Bettungsmaterials erzielt werden. Bei Undichtigkeiten im Rohrleitungssystem übernimmt dann das Bettungsmaterial aufgrund einerseits des Schadstoffbinde- und –rückhaltevermögens des enthaltenen Tonmehls und andererseits seiner Wasserundurchlässigkeit die Funktion einer zweiten Dichtschicht. Durch eine solche Bauweise entstände eine Art Rohr im Rohr-Konstruktion, in der das Bettungsmaterial als Schutzrohr fungiert.





3.3 Schüttgüter

Das im Allgemeinen am häufigsten durchgeführte Verfahren zur Verfüllung von Rohrund Leitungsgräben ist der Einbau und die lagenweise Verdichtung von Schüttgütern. Eine Übersicht über verwendbare Schüttgüter gibt Bild 3.5.



Bild 3.5: Schüttgüter, Übersicht

Nachfolgend werden die besonderen Eigenschaften des DYWIDAG-Mineralgemisches, der SILIGRAN-Quarzkörnung und des Materials EKA-Bett dargestellt.

• DYWIDAG-Mineralgemisch[®] (vgl. [22])

Aus den Grundstoffen Kies, Sand und Bentonit wird das DYWIDAG-Mineralgemisch[®] abgestimmt auf die örtlichen Randbedingungen zusammengestellt. Durch das "Schlupfkornprinzip" soll eine maximale Verdichtung und besondere Wasserundurchlässigkeit des Materials erreicht werden, d.h. durch Überschuss an Feinstanteilen soll sich ein schwimmendes Grobkorngefüge einstellen (Bild 3.6).



a) Schlupfkornprinzip

Bild 3.6



b) "Schwimmendes Korn" kein direkter Kontakt zwischen den Hauptkörnern Lastabtragungsprinzipien des Mineralgemisches [22]





Die einzelnen Materialkomponenten werden in einer Mischanlage vorgemischt und im trockenen Zustand eingebaut. Schon bei Eintrag geringer Verdichtungsenergie soll das Feinkorn in die freien Porenräume des Grobkorngerüstes einrieseln.

Eine besondere Bedeutung gewinnt die Abdichtwirkung des DYWIDAG-Mineralgemisches[®] beim Einsatz in Wasserschutzzonen. Bei Undichtigkeiten im Rohrleitungssystem kann das Bettungsmaterial aufgrund seiner Wasserundurchlässigkeit die Funktion einer zweiten Dichtschicht übernehmen. Durch eine solche Bauweise entsteht eine Art Rohr im Rohr-Konstruktion, in der das Bettungsmaterial als Schutzrohr fungiert (vgl. [23]).

• SILIGRAN[®] - Quarzkörnungen (vgl. [24])

SILIGRAN[®] ist natürlicher, mehrfach gewaschener, getrockneter und klassierter Quarzsand oder Quarzkies. Das Material ist nach [24] frei von organischen Verunreinigungen, präzise klassifiziert und weist eine Kornverteilung auf, die nahezu einem "Einkorn"-Gemisch entspricht (Bild 3.7). SILIGRAN[®] besitzt eine Kornrohdichte von 2,65 g/cm³ und eine Schüttdichte (je nach Körnung) zwischen 1,4 - 1,6 g/cm³. Die Eignung von SI-LIGRAN[®] zum Einbau leicht zu verdichtender Bodenkörper mit guten Fließeigenschaften konnte auch in Laborversuchen beobachtet werden [25].



Bild 3.7 SILIGRAN[®] Körnung [24]

• EKA-Bett

Die Firma Klösters Essen GmbH bereitet im Stadthafen Essen Bodenaushub zu einem einbaufähigen Mineralstoffgemisch auf. Der Bodenaushub wird gebrochen, gesiebt und mit feinsten Kalkzusatz von ca. 2 Vol-% (entspricht ca.1,5-Gew%) homogen vermischt. Der so konditionierte Bodenaushub ist leicht chemisch aktiv. Mit der Körnung 0-70 mm wird der Boden als EKA-Füll, mit der Körnung 0-8 mm als EKA-Bett, vertrieben. Der aufbereitete, bindige Bodenaushub EK-Bett weist einen Schluffkornanteil von ca. 30% auf. Verarbeitet wird das Material mit einem Wassergehalt von ca. 13-14%.





3.4 Verlegehilfen

Die Verdichtungsprobleme im Zwickelbereich der oberen Bettungsschicht können beispielsweise auch mit vorgeformten EPS-Bettungskissen gelöst werden (vgl. [26]). Das Rohr wird hierbei in Halbschalen gelegt, welche exakt auf den Außendurchmesser des Rohres abgestimmt sind (Bild 3.8). Als besonders vorteilhaft kann sich bei der Verlegung das geringe Gewicht der vorgeformten Elemente erweisen.



Bild 3.8 EPS-Bettungskissen mit eingelegtem Kanalrohr

Nach der Verlegung der Kissen auf das Planum der unteren Bettungsschicht im Rohrgraben und Einlegen des Rohres ist anschließend lediglich die gut zugängliche Seitenverfüllung einzubringen und der Rohrgraben mit konventionellen Methoden zu verfüllen.



Bild 3.9 EPS-Bettungskissen zur Übereinander-Verlegung von zwei Rohren





Bei Verwendung dieses Systems können Rohre unterschiedlicher Werkstoffe, wie beispielsweise Beton, Kunststoff, Steinzeug usw., eingesetzt werden.

Außerdem kann sich unter bestimmten Randbedingungen, z.B. bei Entwässerungen im Trennsystem, mit besonders geformten Zwischenelementen die Möglichkeit ergeben, Schmutzwasser- und Regenwasserkanäle übereinander in einem Graben zu verlegen (Bild 3.9).

Die Zwischenelemente werden hierbei exakt auf die gegebenenfalls unterschiedlichen Rohraußendurchmesser angepasst. Hierbei kann dann die Grabenbreite im Vergleich zur konventionellen Verlegung, beispielsweise in einem Stufengraben (Bild 3.10), deutlich reduziert werden.



Bild 3.10 Stufengraben nach ATV-DVWK-A 127 [27]

Weitere Ausführungsvarianten sind auch im Zusammenhang mit besonderen Schachtbauwerken bekannt:

- MONO[®]-System-Schacht (siehe <u>www.monosystem.de</u>)
- RSS[©]-Schacht-System (siehe <u>www.basco.de</u>)
- MULTRO[©]-Schacht-System (siehe <u>www.multro.com</u>)

Alle genannten Systeme sollen durch einen geringeren Achsabstand der Rohre im Trennsystem die Kosten bei den Erdarbeiten gegenüber der bisherigen Baupraxis – Verlegung im Stufengraben (vgl. Bild 3.10) bzw. gemäß DIN 1998 [28] - reduzieren.

Weitere Möglichkeiten zur Optimierung der Auflagerbedingungen bietet die Geoton-Matratze (Bild 3.11), welche zur Verbesserung der "unteren Bettungsschicht" (vgl. Bild 3.1) dienen soll, beziehungsweise die so genannte Kasseler Verlegeplatte ([29], [30]). Letztere wird in unterschiedlichen Ausführungen angeboten. Die Plattenlänge entspricht generell der Rohrlänge. Bei Rohren mit Glockenmuffe ist die Plattenlänge um den Muf-





fenbereich verkürzt (Bild 3.12). Diese Platten werden auf verdichteter Grabensohle auf einer Ausgleichsschicht verlegt und ausgerichtet. Die Rohrverlegung auf dieser Verlegehilfe erfolgt dann in der Regel in einem frischem Mörtelbett [29].



Bild 3.11 Einsatzgebiet der Geoton-Matratze (siehe <u>www.fiboexclay.de</u>)



Bild 3.12 Kasseler Verlegeplatte [29]





4 Voruntersuchungen

4.1 Problemstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Ausführungsrisiken beim Einsatz von Bettungsund Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau" wird die Eignung unterschiedlicher Materialien zur Bettung von Rohren untersucht. Zu diesem Zweck werden Rohre unter gleichen Randbedingungen mit unterschiedlichen Bettungsmitteln im Großversuchsstand des IKT in Gelsenkirchen eingebaut. Unter verschiedenen Lastfällen werden die jeweils erreichten Bettungen aufgenommen.

An Bettungsmittel werden zahlreiche Anforderungen gestellt, um eine optimale Bettung und damit Sicherheit einer Rohrleitung zu gewährleisten:

- gute Verdichtbarkeit, ein geringer Aufwand (Energie) zur Verdichtung des Materials und eine geringe Fehleranfälligkeit begünstigen eine gleichmäßige Bettung
- im Endzustand soll das Material spatenlösbar sein
- geringer Einfluss der Zeit auf die Festigkeit und Steifigkeit (Langzeitverhalten)
- mäßiger Einfluss des Spannungszustands auf die Steifigkeit
- Erosionsstabilität/Standfestigkeit
- Dichtwirkung
- nicht schädlich für das Rohr (mechanisch, chemisch)
- Umweltverträglichkeit
- Dauerhaftigkeit

Unterschiedliche Materialien werden nun als Bettungsmittel zur Verfügung gestellt, wobei bis heute nicht systematisch untersucht wurde, welche Materialien diese Anforderungen in welchem Maße erfüllen.

Von Seiten der Netzbetreiber wurden zunächst 11 Materialien vorgeschlagen, welche aus Ihren Erfahrungen und aus Ihrem Informationsstand als Bettungsmittel geeignet sind bzw. als geeignet erscheinen, interessante Alternativen sind oder bereits eingesetzt werden, ohne das entsprechende Kenntnisse vorliegen. Die Materialien lassen sich primär in zwei Hauptgruppen einteilen:

- Schüttgüter, die lagenweise eingebaut und verdichtet werden
- fließfähige Verfüllmaterialien, die verdichtungslos eingebaut werden.

Die Schüttgüter können zudem noch in die bodenmechanisch sinnvollen Untergruppen:

• nichtbindige Schüttgüter





• Schüttgüter mit bindigen Bestandteilen (Schluff, Ton etc.)

unterteilt werden.

Im Großversuchsstand des IKT können jedoch nur fünf Materialien untersucht werden, welches eine Auswahl aus den 11 Materialien erforderlich macht. Diese Auswahl soll gleichzeitig eine möglichst hohe und breit gefächerte Aussagekraft des Forschungsvorhabens erlauben. Deswegen wurden in umfangreichen Laborversuchen die Eigenschaften der vorgeschlagenen Materialien im Hinblick auf die Anforderungen untersucht und bewertet. Dabei sollen Materialien identifiziert werden, welche offensichtlich vergleichbare Eigenschaften aufweisen und ungeeignete Materialien erkannt werden. Anhand dieser Ergebnisse werden dann 5 Materialien mit möglichst für weitere Materialien repräsentativen Eigenschaften ausgewählt.

Von übergeordnetem Interesse waren dabei Versuche zur Bestimmung der Verdichtbarkeit, der Steifigkeit und Festigkeit der vorgeschlagenen Materialien. Basierend auf den Voruntersuchungen im Labor wurde eine Bewertungsmatrix (Tabelle 4.1) aufgestellt, die eine Gegenüberstellung und einen Vergleich der Versuchsergebnisse ermöglichte. Die untersuchten Materialien wurden dabei in drei Gruppen, nichtbindige Schüttgüter, bindige Schüttgüter und fließfähige Materialien, eingeteilt.

	Verlauf Proctor kurve	Verdichtungs energie	Verdicht barkeit	Lösbarkeit	qu	q _u (t)	E _{s1}	E _{s1} (σ)	E _{s2}	E _{s2} (σ)	E _{s1} (t;ρ) E _{s2} (t;ρ)	Verhältnis E _{s2} /E _{s1}
Material	ist der Verlauf der Proctorkurve flach?	ist der Einfluß der Verdichtungsenergie auf die erzielte Dichte gering?	ist die Anfälligkeit bezgl. Dichtevaria- tion gering?	ist das Material spatenlösbar?	Wie hoch ist die einaxiale Druckfestigkeit?	Ist die Druck- festigkeit zeitunabhängig?	Ist der Steifemodul bei Erstbelastung hoch?	lst der Steifemodul vom Spannungsniveau annähernd unabhängig?	Ist der Steifemodul bei Wieder belastung hoch?	Ist der Steifemodul vom Spannungsniveau annähernd unabhängig?	Ist die Steifigkeit zeitunabh.? Ist der Einfluß der Einbau- dichte gering?	Ist die Steifigkeit bei Wiederbelastung nicht signifikant höher als bei Erstbelastung?
fließfähige Betungsmittel												
Schüttgüter bindig												
Schüttgüter nichtbindig												

Tabelle 4.1 Bewertungsmatrix

Für die Bewertungskriterien wurden die in Abschnitt 4.1 vorgestellten Anforderungen an Bettungsmittel zugrunde gelegt. Nachfolgend werden die Kriterien mit der zugehörigen Fragestellung kurz dargestellt, bei der Vorstellung der jeweils durchgeführten Versuche in Abschnitt 4.2 dann genauer erläutert:

- Verlauf der Proctorkurve: ist die Proctorkurve flach und variiert die erreichbare Dichte nicht zu stark in Abhängigkeit des Wassergehalts?
- Verdichtungsenergie: ist der Einfluß der aufgebrachten Energie auf die erzielte Dichte gering?
- Verdichtbarkeit, Anfälligkeit der Materialien hinsichtlich Dichtevariation: wie groß ist die lockerste und dichteste Lagerung und wie korrespondieren diese Dichten mit der Proctordichte?
- Lösbarkeit im Endzustand: ist das Material spatenlösbar?





- Einaxiale Druckfestigkeit: Einfluß des Probenalters auf erreichte Festigkeit
- Steifemodul bei Erstbelastung und Wiederbelastung
- Abhängigkeit des Steifemoduls vom aufgebrachten Spannungsniveau
- Abhängigkeit des Steifemoduls vom Probenalter und von der Einbaudichte
- Verhältnis Steifemodul der Erstbelastung und Wiederbelastung als Beurteilung für den Verdichtungszustand

In der Matrix wurden folgende Bewertungen bezogen auf die mit dem Kriterium verbundene Fragestellung verwendet:

- + Anforderung wird erfüllt
- o Anforderung wird teilweise erfüllt
- Anforderung wird nicht erfüllt

Mit Hilfe der Bewertungsmatrix wurde eine Auswahl der vermeintlich geeignetsten Materialien vorgenommen. Bei der Auswahl der Materialien wurde darauf geachtet, dass mindestens ein Material aus jeder Gruppe ausgewählt wurde, und dieses Material in seinen mechanischen Eigenschaften auch repräsentativ für die jeweilige Gruppe war.

Untersuchte Bettungsmittel

Unter Einteilung in die o.g. Gruppen werden die 11 untersuchten Materialien nachfolgend kurz vorgestellt.

- I. nichtbindige, granulare Schüttgüter
 - Sand-Kies 0-8 (DIN-Boden), Westdeutsche Quarzwerke

Ein feinkiesiger Mittel- bis Grobsand mit feinkiesigen und mittelkiesigen Beimengungen. Nach DIN 18196 gehört er zur Bodengruppe SE (enggestufter Sand).Er läßt sich den natürlichen Schüttgütern zuordnen. Der Rheinkies wird von den Westdeutsche Quarzwerken vertrieben.

• Einkorn 0-1 (SILIGRAN[®]), Westdeutsche Quarzwerke

Siligran[®] ist ein natürlicher, mehrfach gewaschener, getrockneter und klassierter Quarzsand oder Quarzkies. Das Material ist nach [24] frei von organischen Verunreinigungen, präzise klassifiziert und weist eine Kornverteilung auf, die nahezu einem Einkorn-Gemisch entspricht. Einkorn 0-1 mm wird vornehmlich im angel-





sächsischen Raum eingesetzt. Siligran[®] wird von den Westdeutsche Quarzwerken vertrieben.

• Schmelzkammergranulat 0-4 fein, Fa. Klösters, Essen

Schmelzkammergranulat 0-4 fein ist ein Rückstand, der bei der Kohleverbrennung in Kraftwerken entsteht. Kohle mit 6-8% Mineralstoffen wird zermahlen und als Staub in die Feuerung geblasen. Der Staub wird bei Temperaturen von 1400 bis 1600°C verbrannt. Die geschmolzenen Mineralstoffe fließen in ein Wasserbad aus. Durch Abkühlung entsteht das Schmelzkammergranulat. Herkunftsort dieses Schmelzkammergranulats ist das Gasturbinen- und Dampfkraftwerk in Buggenum. Der Größtkorndurchmesser beträgt 4 mm. Das Material wird von der Firma Klösters in Essen vertrieben.

• Schmelzkammergranulat 0-4 grob, Fa. Steag Entsorgung

Schmelzkammergranulat 0-4 grob ist ein Rückstand, der bei der Kohleverbrennung in Kraftwerken entsteht. Kohle mit 5-35% Mineralstoffen wird zermahlen und als Staub in die Feuerung geblasen. In Schmelzkammerkesseln wird die staubfeine, aufgemahlene Kohle bei Temperaturen von über 1500°C verbrannt. Die rotglühende, flüssige Asche wird in einem Wasserbad abgeschreckt und zerfällt dabei in scharfkantige glasige Körner. Herkunftsort dieses Schmelzkammergranulats sind moderne Steinkohlekraftwerke, z.B. das Kraftwerk am Standort Voerde. Der Größtkorndurchmesser beträgt 4 mm. Das Material wird von der Firma Steag Entsorgung in Dinslaken vertrieben.

• Schmelzkammergranulat 0-8, Fa. Steag Entsorgung

Die Herstellung ist identisch mit Schmelzkammergranulat 0-4 grob, lediglich der Größtkorndurchmesser beträgt 8 mm. Das Material wird von der Firma Steag Entsorgung in Dinslaken vertrieben.

- II. bindige Schüttgüter
 - Mineralgemisch, Fa. Heilit Umwelttechnik

Aus den Grundstoffen Sand, Kies und Bentonit wird das DYWIDAG-Mineralgemisch entsprechend den Anforderungen zusammengestellt. Durch das Schlupfkornprinzip soll eine maximale Verdichtung und besondere Wasserundurchlässigkeit des Materials erreicht werden, d.h. durch Überschuss an Feinstanteilen soll sich ein schwimmendes Grobkorngefüge einstellen. Die einzelnen Materialkomponenten werden in einer Mischanlage vorgemischt und in trockenem Zustand (Gesamtwassergehalt 2-3%) eingebaut. Der Größtkorndurchmesser beträgt 16mm. Das Mineralgemisch wird von der Firma Heilit Umwelttechnik in Düsseldorf vertrieben.





• EKA-Bett, aufbereiteter Bodenaushub, Fa. Klösters, Essen

EKA-Bett ist ein aufbereiteter, bindiger Bodenaushub. Der Bodenaushub wird gebrochen, gesiebt und mit feinstem Kalkzusatz (1,5-Gew%) homogen vermischt. Der so konditionierte Bodenaushub ist leicht chemisch aktiv. Mit Körnung 0-70 mm wird der Boden als EKA-Füll, mit Körnung 0-8 mm als EKA-Bett von der Firma Klösters Essen GmbH vertrieben.

- III. Fließfähige Verfüllmaterialien
 - WBM, Recyclingmaterial mit Suspension aus Plastifikator und Stabilisator, FITR Weimar, Fa. Höhler, Dortmund

WBM ist ein Mineralgemisch aus einem Grundmaterial (z.B. Bodenaushub, Sand oder geeignete Recycling-Baustoffe), dem Plastifikator WBM-PLATROS, einem quellfähigen Ton mit anorganischen Zusätzen, der mit Wasser zu einer Suspension verarbeitet wird, und einem Stabilisator (Zement oder Kalk). Dieses fließfähige Mineralgemisch wird verdichtungslos eingebaut, verfestigt sich anschließend dauerhaft, soll aber im Bedarfsfall z.B. mittels Spaten wieder lösbar sein. Je nach Ausgangsmaterial wird eine auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Rezeptur im Labor erstellt. Die Verarbeitungskonsistenz, die Druckfestigkeiten, wie auch die Verformbarkeit sind hierbei in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial einstellbar. Vertrieben wird WBM von dem FITR in Weimar. Lieferant im vorliegenden Fall ist die Firma Höhler in Dortmund.

 RSS, Trockengemisch mit Wasser (schluffiges Aushubmaterial mit RSS[®]-Flüssigboden Compound u. Beschleuniger), Größtkorn 40 mm It. Herstellerangaben, PROV Leipzig, Fa. Klösters, Essen

RSS ist ein Mineralgemisch aus einem Grundmaterial (z.B. Bodenaushub, Sand, Schluff, Ton, geeigneten Recycling-Baustoffen oder Klärschlamm), einem Plastifikator FB-C (quellfähige Tone, andere anorganische Zusätze oder andere mineralische Zusätze) und einem Stabilisator (Zement oder Kalk). Das Bodenmaterial wird mit dem Plastifikator FB-C und dem Stabilisator zunächst trocken gemischt und anschließend mit der benötigten Wassermenge vermischt. Dieses fließfähige Mineralgemisch wird verdichtungslos eingebaut, verfestigt sich anschließend dauerhaft, ist aber It. Herstellerangabe im Bedarfsfall z.B. mittels Spaten wieder lösbar. Je nach Ausgangsmaterial wird eine auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Rezeptur im Labor erstellt. Die Verarbeitungskonsistenz, die Druckfestigkeiten sowie die Verformbarkeit sind hierbei in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial einstellbar. RSS ist auch unter dem Namen RSS-Flüssigboden bekannt und wird von der PROV, Leipzig vertrieben. Lieferant im vorliegenden Fall ist die Fa. Klösters in Essen.





Dämmer, Spezialmörtel, Fertigmischung aus feinsten Bestandteilen und Wasser, Fa. Anneliese

Dämmer ist ein hydraulisches Bindemittel aus feinsten Bestandteilen. Der trockene Zuschlag wird in Säcken angeliefert und vor Ort mit Wasser vermischt. Die benötigte Wassermenge hängt von der gewünschten Konsistenz ab. Die Konsistenz kann von pastös bis hochfließfähig durch Dosierung der Wasserzugabe eingestellt werden. Vertrieben wird Dämmer von der AZBUT in Ennigerloh.

 Füma, Spezialmörtel aus Sand 0-2, Zement, Wasser und Schaum, Fa. Readymix

Füma ist ein dem Transportbeton ähnliches Verfüllmaterial, welches zum Verschließen von Gruben, aber auch unterirdischen Hohlräumen wie Kanälen, Rohrleitungen und bei der Ringraumverfüllung eingesetzt wird. Das extrem fließfähige Material ist pumpfähig und die Druckfestigkeit kann je nach Anwendungsfall eingestellt werden. Das Mineralgemisch wird aus Sand der Körnung 0-2 mm, Zement, Wasser und Schaum hergestellt. Füma wird von der Readymix Baustoffgruppe in Ratingen vertrieben.

4.2 Laborversuche

Nachfolgend werden die durchgeführten Laborversuche und die Versuchsergebnisse dargestellt. Dabei wird auf die jeweilige Bedeutung der Versuche für die Bewertung der Materialien eingegangen.

4.2.1 Korngrößenverteilung

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde nach DIN 18123 durchgeführt. Die Korngrößenverteilung beschreibt das Material aufgrund einer geometrischen Ausdehnung seiner Bestandteile und dient als Grundlage für Beurteilungs- und Anwendungskriterien von Böden. Sie lässt Ruckschlüsse auf bestimmte bodenmechanische Eigenschaften, wie z.B. die Verdichtungsfähigkeit zu. Die Korngrößenverteilung gibt die Massenanteile der in einer Bodenart vorhandenen Körnungsgruppen an. Dabei werden Korngrößen größer 0,063 mm durch Siebung, Korngrößen unter 0,125 mm durch Sedimentation getrennt. Nachfolgend werden in Bild 4.1 und Bild 4.2 die Korngrößenverteilungen aus Übersichtlichkeitsgründen getrennt nach nichtbindigen, granularen und bindigen, liquiden Bettungsmittel aufgeführt.

Die Korngrößenverteilungen wurden ausgewertet und eine Bodenklassifizierung der Materialien nach DIN 18196 durchgeführt (Tabelle 4.2). Die Korngrößenverteilungen der Bettungsmittel Füma sowie Dämmer wurden nicht ermittelt. Da Dämmer sich nur aus Feinstbestandteilen und Zement zusammensetzt, wurde auf eine Schlämmung verzichtet. Von Füma lag keine Probe vor.



Bild 4.1 Korngrößenverteilung der nichtbindigen, granularen Bettungsmittel



Bild 4.2 Korngrößenverteilung der bindigen und fließfähigen Bettungsmittel





RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik

Material	<= 0,06mm [%]	<= 2mm [%]	d ₁₀ [mm]	d ₃₀ [mm]	d ₆₀ [mm]	Ungleichförmigkeitszahl U	Krümmungszahl Cc	Größtkorn d [mm]	Bezeichnung	Bemerkung	
Sand-Kies 0-8	0	66,74	0,27	0,41	1,1	4,1	0,57	8	SE	eng gestuftes Sand-Kies Gemisch	
Einkorn 0-1	0	100	0,22	0,32	0,47	2,1	0,99	1	SE	-	
Schmelzgranulat 0-4f	0	86,9	0,2	0,45	0,76	3,8	1,33	4	SE	ca.14% Feinkiesanteil	
Schmelzgranulat 0-4g	0	72,71	0,28	0,8	1,65	5,9	1,4	4	sw	ca. 30% Feinkiesanteil	
Schmelzgranulat 0-8	0	38,5	0,65	1,71	3,15	4,8	1,4	8	GE	-	
Mineralgemisch	8,3	31,25	0,162	0,715	10,15	62,7	0,3	16	GU	intermittierend gestuft; Schlupfkom- prinzip; Ausfall Grobsand u. Feinkies	
EKA-Bett	32,8	90,96	0,009	0,046	0,125	13,9	1,9	4	SU*	weitgestuft	
WBM	0	49,67	0,27	0,82	2	7,4	1,25	8	GW	-	
RSS	5,65	60,75	0,12	0,39	1,85	15,4	0,69	16	SU	ca. 40% Kieskornanteil weitgestuft	
Dämmer		nicht klassifizierbar									
Füma		nicht klassifizierbar									

Tabelle 4.2Bodenklassifizierung nach DIN 18196

Die Einordnung in Bodengruppen basiert dabei allein auf der stofflichen Zusammensetzung des Materials und ist unabhängig vom Wassergehalt oder der Dichte.

Die Ungleichförmigkeitszahl U und die Krümmungszahl C_C sind wie folgt definiert:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$
$$C_{c} = \frac{d_{30}^{2}}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

 d_{10} , d_{30} und d_{60} sind die Korngrößen, die den Ordinaten 10, 30 bzw. 60 Gew. -% der Körnungslinie entsprechen. U ist ein Maß für die Neigung der Körnungslinie im Bereich von d_{10} bis d_{60} . Ein steiler Anstieg deutet auf das Vorherrschen einer Korngruppe, ein flacher Verlauf auf das Fehlen einer Korngruppe hin. Die Krümmungszahl C_C weist auf den Verlauf der Körnungslinie in diesem Bereich hin.

Das Sand-Kies Gemisch 0-8 gehört zur Bodengruppe SE (enggestufter Sand). Die Ungleichförmigkeitszahl U beträgt ca. 4,1, die Krümmungszahl C_C beträgt 0,57. Das untersuchte Gemisch ist demnach als gleichförmig und enggestuft einzuordnen. Der Überkornanteil beträgt ca. 4%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als gut bis mittel beschrieben.

Einkorn 0-1 gehört zur Bodengruppe SE. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 2,1, die Krümmungszahl C_c beträgt 0,99. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als gut bis mittel beschrieben.





Das Schmelzkammergranulat 0-4f ist ebenfalls in die Bodengruppe SE einzustufen. Der Feinkiesanteil beträgt ca. 14%. Der Überkornanteil beträgt ca. 1%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als gut bis mittel beschrieben.

Das Schmelzkammergranulat 0-4g ist in die Bodengruppe SW (Sand weitgestuft) einzuordnen. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 5,9, die Krümmungszahl C_C beträgt 1,4. Das Granulat ist demnach als ungleichförmig einzustufen. Der Überkornanteil beträgt ca. 4%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als sehr gut beschrieben.

Das Schmelzkammergranulat 0-8 ist in die Bodengruppe GE (Kies enggestuft) einzuordnen. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 4,8, die Krümmungszahl C_C beträgt 1,4. Das Granulat ist demnach als gleichförmig einzustufen. Der Überkornanteil beträgt weniger als 1%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als gut bis mittel beschrieben.

Das Mineralgemisch von Dywidag ist in die Bodengruppe GT (Kies, Ton) einzuordnen. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 62,7, die Krümmungszahl C_C beträgt 0,3. Das Mineralgemisch ist demnach als ungleichförmig, intermittierend gestuft einzuordnen. Die Kornfraktionen Grobsand und Feinkies fallen aus. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als gut beschrieben.

EKA-Bett ist in die Bodengruppe SU^{*} (Sand, Schluff) einzuordnen. Der Schluffanteil beträgt ca. 32,8 Gew.- %. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 13,9, die Krümmungszahl C_C beträgt 1,9. EKA-Bett ist demnach als ungleichförmig, weitgestuft einzuordnen. Der Überkornanteil beträgt ca. 3%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als mittel beschrieben.

WBM ist in die Bodengruppe GW (Kies) einzuordnen, wenn nur der trockene Zuschlag zur Beurteilung herangezogen wird. Kornfraktionen ≤ 0 , 06mm sind nicht vorhanden. Der Grundbestandteil ist Recyclingmaterial. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 7,4, die Krümmungszahl C_C beträgt 1,25. WBM ist demnach als ungleichförmig, normalgestuft einzuordnen. Der Überkornanteil beträgt ca. 8%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als sehr gut beschrieben.

RSS ist in die Bodengruppe SU (Sand, Schluff) einzuordnen. Auch hier wird nur der Zuschlag für die Einordnung in die Bodengruppe verwendet. Der Anteil der Kornfraktionen $\leq 0,06$ mm ist ca. 5,7%. Die Ungleichförmigkeitzahl U beträgt ca. 15,4, die Krümmungszahl C_C beträgt 0,69. RSS ist demnach als ungleichförmig, weitgestuft einzuordnen. Der Überkornanteil beträgt ca. 4%. Die Verdichtungsfähigkeit nach DIN 18196 ist als gut beschrieben.

4.2.2 Proctorversuch

Proctorversuche nach DIN 18127 wurden sowohl an den nichtbindigen als auch an den bindigen Schüttgütern durchgeführt. Da der Einbauwassergehalt bei den fließfähigen





Bettungsmitteln nicht variiert werden kann, wurden mit diesen Materialien keine Versuche durchgeführt. Beim Proctorversuch wird Probenmaterial mit einem definierten Wassergehalt aufbereitet und lagenweise in einen Topf mit definiertem Volumen eingebaut. Dabei wird eine definierte Verdichtungsenergie eingesetzt. Diese hängt von dem Fallgewicht, der Fallhöhe, der Anzahl der Schläge und der Anzahl der eingebauten Lagen ab. Nach Einbau des Materials wird die Trockendichte durch Ofentrocknung bestimmt. Der Versuch wird mit unterschiedlichen Wassergehalten wiederholt. Zur Auswertung des Versuchs wird die Trockendichte über den Wassergehalt aufgetragen. Das Maximum der Kurve gibt die Proctordichte und den optimalen Wassergehalt an. Auf der nassen Seite begrenzt die Sättigungslinie die Proctorkurve. Bei sehr geringen Wassergehalten kann die Verdichtungsfähigkeit wieder zunehmen, so dass auf dem trockenen Ast der Proctorkurve auch höhere Dichten als die Proctordichte erzielbar sind. Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse für die Gruppen der nichtbindigen, granularen (Bild 4.3) und bindigen (Bild 4.4) Materialien dargestellt. Um die Proctorkurven besser vergleichen zu können, wurde die Trockendichte normiert. Hat die Proctorkurve auf dem trockenen Ast einen flachen



Bild 4.3 Proctorkurven der granularen Bettungsmittel, normiert mit Proctordichte

Verlauf, so ist die erreichbare Trockendichte des Bettungsmittels bei gleicher Einbauenergie nicht sensitiv gegenüber Schwankungen des Wassergehaltes. Für praxisnahe Einbaubedingungen, wie z.B. Niederschlag oder Trockenperioden, ist ein derartiges Materialverhalten für granulare und bindige Bettungsmittel von Vorteil. Ein besonders flacher Verlauf der Proctorkurve konnte beim Schmelzgranulat 0-4f und Sand-Kies 0-8 festgestellt werden. Die Schmelzkammergranulate 0-4g und 0-8, sowie das Einkorn 0-1 zeigten einen ausgeprägteren Abfall der Trockendichte bei abnehmendem Wassergehalt auf. Mit zunehmender Reduktion des Wassergehaltes nimmt die Trockendichte auch bei EKA-Bett ausgeprägt ab. Bei sehr feinkörnigen Materialien sind die Bindekräfte von Wasser an den Körnern so groß, dass unter normalen Umständen (Baustellenbedingungen) Wassergehalte von <3% kaum zu erreichen sind. Diese sind nur durch





gezielte Trocknung (z.B. im Trockenofen) erreichbar. Dies gilt für EKA-Bett und in besonderem Maße für Dywidag Mineralgemisch, das mit einem Wassergehalt von ca. 2,5% trocken zur Baustelle geliefert und eingebaut wird.



Bild 4.4 Proctorkurven der bindige Bettungsmittel, normiert mit Proctordichte

Material	Proctordichte _{ρΡr} [g/cm³]	kleinste Trocken- dichte ρ _d [g/cm³] / zugeh. w[%]	Proctordichte [%]	∆w [%]	Beurteilung
Sand-Kies 0-8	1,905	1,842 / w=2,5%	97	9	Schwankung <3%, un- empfindlich
Einkorn 0-1	1,632	1,546 / w=3,9%	94,7	10	Schwankung >5%, emp- findlich
Schmelzkammergranulat 0-4,fein	1,808	1,787 / w=2,1%	99	4	Schwankung <3%, un- empfindlich
Schmelzkammergranulat 0-4,grob	1,767	1,675 / w=7,0%	94,7	14	Schwankung >5%, emp- findlich
Schmelzkammergranulat 0-8	1,607	1,530 / w=7,0%	95	15	Schwankung <5%, mittel- mäßig
Dywidag Mineralgemisch	1,924	1,839 / w=6,0%	95,6	8	Schwankung <5%, mittel- mäßig
EKA-Bett	1,892	1,806 / w=4,2%	95,5	7	Schwankung <5%, mittel- mäßig

Tabelle 4.3 Beurteilung Verlauf der Proctorkuve

In Tabelle 4.3 ist die Beurteilung des Verlaufs der Proctorkurven der Materialien und damit der Sensibilität gegenüber Schwankungen des Einbauwassergehaltes dargestellt. Als Grenzwert für einen besonders flachen Verlauf wird eine Reduktion der Proctordichte um maximal 3% auf dem trockenen Ast festgelegt. Als Grenzwert für eine ausgeprägten Verlauf der Proctorkurve und damit eine höhere Empfindlichkeit gilt eine Abnahme der Trockendichte um mehr als 5% im Vergleich zur Proctordichte. Zudem ist die Bandbreite des Wassergehalts ∆w auf dem trockenen Ast dargestellt, innerhalb der die Dichte des Materials von der optimalen Dichte abweicht. Ein hoher optimaler Wassergehalt in Verbindung mit einem ausgeprägten Verlauf der Proctorkurve hat ein großes Fehlerpotential beim Einbau zur Folge.





Um die Sensibilität des Materials gegen Abweichungen von der vorgeschriebenen Verdichtungsenergie, wie sie oft bei der Verdichtung in den Zwickelbereichen eines Rohrstranges beobachtet wird, zu untersuchen, wurden die Proctorversuche unter Variation der Verdichtungsenergie durchgeführt. Dabei wurde je nach Größtkorn des untersuchten Materials die vorgeschriebene Schlagzahl zweimal um jeweils 33% reduziert. Die Versuchsergebnisse werden in Bild 4.5 bis Bild 4.11 dargestellt. Bild 4.12 zeigt die Abhängigkeit des Verdichtungsgrades D_{Pr} von der Schlagzahl n für alle untersuchten Materialien bei optimalem Wassergehalt.



Bild 4.5 Proctorkurven Sand-Kies 0-8



Bild 4.6 Proctorkurven Einkorn 0-1



Bild 4.7 Proctorkurven Schmelzgr. 0-4f Klösters



Bild 4.8 Proctorkurven Schmelzgranulat 0-4g Steag







Bild 4.9 Proctorkurven Schmelzgranulat 0-8g Steag



Die Untersuchungen zeigen, dass Schmelzgranulat 0-4g und Schmelzgranulat 0-8 bei Reduktion der Verdichtungsenergie deutlich geringere Verdichtungsgrade erreichen, und somit eine hohe Abhängigkeit von der Verdichtungsenergie aufweisen. Einkorn 0-1 (Bild 4.6) reagiert ebenfalls sensibel auf eine Verringerung der Energie, der Verdichtungsgrad fällt besonders im Bereich des optimalen Wassergehalts w=11% bis auf 93% der Proctordichte ab. Schmelzgranulat 0-4f (Bild 4.7), Sand-Kies 0-8 (Bild 4.5) und EKA-Bett (Bild 4.10) zeigen bei optimalem Wassergehalt eine geringe Sensibilität auf die Reduktion der Einbauenergie. Der Verdichtungsgrad fällt bei optimalem Wassergehalt auf jeweils maximal 97%, 98% sowie 96% der Proctordichte ab.



Bild 4.11 Procotorkurven Dywidag Mineralg.0-16

Dywidag Mineralgemisch (Bild 4.11) wird mit einem Wassergehalt von ca. 2,5% eingebaut, d.h. auf der trockenen Seite der Proctorkurve. Das Schlupfkornprinzip bewirkt, dass eine Reduktion der Verdichtungsenergie bei diesem Wassergehalt keinen maßgeblichen Einfluß auf den erreichten Verdichtungsgrad hat. Der minimale Verdichtungsgrad betrug ca. 104% der Proctordichte auf dem nassen Ast der Proctorkurve. Bei





Wassergehalten im Bereich des optimalen Wassergehalts dagegen ist ein deutlicher Einfluß der Verdichtungsenergie festzustellen. Hier fällt die erreichte Dichte auf 91% der Proctordichte ab. In Tabelle 4.4 ist die Reduktion des Verdichtungsgrades infolge der Variation der Einbauenergie sowohl bei optimalem Wassergehalt, als auch bei der minimal erreichten Trockendichte auf dem trockenen Ast der Proctorkurve mit Bewertung des Einflusses dargestellt.



Bild 4.12	Abhängigkeit des	Verdichtungsgrades D _{Pr}	von der Schlagzahl n bei w	opt
		.		- /

Material	Schlagzahl n	ρ _d [g/cm³] (w _{opt})	ΔD _{Pr} [%] (w _{opt})	min ρ _d [g/cm³]	ΔD _{Pr} [%] (min ρd)	ρ _d [g/cm³] (w _{Herst})	∆D _{Pr} [%] (w _{Herst})	Bewertung
	22	1,905	0	1,842	-3,3			
Sand-Kies 0-8	14	1,890	-0,8	1,791	-6,0			boher hei min o
	7	1,868	-1,9	1,765	-7,3			
	25	1,632	0	1,546	-5,3			hoher Finfluss hei w
Einkorn 0-1	16	1,575	-3,5	1,531	-6,2			hohor boi min e
	8	1,525	-6,6	1,489	-8,8			noner bei min p _d
0-1	25	1,808	0	1,787	-1,2			geringer Finfluss hei w
oranulat 0-4 fein	16	1,779	-1,6	1,756	-2,9			geringer Ennass ber w _{opt} ,
g	8	1,759	-2,7	1,739	-3,8			gennger bei min p _d
0 - 1	25	1,767	0	1,675	-5,2			hoher Finfluss hei w
Schmeizkammer granulat 0-4 grob	16	1,655	-6,3	1,563	-11,5			hoher Liniuss bei w _{opt} ,
grandiar o 1,grob	8	1,596	-9,7	1,510	-14,5			noner bei min p _d
	25	1,607	0	1,530	-4,8			bober Finfluss bei w
oranulat 0-8	16	1,461	-9,1	1,443	-10,2			hoher bei wie -
grandiateoo	8	1,425	-11,3	1,407	-12,4			noner bei min p _d
	22	1,924	0	1,839	-4,4	2,008	4,4	geringer Einflugg hei w
Uywidag Mineralgemisch	14	1,859	-3,4	1,816	-5,6	1,976	2,7	igeringer Einnuss ber w _{Herst} ,
mineralgennoen	7	1,757	-8,7	1,715	-10,9	1,89	-1,8	noner bei min p _d
	25	1,892	0	1,806	-4,5			geringer Finflues hei w
EKA-Bett	16	1,873	-1,0	1,735	-8,3			yerniyer Linnuss bel W _{opt} ,
	8	1,820	-3,8	1,617	-14,5			noner bei min p _d

Tabelle 4.4 Beurteilung des Einflusses der Einbauenergie auf den erreichbaren Verdichtungsgrad





4.2.3 Bestimmung der lockersten und dichtesten Lagerung

Die lockerste und dichteste Lagerung der untersuchten nichtbindigen, granularen Bettungsmittel wurde nach DIN 18126 bestimmt. Diese Versuche dienen zur Beurteilung der Verdichtungsfähigkeit I_f und um Anhaltswerte für die Beurteilung der Lagerungsdichte D anstehender oder künstlich verdichteter nicht bindiger Böden zu erhalten. Die lockerste Lagerung wird erreicht, indem man das Material mit sehr wenig Energie (Schütten) in einen definierten Versuchszylinder je nach Korngröße mit einem Trichter einrieselt oder mit einer Kelle so locker wie möglich eingefüllt. Zur Bestimmung der dichtesten Lagerung wird das Material lagenweise eingebracht, anschließend überflutet und mit hoher Energie durch Rütteln (Schlaggabel oder Vibration) verdichtet.

Für die Bewertung der Verdichtbarkeit und Anfälligkeit gegenüber Dichtevariation wird im Folgenden die Differenz zwischen lockerster und dichtester Lagerung (Bandbreite) betrachtet. Unter der Voraussetzung, das die geforderten Materialeigenschaften bei z.B. 100% Proctordichte erreicht werden (Proctordichte ist der Bezugswert), gilt ein Material mit großer Bandbreite als anfälliger gegenüber Schwankungen bzw. Abweichungen der erreichten Dichte von der gewünschten Proctordichte. Zudem wird der Verdichtungsgrad D_{Pr} bei lockerster Lagerung bestimmt und vergleichend bewertet.



Bild 4.13 Proctordichte im Verhältnis zur lockersten-dichtesten Lagerung

Bild 4.13 zeigt die Proctordichte im Verhältnis zur lockersten und dichtesten Lagerung der nichtbindigen, granularen Materialien. Die lockerste Lagerung min ρ_d ist dabei immer links auf der Bandbreite, die dichteste Lagerung max ρ_d befindet sich rechts. Je näher die Proctordichte als Bezugswert an der Dichte bei lockerster Lagerung liegt, desto gutmütiger reagiert ein Material auf fehlerhaften Einbau, wie z.B. zu geringer Verdichtungsenergie. Die Fehleranfälligkeit sinkt, da eine Dichte unterhalb der lockersten Lagerung nur bei feuchten losen Schüttungen auftreten kann. Ist dagegen die Differenz zwischen lockerster und dichtester Lagerung (Bandbreite) groß und liegt die Proctordichte als Bezugswert näher an der Dichte bei dichtester Lagerung oder sogar darüber, desto





anfälliger kann das Material bei ungenügender Verdichtungsenergie reagieren. Die Fehleranfälligkeit bei großer Bandbreite ist viel größer, da das Material eine große Variation von Dichten bis zur lockersten Lagerung durchlaufen kann.

Die Bandbreite von Sand-Kies 0-8 ist am geringsten. Bei Einkorn 0-1 liegt die Proctordichte näher an der lockersten Lagerung und ist gleichzeitig am weitesten von der dichtesten Lagerung entfernt. Der kleinste Verdichtungsgrad D_{Pr} beträgt für beide Materialien 86% bei lockerster Lagerung, somit ist die Fehleranfälligkeit beim Einbau am geringsten.

Das Schmelzkammergranulat 0-4f hat eine geringfügig größere Bandbreite und die Proctordichte liegt näher an der dichtesten Lagerung. Der Verdichtungsgrad bei lockerster Lagerung beträgt D_{Pr} =83,6%. Die Fehleranfälligkeit während des Einbaus ist im Vergleich zu Sand-Kies 0-8 und Einkorn 0-1 größer.

Bei Schmelzkammergranulat 0-4g sowie 0-8 liegt die Proctordichte bei beiden Materialien weit über der dichtesten Lagerung. Bei Durchführung der Proctorversuche wird eine höhere Energie auf das Material eingebracht, als bei der Bestimmung der dichtesten Lagerung. Demzufolge ist ein Kornbruch der Materialien nicht ausgeschlossen. Diese Annahme wurde durch eine Nachsiebung des Schmelzkammergranulats nach einem normierten Proctorversuch untersucht. Die Kornverteilungskurve des Schmelzkammergranulat 0-8 vor und nach Durchführung der Proctorversuche ist in Bild 4.14 dargestellt. Nach dem Proctorversuch ist die Körnungslinie im oberen Bereich leicht nach links verschoben. Dies bedeutet, dass der Anteil der kleineren Korndurchmesser nach dem Proctorversuch größer ist. Ein Kornbruch ist insbesondere wegen der glasartigen Struktur des Materials wahrscheinlich. Diese Granulate haben zwar eine gute Verdichtbarkeit, jedoch ist ein Materialverhalten, bei dem Kornbruch nicht ausgeschlossen werden kann und eine Veränderung der Kornmatrix eintritt bedenklich. Mit einem Verdichtungsgrad von D_{Pr}=75-77% bei lockerster Lagerung liegt im Vergleich zu den übrigen nichtbindigen Schüttgütern die höchste Sensibilität bei fehlerhaftem Einbau vor.



Bild 4.14 Nachsiebung Schmelzkammergranulat 0-8





Die Lagerungsdichte D bei Proctordichte 100% liegt bei allen Materialien über 0,5, somit liegt eine dichte Lagerung vor. Die Lagerungsdichte D bei einer Proctordichte von 90% ist dagegen viel geringer. Sand-Kies 0-8 wird dann als sehr locker und Einkorn 0-1 als locker eingestuft. Schmelzkammergranulat 0-4f wird bei D=0,36 als mitteldicht beschrieben. Die Schmelzkammergranulate von Steag werden mit Lagerungsdichten von D=0,8-0,9 immer noch als dicht beschrieben.

In Tabelle 4.5 ist die zusammenfassende Bewertung der untersuchten Materialien auf Grundlage der Versuche zur Bestimmung der lockersten und dichtesten Lagerung zusammengefasst.

Material	Proctordichte Prr [g/cm ³]	max ρ _d [g/cm³]	min ρ _d [g/cm³]	Bandbreite [max ρ _d -min ρ _d] [g/cm³]	Bandbreite bezogen auf max p _d [%]	kleinst möglicher Verdichtungs grad D _{Pr} [%]	Bewertung
Sand-Kies 0-8	1,905	1,917	1,643	0,274	14	86,2	kleine Bandbreite, geringe Fehleranfälligkeit
Einkorn 0-1	1,632	1,688	1,410	0,278	16	86,4	kleine Bandbreite, geringe Fehleranfälligkeit
Schmelzkammer granulat 0-4,fein	1,808	1,832	1,512	0,320	17	83,6	mittlere Bandbreite, mittlere Fehleranfälligkeit
Schmelzkammer granulat 0-4,grob	1,767	1,653	1,335	0,318	19	75,6	mittlere Bandbreite, hohe Fehleranfälligkeit, Kornbruch
Schmelzkammer granulat 0-8	1,607	1,466	1,240	0,226	15	77,2	kleine Bandbreite, hohe Fehleranfälligkeit, Kornbruch

Tabelle 4.5	Bewertung	der Fehleranfälligkeit	bei Verdichtung
	· · · J	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

4.2.4 Einaxialer Druckversuch

Einaxiale Druckversuche nach DIN 18136 wurden an den fließfähigen Bettungsmitteln durchgeführt. Die Druckfestigkeit von Bodenproben bei unbehinderter Seitendehnung wurde ermittelt. Die Versuche wurden an zylindrischen Proben mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (Stauchungsgeschwindigkeit) durchgeführt.

Jeweils zwei Versuche wurden an 7, 14 und 28 Tage alten Proben durchgeführt. Gemessen wurden jeweils die Vertikalkraft sowie die Zusammendrückung der Probe. Mit Durchführung der Versuche zu verschiedenen Zeitpunkten nach Herstellung der Proben konnte festgestellt werden, ob die erzielbare Druckfestigkeit zeitabhängig ist, ob die Bettungsmittel ein Nacherhärten aufzeigen. Bild 4.15 zeigt die erreichte einaxiale Druckfestigkeit q_u in Abhängigkeit des Probenalters. Alle Materialien zeigten eine annähernd lineare Zunahme der Druckfestigkeit mit der Zeit auf.


Bild 4.15 Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit mit der Zeit

Somit kam es bei allen Proben zu Nacherhärtungen, die der Zugabe von Zement bei der Herstellung der Bettungsmittel zuzuordnen sind. Hierbei zeigte das Bettungsmittel Dämmer eine deutliche Zunahme der einaxialen Druckfestigkeit mit der Zeit. Die Festigkeit stieg von 0,73 N/mm² bei einem Probenalter von 7 Tagen auf ca. 1,77 N/mm² bei einem Probenalter von 28 Tagen an. Dies entspricht einer Erhöhung von q_u um 142%. RSS und Füma zeigen keine so deutlich ausgeprägte Nacherhärtung. Die Festigkeit q_u von RSS stieg von 0,23 N/mm² auf 0,4 N/mm², dies entspricht einer mittleren Zunahme von ca. 71%. Die Festigkeit von Füma stieg von 0,25 N/mm² auf 0,46 N/mm², dies entspricht einer Erhöhung um 83%. Die Festigkeit q_u von WBM stieg am geringsten von 0,18 N/mm² auf 0,24 N/mm² an. Dies entspricht einer Zunahme von 28%. In Tabelle 4.6 werden die erreichten einaxialen Druckfestigkeiten und die jeweilige Nacherhärtung vergleichend dargestellt. Dabei wird eine Zunahme der Druckfestigkeit bis 38% als schwache, eine Zunahme bis 75% als mittlere und eine Zunahme bis 100% als starke Nacherhärtung bewertet.

Material	einaxiale	Druckfestigkei	t q _u [N/mm²]	Nacherhärtung	Bewertung
material	7 Tage	14 Tage	28 Tage	[%]	Domontariy
RSS	0,233	0,314	0,399	71	mittlere Nacherhärtung
WBM	0,183	0,201	0,235	28	schwache Nacherhärtung
Dämmer	0,731	1,123	1,767	142	ausgeprägte Nacherhärtung
Füma	0,248	0,336	0,455	83	starke Nacherhärtung

Tabelle 4.6 Nacherhärtungsverhalten der fließfähigen Bettungsmittel

4.2.5 Kompressionsversuch

Kompressionsversuche wurden nach DIN 18135 durchgeführt. Das Verhältnis der Probenhöhe im Kompressionsgerät zum Größtkorndurchmesser betrug 5. Die Bettungsmittel wurden jeweils mit unterschiedlichen Dichten (z.B. 90%, 95%, 100% Proctordichte) eingebaut und stufenweise belastet, entlastet und wiederbelastet. Die Spannungsni-





veaus σ_1 betrugen 50, 100, 200 und 400 kN/m². Die Spannungen bis 100 kN/m² wurden in Anlehnung an eine oberflächennah verlegte Leitung mit max. 5m Überdeckung gewählt, die höheren Laststufen sollten das Spannungsniveau abdecken, das während der Messsternversuche (Lastplattendruckversuche, Kapitel 5.3.3) erwartet wurde. Jede Laststufe wurde so lange konstant gehalten, bis die Stauchung der Probe abgeklungen war. Gemessen wurden die aufgebrachte Kraft sowie die Zusammendrückung der Probe. Die Auswertung der Versuche erfolgte mit Last-Setzungsdiagrammen sowie Porenzahl-Druckdiagrammen. Durch den Einbau der Proben mit variablen Dichten, konnte der Einfluss einer unzureichenden Verdichtung auf die Steifigkeit der Bettungsmittel untersucht werden. Die fließfähigen Bettungsmittel wurden jeweils nach 7, 14 und 28 Tagen Probenalter untersucht, um eine eventuelle Abhängigkeit der Steifigkeit vom Probenalter zu untersuchen und somit eine auftretende Nacherhärtung nachzuweisen. Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens eines Verfüllmaterials werden in Anlehnung an den Plattendruckversuch nach DIN 18134 die Drucksetzungslinien bei Erstbelastung und bei Wiederbelastung herangezogen. Der Steifemodul bei Wiederbelastung wird mit E_{s2}, bei Erstbelastung mit E_{s1} bezeichnet. Für die Beurteilung des Verdichtungszustandes wurde das Verhältnis E_{s2}/E_{s1} herangezogen.

 E_{s2} ist für die Beurteilung des Verformungsverhaltens eines Bodens besser geeignet als E_{s1} aus der Erstbelastung, weil die zugehörige Last-Setzungslinie ausgeprägt spannungsabhängig sein kann. E_{s1} wird bestimmt, um durch den Vergleich mit E_{s2} die Beschaffenheit des zu prüfenden Bodens vor dem Versuch beurteilen zu können. Eine schlechte Verdichtung verursacht verhältnismäßig große Setzungen, was in einem niedrigen E_{s1} -Wert und einem hohen Verhältnis E_{s2}/E_{s1} zum Ausdruck kommt.

Die absoluten Anforderungen an den Steifemodul des Bettungsmaterials für eine gute Bettung von Rohren sind bislang allerdings noch nicht geklärt. Um eine gleichmäßige Bettung zu erreichen, sollte der Steifemodul auch bei Variation der Einbaudichte nicht zu große Schwankungen aufweisen. Zudem sollte die Steifigkeit nicht zu klein sein, um eine Bettung des Rohres überhaupt zu ermöglichen oder um bei biegeweichen Rohren den Aufbau des horizontalen Bettungsreaktionsdrucks und somit ein Mittragen der Bettungsschicht zur Verringerung der Rohrbeanspruchungen zu ermöglichen. Um aus den Kompressionsversuchen Beurteilungskriterien für die Bewertungsmatrix abzuleiten, wurden daher folgende Fragestellungen untersucht:

- Ist der Steifemodul bei Erstbelastung hoch?
- Ist der Steifemodul bei Wiederbelastung hoch?
- Ist die Steifigkeit bei Wiederbelastung signifikant höher als bei Erstbelastung?

Die Steifigkeit eines Bodens ist spannungsabhängig. Gute Bettungseigenschaften hat ein Material, dessen Steifigkeit nicht ausgeprägt vom Spannungsniveau abhängig ist. Dies bedeutet, dass eine hohe Steifigkeit bei geringem Spannungsniveau und kein übermäßiger Anstieg oder Abfall der Steifigkeit bei Spannungszuwachs, also eine konti-





nuierliche Entwicklung der Steifigkeit vorteilhaft ist. Hiezu wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Ist der Steifemodul E_{s1} vom Spannungsniveau annähernd unabhängig?
- Ist der Wiederbelastungsmodul Es2 vom Spannungsniveau annähernd unabhängig?

Um die Anfälligkeit des Bettungsmittels gegenüber Schwankungen in der Einbaudichte zu beurteilen wurde die Fragestellung:

• Ist der Einfluss der Einbaudichte gering?

untersucht. Diese Fragestellung konnte nur bei den granularen und bindigen Bettungsmittel (Schüttgütern) untersucht werden. Ein Bettungsmittel zeigt ein gutmütiges Verhalten, wenn eine Reduktion der Einbaudichte, wie sie in der Praxis oft in den Zwickelbereichen der Leitungszone auftritt, keine wesentliche Änderung der Steifigkeit bewirkt, und somit eine kontinuierliche Bettung des Rohres gewährleistet ist.

Um die Annahmen einer Rohrstatik zuverlässig erfüllen zu können, sollten Bettungsmittel ihre Eigenschaften im Laufe der Zeit (Langzeitverhalten) nicht wesentlich verändern. Zudem muss das Bettungsmittel auch nach Jahren mit angemessenem Aufwand lösbar sein.

In diesem Zusammenhang wurde die Fragestellung:

• Ist die Steifigkeit zeitunabhängig?

untersucht. Diese Fragestellung wurde nur bei den fließfähigen Bettungsmitten untersucht, da bei diesen Materialien Zement als Stabilisator verwendet wurde. Eine übermäßige Nacherhärtung wurde dabei als nicht vorteilhaft für die Eignung als Bettungsmittel angenommen. Hierbei wurde in Anlehnung an die Betontechnologie ein Zeitraum von 28 Tagen nach Einbau untersucht, innerhalb dessen der Großteil der Aushärtung abgeschlossen sein sollte.

Nachfolgend wird der Verlauf der aus Kompressionsversuchen ermittelten Steifigkeit bei Erstbelastung E_{s1} sowie bei Wiederbelastung E_{s2} in Abhängigkeit von der aufgebrachten Spannung dargestellt. Bei den granularen und bindigen Materialien wird zudem die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Einbaudichte, und bei den fließfähigen Materialien die Abhängigkeit vom Probenalter dargestellt.

Sand-Kies 0-8

Der Steifemodul bei Erstbelastung E_{s1} beträgt bei einer Auflast von σ_1 =100 kN/m² ca. 10 MN/m². Wird die Spannung bis σ_1 =400 kN/m² gesteigert, so wächst der Steifemodul auf ca. 34 MN/m² an. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 80 MN/m² bei einer Auflast von σ_1 =100 kN/m². Eine Erhöhung der Spannung bewirkt keinen deutlichen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls. Die Variation der Einbaudichte hat keinen entscheidenden Einfluss auf den erzielten Steifigkeits- und Wiederbelastungsmodul. Das





Material ist mit der Einschränkung, dass im vorliegenden Fall nur ein minimaler Verdichtungsgrad von $D_{Pr}=90\%$ untersucht wurde, in dieser Hinsicht als gutmütig zu bezeichnen.



Bild 4.16 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, Sand-Kies 0-8

			σ ₁ =100kW/m²	σ ₁ =200kW/m²	σ ₁ =400kW/m²	Zunahmefaktor $\Delta E_s = f^* \sigma_1$	Verhältnis E _{s2} /E _{s1} (σ ₁ =100kN/ m²) [-]	Verhältnis E _{s2} /E _{s1} (σ ₁ =400kN/m ²) [-]
	n90%	E _{s1} [kN/m²]	10145	17647	28670	61,75	7.46	2 99
Sand-Kies 0-8	Dpr-3070	E_{s2} [kN/m ²]	75682	76287	85738	33,52	0+,1	2,00
	D =1000/	E_{s1} [kN/m ²]	12520	22478	34963	74,81	6 65	2.62
	D _{Pr} = 100 %	E _{s2} [kN/m²]	83318	77530	91620	27,67	0,00	2,02
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-19,0	-21,5	-18,0			
	D _{Pr}	ΔE _{s2} [%]	-9,2	-1,6	-6,4			

Tabelle 4.7 Zusammenstellung Steifemoduln Sand-Kies 0-8

Einkorn 0-1

Der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} beträgt ca. 16 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m². Die Erhöhung der Auflastspannung bis σ_1 =400 kN/m², bewirkt eine deutliche Zunahme von E_{s1} auf ca. 52 MN/m². Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} wurde im Mittel zu 40 MN/m² bei σ = 100 kN/m² berechnet. Eine Erhöhung der Spannung bewirkt einen starken Anstieg des Wiederbelastungsmoduls auf bis zu 100 MN/m². Die Variation der Proctordichte hat im Bereich geringer Spannungen bis σ_1 =200 kN/m² keinen entscheidenden Einfluß auf den erzielten Steifigkeits- und Wiederbelastungsmodul. Ab einer Spannung von σ_1 = 200 kN/m² steigt der Erstbelastungsmodul mit zunehmender Proctordichte deutlicher an. Beim Wiederbelastungsmodul konnte ab einer Spannung von σ_1 =100 kN/m² keine signifikante Abhängigkeit von der Proctordichte festgestellt werden. Das Material ist in dieser Hinsicht als gutmütig zu bezeichnen (Voraussetzung Proctordichte fällt nicht unter 90%, niedrige Spannung bis σ_1 = 200 kN/m²). Die Steifigkeit ist stark spannungsabhängig.







Bild 4.17 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, Einkorn 0-1

							Verhältnis	Verhältnis
			$\sigma = 100 k M/m^2$			Zupabmofaldor AE -f* a	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
					01-400614/111	Zunanmenaktor AL _s -r O ₁	(o ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	D -00%	E _{s1} [kN/m²]	15564	23056	35853	73,78	3 20	2.58
Einkorn 0-1	Dpr-9070	E_{s2} [kN/m ²]	49835	64976	92670	155,76	5,20	2,00
	D -100%	E _{s1} [kN/m²]	18230	26782	54295	131,15	1.60	1.05
	Dpr=100%	E_{s2} [kN/m ²]	29127	60455	100534	259,66	1,00	1,05
	Ånderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-14,6	-13,9	-34,0			
	D _{Pr}	ΔE _{s2} [%]	71,1	7,5	-7,8			



Schmelzgranulat 0-4f



Bild 4.18 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, Schmelzgranulat 0-4f

Der Steifemodul bei Erstbelastung E_{s1} beträgt 10 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m². Mit zunehmender Auflastspannung bis σ_1 =400 kN/m², steigt der Steifemodul auf bis zu 32 MN/m² an. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 80 MN/m² bei einer Auflast von σ_1 =100 kN/m². Eine Erhöhung der Spannung bewirkt einen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls auf bis zu 160 MN/m². Die Variation der Proctordichte hat im Bereich geringer Spannungen bis σ_1 =100 kN/m² keinen entscheidenden Einfluß auf den erzielten Erst- und Wiederbelastungsmodul. Der Einfluß der Einbaudichte wird mit zunehmender Spannung σ deutlicher. Für den Wiederbelastungsmodul konnte nur eine geringe Ab-





hängigkeit von der Einbaudichte festgestellt werden. Das Material ist in dieser Hinsicht als gutmütig zu bezeichnen (Voraussetzung Einbaudichte fällt nicht unter $D_{Pr}=84\%$, niedrige Spannung bis $\sigma_1=100$ kN/m²). Die Steifigkeit ist eindeutig spannungsabhängig.

							Verhältnis	Verhältnis
			a =100kbl/m2	a =2001/b1/m2	σ −400l∆l/m²	Zupabmofaldor AE -ft.c	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
				01-2006001	01-400/40/11		(o ₁ =100kN/	(σ ₁ =400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	D =00%	E _{s1} [kN/m²]	8081	13364	22455	47,91	0.00	7 14
Schmelzkammergranulat 0-4f	Dpr-90%	E _{s2} [kN/m²]	80727	120785	160401	265,58	9,99	7,14
Ŭ	D _{Pr} =100%	E _{s1} [kN/m²]	14472	24389	35323	69,50	4.77	3,72
		E _{s2} [kN/m²]	69067	103086	131408	207,80	4,77	
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-44,2	-45,2	-36,4			
	D _{Pr}	ΔE _{s2} [%]	16,9	17,2	22,1			

Tabelle 4.9 Zusammenstellung Steifemoduln Schmelzkammergranulat 0-4f

Schmelzgranulat 0-4g

Bei σ_1 =100 kN/m² beträgt der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} ca. 15 MN/m². Mit zunehmender Spannung steigt der Steifemodul auf bis zu 45 MN/m² an. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 50 MN/m² bei einer Auflast von σ_1 =100 kN/m². Eine Erhöhung der Spannung bewirkt einen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls auf bis zu 120 MN/m². Der Einfluß der Proctordichte ist auch im Bereich geringer Spannungen bis σ_1 =100 kN/m² auffällig. Mit 90% Proctordichte beträgt der Steifemodul 10 MN/m², mit 100% Proctordichte ca. 20 MN/m². Der Steifemodul steigt mit zunehmender Proctordichte stärker an. Das Wiederbelastungsmodul zeigt eine ähnliche Abhängigkeit von der Proctordichte auf. Das Material ist dieser Hinsicht als weniger gutmütig zu bezeichnen. Die Steifigkeit ist eindeutig spannungsabhängig.



Bild 4.19 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, Schmelzgranulat 0-4g



							Verhältnis	Verhältnis
			a =100kN/m²		$\sigma = 400 \text{ kM/m}^2$	Zupahmofaldor ∆E −f*∞.	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
				01-2008 011	01-400810111		(o ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	D00%	E _{s1} [kN/m²]	8397	11334	15753	24,52	1.85	5,55
Schmelzkammergranulat 0-4g	Dpr=3070	E _{s2} [kN/m²]	40729	65424	87376	155,49	4,00	
	D -100%	E _{s1} [kN/m²]	18321	29372	35323	56,67	2.54	3,52
	D _{Pr} =100%	E_{s2} [kN/m ²]	64292	96648	124176	199,61	5,01	
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-54,2	-61,4	-55,4			
D _{Pr}		ΔE _{s2} [%]	-36,6	-32,3	-29,6			

Tabelle 4.10 Zusammenstellung Steifemoduln Schmelzkammergranulat 0-4f

Schmelzgranulat 0-8

Für eine Einbaudichte D_{Pr}=80% beträgt der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} ca. 5MN/m², bei σ_1 =100 kN/m². Mit 100% Proctordichte beträgt der Steifemodul bei gleicher Spannung ca. 50 MN/m². Bei Erhöhung der Auflastspannung auf σ_1 =400 kN/m², beträgt der Erstbelastungsmodul 20 MN/m² bei 90% Proctordichte und 70 MN/m² bei 100% Proctordichte an. Für σ_1 =100 kN/m² beträgt der Wiederbelastungsmodul E_{s2} im Mittel 75 MN/m². Mit zunehmender Spannung steigt der Wiederbelastungsmodul auf bis zu 130 MN/m² an. Die Variation der Einbaudichte zeigt einen deutlichen Einfluss auf die Steifigkeit bei Erstbelastung, der Wiederbelastungsmodul ist von der Proctordichte erst ab σ_1 =100 kN/m² deutlich abhängig. Das Material ist in dieser Hinsicht als weniger gutmütig zu bezeichnen. Die Spannungsabhängigkeit der Steifemoduln ist nicht ausgeprägt. Die gravierend höhere Steifigkeit bei 100% Proctordichte bestätigt den beim Proctorversuch beobachteten Kornbruch. Bei geringerer Dichte tritt durch den Einbau in den Versuchsbehälter wahrscheinlich weniger Kornbruch auf und dadurch verringert sich die Umlagerung der Kornstruktur. Dieser Effekt bewirkt einen deutlich geringeren Erstbelastungsmodul. Der erheblich höhere Wiederbelastungsmodul bei 90% Proctordichte kann ebenso auf diesen Effekt zurückgeführt werden. Während der Erstbelastung kann es zu Kornbruch und für den Lastabtrag günstigeren Umlagerungen kommen, die dann den erhöhten Wiederbelastungsmodul bei geringerer Dichte bewirken.



Bild 4.20 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, Schmelzgranulat 0-8





							Verhältnis E _{s2} /E _{s1}	Verhältnis E _{s2} /E _{s1}
			σ ₁ =100kN/m²	σ ₁ =200kN/m²	σ ₁ =400kN/m²	Zunahmetaktor ΔE _s =t*σ ₁	(o ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m
	D _{Pr} =80%	E _{s1} [kN/m²]	6703	8587	11230	15,09		/[]
Schmelzkammergranulat 0-8	D _{Pr} =90%	E _{s2} [kN/m²]	77604	110112	140762	210,53	11,58	12,53
	D -100%	E _{s1} [kN/m²]	49906	60360	69973	66,89	1.50	1.20
	D _{Pr} =100%	E_{s2} [kN/m ²]	74655	76515	90309	52,18	1,50	1,29
	Ånderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-86,6	-85,8	-84,0			
	D _{Pr}	ΔE _{s2} [%]	4,0	43,9	55,9			



Dywidag Mineralgemisch

Bei σ_1 =100 kN/m² beträgt der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} ca. 7 MN/m² für 95% Proctordichte und 13 MN/m² für 100% Proctordichte. Bei Laststeigerung zeigt sich ein ähnliches Bild. Mit 30 MN/m² bei 100% Proctordichte ist der Steifemodul doppelt so hoch wie derjenige bei 95% Proctordichte. Der Wiederbelastungsmodul Es2 beträgt im Mittel 60 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m². Die Laststeigerung bewirkt einen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls auf bis zu 125 MN/m². Die Einbaudichte hat einen eindeutigen Einfluß auf den erreichbaren Steifemodul der Erstbelastung. Ein Einfluss der Einbaudichte auf den Wiederbelastungsmodul ist im Bereich geringer Spannungen bis σ_1 = 200 kN/m² nicht gegeben. Ab σ_1 =200 kN/m² ändert sich dieses Bild, der Einfluss der Einbaudichte wird deutlich sichtbar. Bei 90% Proctordichte fällt der Wiederbelastungsmodul auf 74MN/m², dagegen steigt der Wiederbelastungsmodul bei 100% Proctordichte kontinuierlich auf 125 MN/m² an. Die Abhängigkeit des Erstbelastungsmoduls von der aufgebrachten vertikalen Spannung ist im Gegensatz zum Wiederbelastungsmodul nicht ausgeprägt.



Bild 4.21 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, Dywidag Mineralgemisch



							Verhältnis	Verhältnis
			$\alpha = 100 k M/m^2$	$a_{\rm c} = 200 k M/m^2$	$m^2 = -4.00 \text{ km}^2$	400l/hl/m² Zupobrofoldor AE -ftm	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
			01-100810111	01-200/0/011	01-400/010/11		(o ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	D -00%	E _{s1} [kN/m²]	4326	8154	13114	29,29	13.03	5.66
Dywidag Mineralgemisch	Dpr-3070	E_{s2} [kN/m ²]	56371	80149	74224	59,51	15,05	5,00
	D _{Pr} =100%	E _{s1} [kN/m²]	13029	21354	29719	55,63	4.50	4,23
		E_{s2} [kN/m ²]	59741	88231	125584	219,48	4,09	
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-66,8	-61,8	-55,9			
	D _{Pr}	ΔE _{s2} [%]	-5,6	-9,2	-40,9			



EKA-Bett



Bild 4.22 Steifemodul in Abh. von Belastung und Proctordichte, EKA-Bett

Bei σ_1 =100 kN/m² beträgt der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} ca. 14 MN/m², und steigt mit zunehmender Belastung auf bis zu 35MN/m² bei 100% Proctordichte an. Bei Einbau des Materials mit 91% Proctordichte wird bei maximaler Belastung mit 16MN/m² nur die Hälfte des Steifemoduls erreicht. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 40 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m². Die Laststeigerung bewirkt einen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls auf bis zu 85 MN/m². Die Variation der Einbaudichte zeigt einen eindeutigen Einfluss der Einbaudichte auf den erreichbaren Erstbelastungsmodul bei höheren Spannungen, im Bereich bis σ_1 =100 kN/m² verhält sich das Material neutral gegenüber der Variation der Einbaudichte. Der Wiederbelastungsmodul ist von der Einbaudichte weniger abhängig. Die Spannungsabhängigkeit des Erstbelastungsmoduls ist nicht ausgeprägt. Eine größere Abhängigkeit ist bei der Wiederbelastung festzustellen.

							Verhältnis	Verhältnis
			a =100kbl/m2	$\sigma_1^2 = \sigma_1 = 200 \text{kN/m}^2 = \sigma_1 = 400 \text{kN/m}^2 = Zu$	$\sigma = 400 k M/m^2$	Zupebmofeldor AE -f*a	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
						(o ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m	
							m²) [-]	²)[-]
	D -00%	E _{s1} [kN/m²]	12881	15934	15674	9,31	2.70	5.40
EKA-Bett	Dpr=9070	E_{s2} [kN/m ²]	42217	60428	84606	141,30	3,20	5,40
	D _{Pr} =100%	E _{s1} [kN/m²]	13756	22940	34984	70,76	2.02	2,16
		E _{s2} [kN/m²]	38963	57427	75530	121,89	2,00	
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-6,4	-30,5	-55,2			
	D _{Pr}		8,4	5,2	12,0			







Der Einfluss der Einbaudichte ist insgesamt im relevanten Spannungsbereich als nicht sehr ausgeprägt zu beurteilen.

WBM

Bei σ_1 =100kN/m² beträgt der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} im Mittel 14 MN/m². Die Steigerung der Belastung bewirkt bei allen Proben einen Abfall auf ca. 11 MN/m². Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} liegt ab einem Probenalter von 14 Tagen im Schnitt bei 100 MN/m². Für eine 7 Tage alte Probe wurde ein deutlich geringerer Wiederbelastungsmodul von 50 MN/m² ermittelt. Laststeigerung bewirkt einen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls auf bis zu 140 MN/m². Das Probenalter hat einen geringen Einfluss auf den erzielten Erstbelastungsmodul, dagegen ist der Wiederbelastungsmodul vom Probenalter stärker abhängig. Die Steifemoduln bei Erst- und Wiederbelastung sind in geringerem Ausmaß spannungsabhängig, wobei bei der Erstbelastung der Abfall des Steifemoduls auffällig ist. Die Abhängigkeit der Steifigkeit vom Probenalter lässt auf eine Nacherhärtung schließen, die ab einem Probenalter von 14 Tagen eine geringe Zunahme verzeichnet.



Bild 4.23 Steifemodul in Abh. von Belastung und Probenalter, WBM

							Verhältnis	Verhältnis
			σ ₁ =100kN/m ² σ ₁ =200k	a = 2001/01/m2	σ −400LM/m²	Zupabmofaldor AE =f*.c.	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
				01-200600			(o ₁ =100kN/	(o1=400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	7 Taga	E_{s1} [kN/m ²]	11401	12230	10573	-2,76	1 27	11 21
WBM	/ Tage	E_{s2} [kN/m ²]	48737	106339	119560	236,08	4,27	11,01
	28 Tago	E _{s1} [kN/m²]	16681	15048	11360	-17,74	6.01	10.00
	20 Tage	E_{s2} [kN/m ²]	103518	122314	146776	144,19	0,21	12,92
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	-31,7	-18,7	-6,9			
	Probeniter	ΔE _{s2} [%]	-52,9	-13,1	-18,5			

Tabelle 4.14 Zusammenstellung Steifemoduln WBM

RSS

Der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} beträgt bei σ_1 =100 kN/m² ca. 10 MN/m². Auf Lasterhöhung reagiert das Material in Abhängigkeit vom Probenalter unterschiedlich. So steigt der Steifemodul auf ca. 14 MN/m² für Proben bis 14 Tagen Alter an, Proben mit





28 Tagen Alter erreichen ein E_{s1} von 23 MN/m². Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 100 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m², dabei fällt auf, dass mit zunehmendem Probenalter der Widerbelastungsmodul leicht abfällt. So wird der höchste E_{s2} bei den jüngsten Proben festgestellt, der kleinste bei den Proben mit 28 Tagen Erhärtungszeit. Mit zunehmender Spannung steigt der Wiederbelastungsmodul auf bis zu 160 MN/m² an. Das Probenalter hat einen deutlichen Einfluss auf den erzielten Erst- und Wiederbelastungsmodul. Der Erstbelastungsmodul ist in geringem Ausmaß spannungsabhängig, der Wiederbelastungsmodul zeigt eine größere Abhängigkeit auf. Die Abhängig der Steifigkeit vom Probenalter lässt auf eine Nacherhärtung schließen, die kontinuierlich abläuft.



Bild 4.24 Steifemodul in Abh. von Belastung und Probenalter, RSS

							Verhältnis	Verhältnis
			a.=100kN/m²	a. = 200kNl/m²	a.=400kbl/m²	Zunahmefalder ∆E −f*a.	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
				01-2008 em 01	01-400610111		(σ ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	7 Тадо	E _{s1} [kN/m²]	11359	13030	12970	5,37	11.97	12.20
RSS	/ Tage	E_{s2} [kN/m ²]	134778	157694	171215	121,46] 11,07	15,20
	28 Tago	E _{s1} [kN/m²]	10200	17372	22990	42,63	0.70	E 04
	20 Taye	E _{s2} [kN/m²]	88906	108279	133539	148,78	0,72	3,01
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	11,4	-25,0	-43,6			
	Probeniter	ΔE _{s2} [%]	51,6	45,6	28,2			

Tabelle 4.15 Zusammenstellung Steifemoduln RSS

Füma

Der Steifemodul bei Erstbelastung E_{s1} beträgt im Mittel 8 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m². Lasterhöhung auf σ_1 =200 kN/m² bewirkt keine signifikante Änderung des Erstbelastungsmoduls, E_{s1} beträgt dann im Mittel 10 MN/m² an. Spannungen über σ_1 =200 kN/m² führen zu einem rapide abnehmenden Steifemodul, der bei weiterer Laststeigerung wieder ansteigt (Bild 4.26, zweite Versuchsreihe). Dies ist ein Indiz dafür, dass die Kornstruktur des Materials zusammenbricht, die Sandkörner sich umlagern und einen erneuten Anstieg der Steifigkeit ermöglichen. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 90 MN/m² bei σ_1 =100 kN/m². Mit zunehmendem Probenalter nimmt der Widerbelastungsmodul leicht ab. Lasterhöhung bewirkt einen Anstieg des Wiederbelastungsmodul leicht ab.





tungsmoduls auf bis zu 100 MN/m². Ab einer Spannung von σ_1 =200 kN/m² ist ebenfalls ein schlagartiger Abfall des







Bild 4.26 Steifemodul in Abh. von Belastung und Probenalter, Füma/ Bruch

Wiederbelastungsmoduls festzustellen (Bild 4.26). Das Probenalter hat einen deutlichen Einfluß auf den erzielten Erst- und Wiederbelastungsmodul. Beide sind eindeutig spannungsabhängig. Eine zu hohe Spannung führt zu einer Zerstörung des Korngefüges und zu Umlagerungen. Allerdings ist dies für den Rohrleitungsbau, bei dem Spannungen von ca. σ_1 =100 kN/m² zu erwarten sind von geringerer Bedeutung. Kommt es im Rohrleitungsbau zu unregelmäßigen Belastungen des Rohres, so zeigt das Material ein gutmütiges Verhalten, indem es der Last ausweicht und somit Spannungskonzentrationen nicht begünstigt. Punktlasten können somit nicht auftreten. Der Einfluss des Probenalters ist als gering einzustufen.

							Verhältnis	Verhältnis
				$\sigma = 200 \text{ kM/m}^2$	$\alpha = 400 \text{ kM/m}^2$		E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
					Zunanmeraktor AL _s -r o ₁	(o ₁ =100kN/	(o ₁ =400kN/m	
							m²) [-]	²)[-]
	7 Tago	E _{s1} [kN/m²]	7747	7987	2850	-17,81	14.62	1.07
Füma	7 Taye	E_{s2} [kN/m ²]	113242	98767	3036	-400,75	14,02	1,07
	28 Tage	E _{s1} [kN/m²]	4404	10792	9003	16,72	17 10	1,96
		E_{s2} [kN/m ²]	75305	99947	17624	-209,75	17,10	
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	75,9	-26,0	-68,3			
Probeniter		ΔE _{s2} [%]	50,4	-1,2	-82,8			







Dämmer

Der Steifemodul bei Erstbelastung E_{s1} beträgt bei σ_1 =100 kN/m² ca. 25 MN/m². Lasterhöhung bis σ_1 = 400 kN/m², bewirkt eine nahezu lineare Zunahme des Erstbelastungsmoduls auf ca. 55 MN/m². Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} beträgt im Mittel 90 MN/m² bei einer Auflast von σ_1 =100 kN/m² und einem Probenalter von 28 Tagen. Jüngere Proben zeigen einen hohen Wiederbelastungsmodul von 250 MN/m² bei identischer Auflast. Wird die Spannung gesteigert, fällt der Wiederbelastungsmodul rapide ab und erholt sich anschließend wieder. Eine 28 Tage alte Probe zeigt dieses Verhalten nicht auf. Mit zunehmender Spannung steigt der Wiederbelastungsmodul kontinuierlich an. Das Probenalter hat einen geringen Einfluss auf den Erstbelastungsmodul, jedoch einen eindeutigen auf den Wiederbelastungsmodul. Der Erst- sowie der Wiederbelastungsmodul sind ausgeprägt spannungsabhängig.



Bild 4.27 Steifemodul in Abh. von Belastung und Probenalter, Dämmer

							Verhältnis	Verhältnis
			$\sigma = 100 l M/m^2$	² σ ₁ =200kN/m ²	N/m² ح ₁ =400kN/m² z	Zupabmofaldor AE -f*a	E _{s2} /E _{s1}	E _{s2} /E _{s1}
							(σ ₁ =100kN/	(o1=400kN/m
							m²) [-]	²)[-]
	7 7 7 200	E _{s1} [kN/m²]	27483	38304	54435	98,01	0.01	4.92
Dämmer	/ Tage	E_{s2} [kN/m ²]	242220	144893	262529	73,85	0,01	4,02
	28 Tage	E _{s1} [kN/m²]	24155	40444	62598	139,79	2 5 2	2,75
		E _{s2} [kN/m²]	85051	127147	172342	317,42	3,32	
	Änderung E _s	ΔE _{s1} [%]	13,8	-5,3	-13,0			
	Probeniter ΔE _{s2} [%		184,8	14,0	52,3			

Tabelle 4.17 Zusammenstellung Steifemoduln Dämmer

4.2.6 Korndichte

Die Korndichte der Bettungsmittel wurde nach DIN 18124 bestimmt. Für Dämmer und Füma wurde auf eine Bestimmung der Korndichte verzichtet. Auffällig sind die Unterschiede bezüglich der Korndichte zwischen den Schmelzkammergranulaten des Lieferanten Steag Entsorgung und Klösters. Die Verfahrenstechnik bei der Kohleverbrennung scheint einen hohen Einfluss auf die Korndichte zu haben und macht die Schmelzkammergranulate in diesem Punkt untereinander nicht vergleichbar bzw. vom Herstellungsort abhängig.





Bettungsmittel	Korndichte	
	[g/cm³]	
Sand-Kies 0-8	2,571	
Einkorn 0-1	2,615	
Schmelzkammergranulat 0-4,fein / Fa. Klösters	2,700	
Schmelzkammergranulat 0-4,grob / Fa. Steag	2,533	
Schmelzkammergranulat 0-8 / Fa. Steag	2,533	
Dywidag Mineralgemisch	2,660	
EKA-Bett	2,549	
WBM	2,607	
RSS	2,585	

Tabelle 4.18 Korndichte der Bettungsmittel

4.2.7 Bestimmung des Wassergehalts

Der Wassergehalt bei Anlieferung der Materialien wurde nach DIN 18121 durch Ofentrocknung bestimmt.

Es ergaben sich folgende Wassergehalte bei Anlieferung/Herstellung vor Ort:

	Wassergehalt			
Bettungsmittel	[%]			
Sand-Kies 0-8	4,45			
Einkorn 0-1	0,09			
Schmelzkammergranulat 0-4,fein	3,81			
Schmelzkammergranulat 0-4,grob	5,1			
Schmelzkammergranulat 0-8	5,3			
Dywidag Mineralgemisch	2,1			
EKA-Bett	12,8			
WBM	27,0			
RSS	29,0			
Dämmer	60,0			
Füma	8,1			

Tabelle 4.19 Wassergehalt bei Anlieferung

4.2.8 Glühverlust

Der Glühverlust wurde nach DIN 18128 bestimmt. Organische Bestandteile binden viel Wasser und erhöhen dadurch den Porenanteil. Bereits bei geringen Anteilen organischer Bestandteile können die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften des Bodens verschlechtert werden. Der Glühverlust gibt den Gewichtsverlust beim Glühen bezogen auf die Trockenmasse der Probe an. EKA-Bett weist mit einem Glühverlust von 2,34%, im Verhältnis zu den restlichen Bettungsmaterialien einen hohen organischen Anteil auf.



Bettungsmittel	Giunverlust [%]		
Sand-Kies 0-8	0,58		
Einkorn 0-1	0,16		
Schmelzkammergranulat 0-4,fein / Fa. Klösters	0,88		
Schmelzkammergranulat 0-4,grob / Fa. Steag	0,44		
Schmelzkammergranulat 0-8 / Fa. Steag	0,45		
Dywidag Mineralgemisch	0,7		
EKA-Bett	2,34		

Tabelle 4.20 Glühverlust der Bettungsmittel

4.3 Auswahl der Bettungsmittel für die Großversuche

Auf Basis der Versuchsergebnisse der Voruntersuchungen wurde die Bewertungsmatrix (Tabelle 4.21) aufgestellt.

In der Matrix wurden folgende Bewertungen bezogen auf die mit dem Kriterium verbundene Fragestellung verwendet:

- + Anforderung wird erfüllt
- o Anforderung wird teilweise erfüllt
- Anforderung wird nicht erfüllt.

Bei einem Arbeitstreffen mit Beteiligung der Netzbetreiber am 19.11.2003 wurden nach Vorstellung der Versuchsergebnisse auf Grundlage der Bewertungsmatrix und nach Diskussion der Ergebnisse der Voruntersuchungen fünf Materialien ausgewählt.

Als Referenzbettungsmittel wurde das Sand-Kies-Gemisch 0-8 ausgewählt. Aus der Gruppe der Bettungsmittel mit flüssigem Einbau wurden WBM und RSS ausgewählt. Füma wurde wegen der Tendenz zum Zusammenbruch des Gefüges unter bereits geringen Lasten ausgeschlossen und Dämmer wegen der sehr großen Nacherhärtung und Festigkeit. Zudem bestanden aufgrund der Zusammensetzung dieser Materialien keine Zweifel über die Fließfähigkeit der Materialien und deren Vermögen das Rohr vollständig zu umschließen und gleichmäßig zu betten. WBM und RSS waren in Ihren Eigenschaften vergleichbar, eines dieser Bettungsmittel konnte als repräsentativ für die Gruppe ausgewählt werden. Jedoch waren die Zusammensetzungen der Zuschlagstoffe (Recyclingmaterial bei WBM und Bodenaushub bei RSS) unterschiedlich. Seitens der Netzbetreiber bestand Interesse am Einsatz von RSS wegen der Verwendung von bindigem Bodenaushub, im Unterschied zu WBM mit Recyclingmaterial als Grundbestand-teil. Zudem war auch ein direkter Vergleich der beiden Bettungsmittel erwünscht.

Die Schmelzgranulate der Körnung 0-4 g und 0-8 wurden aufgrund des großen Einflusses der Verdichtungsenergie und der schwierigen Verdichtbarkeit einerseits und der sich in den Vorversuchen andeutenden Tendenz zum Kornbruch ausgeschlossen. Einkorn 0-1 wurde wegen des hohen Einflusses der Verdichtungsenergie, wegen der aus-





geprägten Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und wegen der ausgeprägten Spannungsabhängigkeit der Verformungsmoduln ausgeschlossen. Das Schmelzgranulat 0-4f zeigte in den Vorversuchen ein ähnliches Verhalten wie das Sand-Kies-Gemisch 0-8 und war somit nicht mit den beiden anderen Schmelzgranulaten vergleichbar. Aufgrund der Versuchsergebnisse konnte man davon ausgehen, das das Sand-Kies-Gemisch 0-8 repräsentativ für die Gruppe der nichtbindigen Schüttgüter war und somit eine Anwendung des Schmelzgranulat 0-4f keine zusätzlichen Erkenntnisse versprach. Nicht zuletzt wurde das Material auch wegen fehlenden Interesses seitens der Netzbetreiber ausgeschlossen. Die Betreiber äußerten Bedenken darüber, das das Schmelzkammergranulat von nur einem Kraftwerk geliefert wird, und somit die flächenhafte Versorgung zumindest fraglich ist.

Material		Verlauf Proctor kurve	Verdichtungs energie	Verdicht barkeit	Lösbarkeit	qu	q _u (t)	E _{s1}	Ε _{s1} (σ)	E _{s2}	Ε _{s2} (σ)	E _{s1} (t;ρ) E _{s2} (t;ρ)	Verhältnis E _{s2} /E _{s1}
		ist der Verlauf der Proctorkurve flach?	ist der Einfluß der Verdichtungsenergie auf die erzielte Dichte gering?	ist die Anfälligkeit bezgl. Dichtevaria- tion gering?	ist das Material spatenlösbar?	Wie hoch ist die einaxiale Druckfestigkeit?	Ist die Druck- festigkeit zeitunabhängig?	Ist der Stelfemodul bei Erstbelastung hoch?	Ist der Stelfemodul vom Spannungsniveau annähernd unabhängig?	Ist der Steifemodul bei Wieder belastung hoch?	Ist der Stelfemodul vom Spannungsniveau annähernd unabhängig?	Ist die Steifigkeit zeitunabh.? Ist der Einfluß der Einbau- dichte gering?	Ist die Stelfigkeit bei Wiederbelastung nicht signifikant höher als bei Erstbelastung?
e" BM	WBM				+	ο	+	ο	+	+	0	+	-
	RSS				+	0	ο	0	+	+	0	ο	-
"flüssiç	Dämmer				o	+	-	+	-	+	-	ο	0
	Füma				+	0	ο	-	+	+	•	ο	-
"bindige" BM	Mineral gemisch 0-16	ο	0		+			ο	+	+	0	ο	ο
	EKA-Bett 0-8	о	ο		+			о	+	ο	ο	+	+
"granulare" BM	Sand-Kies 0-8	+	+	0	+			0	ο	+	+	+	0
	Einkorn 0-1	-	-	+	+			0	-	ο	-	ο	+
	Schmelz granulat 0-4f	+	+	ο	+			0	ο	+	-	ο	0
	Schmelz granulat 0-4g	-	-	-	+			0	+	ο	0	-	0
	Schmelz granulat 0-8	ο	-	-	+			+	0	+	0	-	+

Tabelle 4.21 Bewertungsmatrix aller Bettungsmittel

In der Gruppe der bindigen Schüttgüter wurden Dywidag Mineralgemisch und EKA-Bett ausgewählt. Zwar waren die Ergebnisse der Voruntersuchungen durchaus vergleichbar, jedoch waren die Bettungsmittel in der Grundzusammensetzung derart verschieden, dass ein Material nicht als repräsentativ für die Gruppe erachtet wurde. Daher wurde entschieden, beide Bettungsmittel in das Versuchsprogramm aufzunehmen. Zudem bestand seitens der Betreiber großes Interesse am Einsatz von Dywidag Mineralgemisch. Da EKA-Bett einerseits in den Vorversuchen durchaus positive Eigenschaften aufzeigte, andererseits der Einsatz von bindigem Bodenaushub in der Leitungszone allgemein als problematisch erachtet wird, stellte sich die Frage, wie das Bettungsmittel unter realen Bedingungen einzustufen ist.



5 Versuche im Maßstab 1:1

5.1 Versuchskonzept

Für den Einbau der unterschiedlichen Bettungsmittel war eine Aufteilung des Großversuchsstandes in 5 Kammern geplant, wobei je Kammer zwischen zwei Schächten die Versuchsrohre verlegt werden sollten (Bild 5.1).





Geplantes Versuchskonzept – Draufsicht

Der Versuchsablauf gliederte sich in folgende Einzelphasen (vgl. Bild 5.2):

- Phase 1: Einbauzustand
- Phase 2: Ziehen der Kanaldielen
- Phase 3: Zyklische/Statische Belastung
- Phase 4: Simulation vom Grundwasseranstieg
- Phase 5: Simulation von Sackungen







Im Rahmen der detaillierten Versuchsplanung zeigte sich, dass für die Zugänge der Rohrstränge Rechteckschächte eingesetzt werden mussten. Die Querschnittänderung von DN1200 der Rechteckschächte mittels einer exzentrischen Reduzierplatte zu DN1000 des aufgehenden Schachtaufbaus führte zu der in Bild 15 dargestellten Geometrie. Bei dieser Geometrie bestand die Vermutung, dass die Absätze dem Boden ein Auflager bieten. Die Folge eines derartigen Auflagers in Verbindung mit den kurzen Rohrstrecken von 3m könnte die Ausbildung eines Gewölbes in Rohrlängsrichtung, mit einhergehender signifikanter Reduktion der vertikalen Bodenspannungen auf den Rohrstrang, sein.

Aus diesem Anlass wurden Vorberechnungen mit dem FE- Programm ABAQUS durchgeführt, um den Einfluss des Einsatzes der Rechteckschächte DN 1200 mit der aufgehenden Konstruktion aus einer Reduzierplatte und Schachtringen DN 1000 zu untersuchen. Durch die Verwendungen der exzentrischen Reduzierplatte entstand an der Schachtkonstruktion ein Absatz von 54 cm (Bild 5.3/Bild 5.4).



Bild 5.3 Geplantes Versuchskonzept Längsschnitt



Bild 5.4 Absatz am Schachtaufbau

Die FE- Berechnung sollte klären, ob sich zusätzlich zu der unvermeidlichen Gewölbebildung zwischen den Spundwänden quer zum Rohrstrang, auch längs der Achse des Rohrstrangs eine Gewölbebildung mit einhergehender Reduzierung der vertikalen Spannungen auf den Rohrstrang einstellt. Im Referenzmodell wurde als Randbedingung ein Schacht ohne Absatz aus Reduzierring zweidimensional modelliert, im zweiten 2D-Modell wurde der Absatz berücksichtigt (Bild 5.5). Das dritte Modell wurde dreidimensional modelliert (Bild 5.6). Die Randbedingungen aus Bild 5.10 wurden abschließend angesetzt, d.h. es wurde die Verwendung nur eines Schachtes mit Reduzierplatte und einer beschichteten Folie zur Reduktion der Reibung zwischen Kammerwand und Boden am offenen Ende der Rohre untersucht. Zusätzlich wurde die Reibung zwischen Boden und Spundwänden berücksichtigt.













Der Boden wurde mit dem elasto - plastischen Stoffansatz nach Mohr - Coulomb mit den Parametern:

- Reibungswinkel φ = 34,8°
- Kohäsion c = 11,8 kN/m²
- Trockendichte ρ = 1,86 g/cm³
- E-Modul = 15MN/m²
- Querkontraktion v = 0,3

berücksichtigt. Die Parameter entstammen [31]. Durch Kontaktdefinitionen zwischen Schacht und Boden und im 3D-Modell zusätzlich zwischen Spundwand und Boden wurde der Einfluss der Wandreibung untersucht. Dabei wurde das Reibungsmodell nach Coulomb mit $\tau = \sigma_{kont}^* \mu$ verwendet. Der Reibungskoeffizient wurde zwischen μ =tan ϕ bis μ =0 variiert.



Bild 5.7 Vertikale Spannung σ_z ohne Berücksichtigung der Reibung zwischen Schacht und Boden (2D-Modell)

Bild 5.7 und Bild 5.8 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen. Dargestellt werden die vertikalen Spannungen über den gesamten Rohrstrang in zwei Höhenlagen, z=0,25 m und z=1,20 m über dem Rohrscheitel. Gestrichelt dargestellt ist die rechnerische Überlagerungsspannung. In Bild 5.7 sind die Spannungen ohne Berücksichtigung der Reibung zwischen Schacht und Boden dargestellt. Bild 5.8 zeigt die Ergebnisse bei Annahme einer Reibung von μ =tan ϕ zwischen Schacht und Boden. In beiden Abbildungen ist der Einfluss der exzentrischen Aufsatzringe und des daraus resultierenden Absatzes deutlich erkennbar. Wie bereits vermutet, hängt sich der Boden an den Aufsatzringen auf, es kommt zur Gewölbebildung und damit einhergehend zu einer Reduktion der vertikalen Spannungen auf den Rohrstrang. Besonders deutlich zeigt sich der Einfluss der Einfluss der S.7. Obwohl bei den Berechnungen keine Reibung zwi-





schen Schacht und Boden angesetzt wurde ist eine deutliche Spannungsreduktion ersichtlich. In der Mitte von Rohr 2 reduziert sich die vertikale Spannung um ca. 10 %. In der Mitte der Rohre 1 und 3 beträgt die Spannungsreduktion schon 25%.



Bild 5.8 Vertikale Spannung σ_z unter Berücksichtigung der Reibung zwischen Schacht und Boden (2D-Modell)

Betrachtet man die Ergebnisse der Berechnungen mit angenommener Reibung zwischen Schacht u. Boden in Bild 5.8, so ergibt sich in der Mitte von Rohr 2 eine Spannungsreduktion infolge des Absatzes von ca. 8%. In der Mitte von Rohr 1 und 3 beträgt die Abnahme ca. 21 %.

Eine Addition der Einflüsse aus Absatz und Reibung führt zu höheren Spannungsreduktionen, im Messquerschnitt von Rohr 2 ca. 15%, in den Messquerschnitten von Rohr 1 und 3 ca. 29%.



Bild 5.9 Vertikale Spannung σ_z unter Berücksichtigung der Reibung zwischen Schacht und Boden (3D-Modell)





Da die Spannungen auf den Rohrstrang signifikant durch Gewölbewirkung längs zur Rohrachse reduziert werden, stellte sich die Frage, ob an den Messguerschnitten in Rohr 1 u. 3 überhaupt brauchbare Messungen erlangt werden können. Hierbei war zu bedenken, dass in den Berechnungen die Gewölbebildung quer zur Rohrachse (zwischen den Spunddielen) bewusst nicht berücksichtigt wurde, da sie den in situ Bedingungen entspricht. Durch diese Lastumlagerung reduzieren sich die Spannungen aufgrund der geringeren zu überbrückenden Breite nochmals signifikant. Die dreidimensionale FE- Berechnung mit Ansatz der Randbedingungen aus Bild 5.10 (ein Rechteckschacht mit Absatz, vier Versuchsrohre, Gleitfolie an Kammerwand am offenen Ende der Rohre, Reibung zwischen Boden und Schacht, Kammerwand, Spundwand), ergab eine gleichmäßige Reduktion der vertikalen Spannungen infolge Gewölbebildung über den Messrohren von ca. 15% (Bild 5.9). Hierbei wurde für die Kontaktdefinitionen zwischen Schacht und Boden eine Reibungskoeffizient von μ =tan ϕ und für die Kontaktdefinition zwischen Boden und Spundwand μ =tan 2/3 ϕ angesetzt. An der Stirnwand der Kammer wurde die Applikation einer beschichteten Folie durch einen abgeminderten Reibungskoeffizienten von μ =0,15 berücksichtigt.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, wurde der Versuchsaufbau wie in Bild 5.10 dargestellt verändert. Es wurden von einem Rechteckschacht ausgehend vier Versuchsrohre in jeder Kammer verlegt, der ursprünglich geplante zweite Rechteckschacht entfiel. Das offene Ende der Rohre wurde mit einer Endkappe verschlossen. An der Kammerwand am offenen Ende der Rohre wurde eine Gleitfolie zur Reduzierung der Reibung angebracht. Zusätzlich wurde zwischen Folie und Kammerwand ein Gleitmittel appliziert.



Bild 5.10 Ausgeführtes Versuchskonzept – Draufsicht





5.2 Versuchsaufbau und -durchführung

5.2.1 Randbedingungen

Zur Auswahl der zu untersuchenden Bettungsmittel wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 4). Unter Berücksichtigung dieser Untersuchungen und in Abstimmung mit den beteiligten Netzbetreibern wurden folgende Materialien ausgewählt:

- 1. Schüttgut: Sand-Kies 0/8 (Korngemisch nach DIN EN 1610 [4])
- 2. Schüttgut: EKA-Bett (Korngemisch mit bindigen Anteilen, Klösters GmbH, Essen)
- 3. Schüttgut: Mineralgemisch (Heilit Umwelttechnik GmbH, Düsseldorf)
- 4. Fließfähig: Weimarer Boden-Mörtel[®] (FITR, Weimar)
- 5. Fließfähig: RSS[®]-Flüssigboden (RSS-System, Leipzig)

Für die Versuchsdurchführung wurden vergleichbare Randbedingungen geschaffen, indem die untersuchten Verfüllmaterialien in der Leitungszone einheitlich bis ca. 25 cm über bzw. unter dem Versuchsrohr eingebaut wurden und als umgebender Boden und Überschüttung in allen Fällen ein Kies-Sand-Gemisch 0/8 zum Einsatz kam.

Der Großversuchsstand des IKT wurde zur Durchführung der Versuche in 5 etwa gleich große Kammern unterteilt. Die Abmessungen der Kammern betrugen ca. 6 m (Länge) x 3 m (Breite) x 6 m (Höhe).

Um während der Versuchsdurchführung die Zugänglichkeit zu den Rohren zu ermöglichen, wurde entsprechend den Vorschriften der Tiefbau-Berufsgenossenschaft [32] die Mindestnennweite DN 800 gewählt. Die Rohrlänge betrug 1,0 m, um auf einer Stranglänge von 4 m eine Beweglichkeit in der Rohrverbindung zu ermöglichen und ein "Aufhängen" der Einzelrohre zu vermeiden.

Auf Basis der unter Abschnitt 5.1 dargestellten Änderungen wurde ein Versuchsaufbau nach Bild 5.11 ausgeführt. Von einem rechteckigen Stahlbetonschacht DN 1200 aus wurden je Kammer 4 Versuchsrohre eingebaut. Als Rohrmaterial wurde duktiles Gusseisen nach DIN EN 598 [33] gewählt, um die Messung der Verformungen mit Dehnungsmessstreifen zu ermöglich (vgl. Abschnitt 5.2.2.3). Lediglich das Rohr mit dem integrierten Messstern wurde aufgrund der erforderlichen Schweißbarkeit des Rohrmaterials aus Stahl (St 37) hergestellt. Die Abmessungen der Gussrohre sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Innendurchmesser Außendurchmesser		Wanddicke	Baulänge		
821,2 mm	842 mm	10,4 mm	1000 mm		

Tabelle 5.1 Abmessungen der duktilen Gussrohre nach DIN EN 598 [33]





Das Ende der Rohre wurde mit einem Kunststoffdeckel und einer lose vorgesetzten Stahlplatte verschlossen, um ein Eindringen von Boden und Wasser zu verhindern und gleichzeitig die Verformung des Rohres zuzulassen. Die Verbindung der Rohre erfolgte mit Tyton[©]-Kupplungen, welche über die Rohrenden geschoben wurden.

Als Grabenbreite wurde die Mindestgrabenbreite für die Nennweite DN 800 nach DIN EN 1610 [4] mit 1,7 m gewählt.





Für den Verbau des Leitungsgrabens wurden Spunddielen Krupp KL 3/6 verwendet, welche bis ca. 0,5 m unter die Sohle des Rohrgrabens reichten. Dies vor allem vor dem Hintergrund, dass der Verbau mit Spunddielen eine ungünstige Rohrbelastung nach sich zieht (vgl. [34]).

In den Kammern 1 bis 5 wurden folgende Bettungsmittel verwendet:

- Kammer 1: Mineralgemisch (**MGM**)
- Kammer 2: Weimarer Boden-Mörtel[®] (WBM)
- Kammer 3: EKA-Bett (EKB)
- Kammer 4: RSS[®]-Flüssigboden (**RSS**)
- Kammer 5: Sand-Kies-Gemisch (KSG)





In Klammern hinter der Materialbezeichnung ist die im Folgenden verwendete Abkürzung des jeweiligen Materials angegeben. Der Aufbau der Einzelkammern zwischen den Leichtprofilen wurde für sämtliche Bettungsmittel identisch ausgeführt. Quer- und Längsschnitt durch eine Kammer sind in Bild 5.12 dargestellt.



Bild 5.12 Aufbau der Kammern im Großversuchsstand (Messtechnik siehe Abschnitt 5.2.2)

Es wurde ein rechteckiges Beton-Schachtunterteil mit 1,62 m Kantenlänge verwendet, auf dem über eine Reduzierplatte Schachtringe mit einer Nennweite von DN 1000 aufgesetzt wurden. Die Überdeckungshöhe betrug bei allen Kammern ca. 3,2 m. Mittig in den Kammern wurde zur Simulation von Senkungen ein Druckkissen eingebaut (vgl. Abschnitt 5.2.3).

5.2.2 Messtechnik

5.2.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der durchgeführten Großversuche wurden unterschiedliche Messsysteme installiert. Diese dienten sowohl der Ermittlung signifikanter Bodenparameter, als auch der Bestimmung von Rohrspannungen und –verschiebungen. Im folgenden werden diese Systeme detailliert beschrieben.





5.2.2.2 Messstern

Um direkte Informationen über die Bettung der Rohre in den entsprechenden Versuchsphasen im ungestörten Zustand zu erhalten, wurde eine Einrichtung konzipiert, welche das hydraulische, spannungsgeregelte Ausfahren kleiner Lastplatten bei gleichzeitiger Erfassung des Weges ermöglicht. Diese als Messstern bezeichnete Einrichtung wurde in die jeweiligen Messrohre fest integriert.



Bild 5.13 Messstern



Bild 5.14 Anordnung der kleinen Lastplatten am Rohrumfang

Die Lastplatten wurden in den kennzeichnenden Punkten eines Rohres eingebaut, im Scheitel, Kämpfer und Zwickelbereich (Bild 5.14). Um evtl. Ausfälle einzelner Lastplatten zu kompensieren, wurden im Kämpfer und im Zwickel jeweils zwei Lastplatten symmetrisch angeordnet.

Die Lastplatten werden über eine hydraulische Druckvorrichtung be- und entlastet und sind in Ihrer Wirkungsweise als Hydraulikzylinder zu bezeichnen. Über einen Druckschlauch sind die Zylinder mit der Druckvorrichtung verbunden. Die Zylinderkolben fungieren dabei als kleine Lastplatten mit dem Durchmesser d=100 mm.

Um in Anlehnung an DIN 18134 u. DIN 18135 ein stufenweises Be- und Entlasten der Lastplatten zu ermöglichen wurde eine pneumatische Steuerung des Hydraulikdrucks entwickelt. Damit war es möglich die Kraft/Spannung, die der Zylinderkolben auf den Boden ausübt, während der Belastungsstufen konstant zu halten. Mit einem sehr fein regelbaren Druckregler (0,01 bar Luftdruck) mit integriertem analogem Feinstmanomter wurde ein Pneumatikzylinder mit Kolbendurchmesser d_{Pneu} =172,7 mm mit Druckluft beaufschlagt. Der Kolben des Pneumatikzylinders war starr mit dem Kolben eines Hydraulikzylinders (im weiteren Umwandler genannt) mit Kolbendurchmesser d_{Hyd}=50 mm verbunden (Bild 5.15). Durch den kleineren Durchmesser des Hydraulikzylinders wird der Luftdruck in einen höheren Hydraulikdruck beträgt p_{Pneu} / p_{Hyd} = 1: 8,33. Mit diesem Prinzip war es somit möglich, mit Hilfe des Hausanschlusses des IKT, an dem maximal 10 bar Luftdruck anliegen, einen Hydraulikdruck von 83,3 bar zu erzeugen. Da der Druckregler sehr fein regelbar ist, konnte zudem der erzeugte Hydraulikdruck konstant gehalten werden.





Der Umwandler ist über einen Druckschlauch mit einem Verteiler verbunden (Bild 5.15). Der Verteiler wiederum wurde mittels Druckschläuchen mit den Hydraulikzylindern im Rohr verbunden. Um die Hydraulikzylinder jeweils getrennt belasten zu können, wurden am Verteiler fünf Absperrhähne montiert. Der in den jeweiligen Zylindern im Rohr aufgebrachte Hydraulikdruck, wurde während der Messungen kontinuierlich mit fünf Druckaufnehmern gemessen.



Bild 5.15 Prinzipskizze Messstern und Messturm

Die Druckaufnehmer wurden zwischen den Absperrhähnen am Verteiler und den Druckschläuchen installiert. Über eine DAB-Karte wurde der gemessene Hydraulikdruck kontinuierlich während der Belastungsstufen in der Messwerterfassungsanlage aufge-



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



zeichnet. Als redundantes Messsystem wurde am Verteiler ein analoges Manometer (max. 60 bar Hydraulikdruck; 0,5 bar Skaleneinteilung) zur Ablesung des Hydraulikdrucks installiert (Bild 5.16).



Bild 5.16 Verteiler mit analogem Manomter und Druckaufnehmer



Bild 5.17 Messturm

Um diese Mess- und Steuereinrichtung portabel zu gestalten wurden der Pneumatikzylinder, der Umwandler und der Verteiler samt Druckaufnehmern in einem Messturm integriert (Bild 5.17). Mit Hilfe des Hallenkrans des IKT war es möglich den Messturm in die Schächte der einzelnen Kammern herabzulassen und Messungenauigkeiten durch einen Unterschied der hydraulischen Druckhöhe zwischen dem Messstern und dem Messturm mit integrierten Druckaufnehmern zu vermeiden. Der Weg der Lastplatten (Kolben; Bild 5.18) wurde mit Wegaufnehmern Typ Solatron gemessen. Das Gehäuse der Wegaufnehmer wurde an einer Stange, die fest mit den Kolben des Hydraulikzylinders verbunden ist, montiert (Bild 5.19).



Bild 5.18 Ausgefahrener Zylinderkolben





Der Fühler des Wegaufnehmers wurde mit dem Deckel des Hydraulikzylinders verschraubt. Die Stange führt durch den Deckel des Hydraulikzylinders und erlaubt es, den Weg des Kolbens exakt aufzuzeichnen.



Bild 5.19 Prinzipskizze Hydraulikzylinder mit Wegaufnehmer

Durch die gleichzeitige Erfassung der Wege und des Hydraulikdrucks aller fünf Lastplatten war das System in der Lage, evtl. Einflüsse der Belastungsstufen eines Zylinders auf die restlichen Zylinder aufzuzeichnen.

Um den Wirkungsgrad jedes Zylinders bestimmen zu können, wurden die Hydraulikzylinder vor Beginn der Versuchsreihe kalibriert. Hierzu wurden die Rohre mit der gesamten Hydraulikmimik und der später im Versuch eingesetzten Messkette auf dem Versuchsstand (Bild 5.21) im IKT aufgebaut. Unter verschiedenen Randbedingungen und in mehreren Lastzyklen wurde mit Hilfe des Feinmanometers der Hydraulikdruck in den einzelnen Zylindern stufenweise gesteuert. Die aus dem Hydraulikdruck resultierende Kraft am Zylinderkolben wurde mit Hilfe einer Kraftmessdose (Bild 5.20), die an der Traverse des Messstandes (Bild 5.21) fest montiert war, so dass der Kolben gegen ein die fest montierte Kraftmessdose ausgefahren werden konnte, aufgezeichnet.



Bild 5.20 Kraftmessdose



Bild 5.21 Messstand Kalibrierung





Während der Kalibrierung wurden folgende Messgrößen kontinuierlich aufgezeichnet:

- Luftdruck [bar]
- Hydraulikdruck [bar]
- Kolbenweg [mm]
- Kraft an KMD [kN]

Ein Messdiagram, in dem alle Messwerte [mV] über die Zeit [s] aufgetragen wurden, ist in Bild 5.22 dargestellt. Deutlich ist die stufenweise Be- und Entlastung abzulesen.



Bild 5.22 Messdiagramm Eichung Zylinder

Mit Hilfe der bekannten Kalibrierfaktoren sowohl der Druckaufnehmer, als auch der Kraftmessdose wurde aus den Messwerten [mV] der Hydraulikdruck [bar] und die Kraft [kN] berechnet. Ein Hydraulikdruck-Kraft-Diagramm für eine Be- und Entlastungssequenz mit zugehöriger Gleichung der Ausgleichsgeraden für Be- und Entlastung ist in Bild 5.23 dargestellt. Über die Ausgleichgeraden wurde der Reibungsverlust der Hydraulikzylinder berechnet. Somit konnte jedem Zylinder ein Kalibrierfaktor für Be- und Entlastung in Abhängigkeit des Hydraulikdrucks zugewiesen werden. Die resultierende mittlere Spannung σ_m , die ein Zylinderkolben effektiv ausübt, berechnet sich dann wie folgt:

$$\sigma_{m} = Kalibrierfaktor f_{e}[-] \cdot Hydraulikdruck[kN/m^{2}]$$







Bild 5.23 Hydraulikdruck-Kraft Diagram; Kalibrierung Hydraulikzylinder

5.2.2.3 Dehnungsmessstreifen

Im vorliegenden Fall wird als wesentliches Kriterium für die Bewertung der Lastumlagerungen innerhalb des Bettungsmittels die hieraus in der Rohrwand resultierende Spannung herangezogen. Zur Bestimmung dieser Spannungen wurden an einem Rohr in jedem Graben zahlreiche Dehnungsmessstreifen appliziert. Auf Basis der Dehnungsmesswerte lassen sich, unter der Voraussetzung elastischen Materialverhaltens, die Spannungen in der Rohrwand rechnerisch ableiten. Für die Großversuche wurden duktile Gussrohre eingesetzt, die abweichend von der Regelherstellung keine Innenbeschichtung aus Zementmörtel aufwiesen. An jedem Applikationspunkt wurden mittig in Rohrlängsachse zur Erfassung der radialen, axialen und diagonalen Dehnungen drei Messstreifen in Rosettenform angeordnet. An der Rohrinnenseite befanden sich die Applikationspunkte im Scheitel, in der Sohle und jeweils auf beiden Seiten im Kämpfer und im Zwickelbereich. An der Rohraußenseite wurden je drei Messstreifen im Scheitel und auf einer Seite im Kämpfer und im Zwickelbereich angeordnet (Bild 5.25).



Bild 5.24 DMS-Messrohr







Bild 5.25 Lage der Dehnungsstreifen im Rohrquerschnitt

Die Messwerterfassung war auf eine Frequenz von 2 Hz eingestellt und lief während der gesamten Versuchsdauer. Ein DMS-Messrohr ist in Bild 5.24 dargestellt.

5.2.2.4 Erddruckgeber

Um qualitative Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Bodenspannungen zu erhalten, wurden in jeder Kammer drei Erddruckgeber eingebaut. Ein Erddruckgeber befand sich etwa 0,75 m unter der Rohrsohle mittig in der Kammer. Er sollte Informationen über das Lastabtragungsverhalten der unterschiedlichen Bettungsmittel in den Untergrund liefern. Zwei weitere Geber lagen etwa 1 m über Rohrscheitel und dienten der Kontrolle der Bodenspannung aus Überdeckung und statischer oder zyklischer Belastung (vgl. Bild 5.12). Um die Genauigkeit der Messwerte zu erhöhen, wurden die Erddruckgeber während der Versuche in Feinsand gebettet und im Vorfeld in einer Prüfmaschine entsprechend kalibriert (Bild 5.26).



Bild 5.26 Aufbau zur Kalibrierung der Erddruckgeber





5.2.2.5 Spannungsmessfolien

Wesentlich für die Spannungsverteilung im Rohrquerschnitt ist die Bettungsqualität im Zwickelbereich (vgl. Abschnitt 3.1). Um hierzu tendenzielle Angaben zu erhalten, wurden ursprünglich für den Fahrzeugbau entwickelte Druckmessfolien in einem Bodenmaterial eingesetzt. Die Messungen wurden mit speziell auf die zu erwartenden Druckverhältnisse abgestimmten Sensoren durchgeführt [35]. Jeder Sensor ist ca. 0,1 mm dick und besteht aus dünnen, flexiblen Folien mit einem Raster aus leitfähigen bzw. halbleitenden Tinten. Die Schnittpunkte der leitfähigen Zeilen und Spalten bilden die Abtastpositionen, an denen sich je nach aufgebrachter Kraft der elektrische Widerstand ändert und die korrespondierende Spannung aufgenommen wird. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden Messfolien in der Größe 307 x 86 mm eingesetzt. Das Raster hatte



Bild 5.27 Anordnung der Spannungsmessfolien am Versuchsrohr

einen Zeilenabstand von 7 mm bzw. einen Spaltenabstand von 2,5 mm, so dass pro Folie 1496 Abtastpositionen zur Verfügung standen. Die Folien wurden gemäß Bild 5.27 im Zwickelbereich des Rohres angeordnet. Aufgrund der zu erwartenden Datenmengen und der zur Verfügung stehenden Hardware wurden keine kontinuierlichen Messungen durchgeführt, sondern lediglich punktuelle Aufnahmen nach Abschluss der einzelnen Versuchsphasen (vgl. Abschnitt 5.2.3).

5.2.2.6 Niveaumessungen

Im Rahmen der durchgeführten Großversuche sollten die vertikalen Verschiebungen der Rohre erfasst werden. Da aufgrund der notwendigen Änderungen im Versuchsaufbau die Montage einer durchgehenden Messbrücke von Schacht zu Schacht nicht möglich war, wurde die Höhenvermessung über einen in der Sohle des Rohrstrangs verlegten flexiblen PE-Druckschlauch realisiert. Dieser wurde im Schacht und am Rohrende ca. 0,5 m nach oben geführt und an definierten und nachträglich eingemessenen Punkten (Bild 5.28) jeweils an Rohranfang und –ende mit Schellen fixiert (Bild 5.29). Für die





Messungen wurde der Druckschlauch bis zu einem bestimmten Pegel mit Wasser gefüllt und ein Drucksensor hindurch gezogen. Anhand der Wasserdruckdifferenzen konnten so Vertikalverschiebungen ermittelt werden.



Bild 5.28 Ergebnis der Einmessung des Druckschlauches in Kammer 1



Bild 5.29 Lage des Druckschlauches im Rohrstrang

5.2.3 Versuchsablauf

5.2.3.1 Definition der Versuchsphasen

Der gesamte Versuchsablauf wurde in fünf Hauptphasen unterteilt (vgl. Bild 5.2):

- Phase 1: Einbauzustand
- Phase 2: Ziehen der Kanaldielen
- Phase 3: Zyklische/Statische Belastung
- Phase 4: Simulation von Grundwasserspiegel Veränderung
- Phase 5: Simulation von Setzungen

Diese Hauptphasen lassen sich bettungsmittelspezifisch in mehrere Unterphasen aufteilen. Diese sind wesentlich von Art und Zustand des Verfüllmaterials in der Leitungs-





zone und den Angaben der jeweiligen Hersteller abhängig. In Tabelle 5.2 wurden alle bei der Versuchsdurchführung berücksichtigten Phasen dem jeweiligen Bettungsmittel zugeordnet.

Phase		Mineral- gemisch	RSS- Flüssig- boden	EKA-Bett	Weimarer- Boden- Mörtel	Kies-Sand- Gemisch
1. Einbauzustand						
1.1	Herstellung Rohrgraben	Х	Х	Х	Х	Х
1.2	Lagenweiser Einbau und Verdich- tung der unteren Bettungsschicht	Х		X		X
1.3	Einbau der Rohre	Х	Х	Х	Х	Х
1.4	Fixierung der Höhenlage (Auflager, Auftriebssicherung)		X		X	
1.5	Einbau der gesamten Leitungszone ohne zusätzliche Verdichtung		X		X	
1.6	Lagenweiser Einbau und Verdich- tung der oberen Bettungsschicht (Zwickel)	Х		Х		X
1.7	Lagenweiser Einbau und Verdich- tung der Seitenverfüllung	Х		X		X
1.8	Lagenweiser Einbau und Verdich- tung der Abdeckung	Х		X		X
1.9	Vom Hersteller vorgeschriebene Abbindezeit bei Einbau		X (1Tag)		X (1Tag)	
1.10	Vom Hersteller vorgeschriebene Sondermaßnahmen	Х	X	X	X	
1.11	Lagenweiser Einbau und Verdich- tung der Hauptverfüllung	Х	X	Х	X	X
1.12	Abbinden des Bettungsmittels bis 28-Tage-Festigkeit		X		X	
2. Ziehen der Leichtprofile						
2.1	Ziehen der Leichtprofile (Rechts)	Х	Х	Х	Х	Х
2.2	Ziehen der Leichtprofile (Links)	Х	Х	Х	Х	Х
3. Belastung auf der Bodenoberfläche			•	•		
3.1	3.1 Zyklische Belastung		Х	Х	Х	Х
3.2	Statische Belastung	Х	Х	Х	Х	Х
4. Sir	nulation von Grundwasserständen	Х	Х	Х	Х	Х
5. Ab	5. Absenken der Druckkissen X X			Х	Х	Х

Tabelle 5.2 Bettungsmittelspezifische Einzelphasen

Im Folgenden werden die in Tabelle 5.2 dargestellten Phasen näher beschrieben.





5.2.3.2 Phase 1: Einbauzustand

Zunächst wurden Messrohre aus duktilem Guss ohne Beschichtung hergestellt. Diese wurden im ersten Versuchsabschnitt unter identischen Randbedingungen mit den jeweiligen Bettungs- und Verfüllmaterialien in 5 parallelen, mit Spunddielen verbauten Teststrecken eingebaut. Die Teststrecken waren durch Stahlplatten voneinander getrennt. Dabei wurden von einem Schachtbauwerk ausgehend vier 1 m lange Rohre DN 800 mit Kupplungen verlegt. Die Reihenfolge der mit unterschiedlicher Messtechnik bestückten Rohre sowie der Gesamtaufbau sind Bild 5.30 zu entnehmen.



a) Draufsicht

b) Längsschnitt Bild 5.30 Versuchsaufbau mit Messtechnik

Die durch die Hersteller angelieferten Bettungsmittel wurden gemeinsam mit den Herstellern beziehungsweise nach deren Vorgaben durch das IKT eingebaut. Nachfolgend wird der Einbau detailliert beschrieben:

Zunächst wurde der Großversuchstand mit Stahlplatten in 5 Kammern geteilt und die Druckkissen wurden in den Kammern positioniert. Die Anschlüsse der Druckkissen wurden nach unten durch den Versuchsstandboden geführt und Wasser in die Kissen eingefüllt. Anschließend wurde das Kies-Sand-Gemisch bis zu einer Höhe von 1,2 m lagenweise eingebaut und verdichtet. Die jeweilige Schichtdicke betrug etwa 0,3 m und das Material wurde in zwei Übergängen mit einer Rüttelplatte verdichtet. Die Stahlplatten wurden fortschreitend mit dem Einbau an der Außenwand des Großversuchsstandes in U-Profilen geführt und mit elastomeren Blockdichtungen gegen diese abgedichtet (Bild 5.31a). Bei 1,2 m erfolgte der Einbau der unteren Erddruckgeber und der Leichtprofile, gefolgt von weiteren 0,5 m lagenweise eingebautem Kies-Sand-Gemisch. Auf




das so entstandene Planum wurden die Schachtunterteile und –ringe gesetzt(Bild 5.31b).





a) Fixierung der Stahltrennwände b) Schachtbauwerk Bild 5.31 Fixierung der Stahltrennwände und Setzen der Schachtbauwerke

Mit den drei ausgewählten **Schüttgütern** wurde anschließend die untere Bettungsschicht eingebaut (Phase 1.2). Nach dem Einbau der Versuchsrohre (Phase 1.3, Bild 5.32a) folgten die obere Bettungsschicht (Phase 1.6), die Seitenverfüllung (Phase 1.7) und die Abdeckung (Phase 1.8). Das Rohrende wurde zum Schutz gegen das Eindringen von Boden oder Wasser mit Kunststoffkappe und loser Stahlplatte versehen (Bild 5.32b). Das Mineralgemisch und EKA-Bett wurden bis zum Einbringen der Hauptverfüllung mit einer Folie gegen Austrocknen geschützt (Phase 1.10). Schließlich wurde die Hauptverfüllung, bestehend aus dem Sand-Kies-Gemisch, eingebracht (Phase 1.11, Bild 5.32c).



a) Einbau der Versuchsrohre



b) Detailansicht Rohrende c) Bild 5.32 Einbauvorgang, Schüttgüter



c) Bodenverdichtung





Bei den beiden fließfähigen Verfüllmaterialien wurde eine entsprechend angepasste Vorgehensweise gewählt. Eine besondere Bedeutung kam dabei der Auftriebsicherung zu. Die entstehenden Auftriebskräfte sind abhängig vom verdrängten Volumen des Hohlkörpers, seinem Eigengewicht und der Wichte der Flüssigkeit. Gerade die hohe Wichte der hier verwendeten fließfähigen Verfüllmaterialien mit ca. 20 kN/m³ bewirkt im Vergleich zu Wasser (Wichte ca. 10 kN/m³) doppelt so hohe Auftriebskräfte. Diese wurden im Vorfeld berechnet und eine für den vorliegenden Anwendungsfall geeignete Auftriebssicherung aus Kanthölzern bemessen, konstruiert und eingebaut (Phase 1.4, Bild 5.33a). Um eine vollständige Umschließung der Rohre mit dem Bettungsmittel zu gewährleisten, wurden diese etwa 25 cm über der Grabensohle mit Hilfe von Spanngurten an der Auftriebssicherung aufgehängt (Phase 1.4). In der Praxis muss allerdings davon ausgegangen werden, dass insbesondere längere Rohre auch punktuell (z.B. Säcke mit trockenem Bettungsmittel) gelagert werden. Die Auftriebssicherung erfolgt in der Praxis üblicherweise über Belastungsbänke mit steiferer Konsistenz, dabei ergibt sich der Abstand der Belastungsbänke in Abhängigkeit der Bedingungen vor Ort. Durch das thixotrope Verhalten der Bettungsmittel muss keine lange Abbindezeit für die Belastungsbänke einkalkuliert werden. Diese Vorgehensweise erschien im Großversuchsstand wegen der geringen Länge des Rohrstrangs nicht sinnvoll. Die fließfähigen Verfüllmaterialien wurden entsprechend der örtlichen Vorgaben mit einem Fahrmischer angeliefert und über einen Krankübel (Bild 5.33b) in die jeweilige Kammer eingebracht (Phase 1.5, Bild 5.33c).

Für die hier vorliegenden Randbedingungen und unter Berücksichtigung der verwendeten Bettungsmittel gaben die Hersteller eine Abbindezeit von einem Tag vor (Phase 1.9). Dann sollte das Material eine Festigkeit erreicht haben, welche den Einbau der Hauptverfüllung zulässt. Diese Annahmen stützen sich auf Erfahrungswerte der Hersteller, qualitative Angaben über die Festigkeit nach einem Tag liegen nicht vor. RSS und WBM wurden zum Schutz vor dem Austrocknen mit einer etwa 15 cm dicken Schicht Kies-Sand abgedeckt (Phase 1.10), bevor die Versuche mit dem Einbau der Hauptverfüllung fortgesetzt wurden.





a) Auftriebsicherung b) Krankübel mit Schlauch c) Einbau mit Krankübel Bild 5.33 Einbauvorgang bei den fließfähigen Verfüllmaterialien





Nach dem Verfüllen des Leitungsgrabens bis ca. 3,2 m über Rohrscheitel war der Einbauvorgang beendet (Phase 1.11), sodass ab diesem Zeitpunkt von allen Kammern kontinuierlich Messwerte der Dehnungsmessstreifen und der Erddruckgeber aufgezeichnet werden konnten. Zudem wurden die Messwerte der Niveaumessung und der Druckmessfolien aufgenommen. Bevor mit dem Ziehen der Verbauelemente in Phase 2 begonnen werden konnte, wurde bei den flüssigen Verfüllbaustoffen eine weitere Abbindezeit von 28 Tagen eingehalten (Phase 1.12), um die Ergebnisse mit denen der Voruntersuchungen vergleichen zu können.

5.2.3.3 Phase 2: Ziehen der senkrechten Verbauelemente

Eine besondere Belastung für in offener Bauweise verlegte Kanalrohre stellt das Ziehen der senkrechten Verbauelemente dar. Dieser Vorgang hinterlässt in der Rohrumgebung einen Hohlraum (Verbauspur), welcher zu Auflockerungen in den Bettungsschichten und der Seitenverfüllung führen kann. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die verwendeten Leichtprofile zunächst auf der rechten Seite statisch gezogen (Phase 2.1). Direkt anschließend erfolgte der Rückbau auf der gegenüberliegenden Seite des Rohrgrabens (Phase 2.2, Bild 5.34).

Während des Ziehvorgangs wurden die Randfaser-Dehnungen der Rohrwand über die Dehnungsmessstreifen und die resultierenden Erddrücke über die Erddruckgeber kontinuierlich erfasst. Nach dem Rückbau der Leichtprofile wurden wiederum punktuell die Messwerte der Druckmessfolien aufgenommen und Niveaumessungen durchgeführt.



Bild 5.34 Statisches Ziehen der Leichtprofile (Links) in Kammer 5 mit dem Hallenkran

5.2.3.4 Phase 3: Statische und zyklische Belastung

Ein Grund für das Versagen einer Rohrleitung im Betriebszustand können nachträglich aufgebrachte Belastungen in Form von Verkehrslasten (zyklisch) oder unvorgesehenen





Erhöhungen der Überdeckung (statisch), z.B. zum Angleich an das Geländeniveau, sein. Im Großversuchsstand wurden diese beiden Belastungszustände mit Hilfe eines hydraulischen Druckzylinders simuliert, welcher Kräfte über eine Lastplatte in die Geländeoberkante mittig über dem Rohrstrang einleitete. Etwaige Veränderungen in der Wirkung der Bettung können dann beobachtet werden. Es wurden Belastungen nach Tabelle 5.3 in jeder Kammer eingeleitet.

	zyklisch	statisch		
Abmessungen Lastplatte:	B x L = 1,2 x 1,2 m (1,44 m ²)	B x L = 1,2 x 1,2 m (1,44 m ²)		
Belastungsfrequenz:	3 Hz	-		
Unterlast:	80 kN	0 kN		
Oberlast:	220 kN	600 kN		
Belastungsdauer:	26 Stunden	45 Minuten		
Rechnerische Spannung Bodenoberkante:	153 kN/m ²	417 kN/m ²		
Rechnerische Spannung Rohrscheitel:	Ca. 20 kN/m ² (entspricht SLW 60*)	Ca. 50 kN/m ² (entspricht p _o *)		

Tabelle 5.3	Randbedingungen für die zyklische und statische Belastung
-------------	---

* Nach ATV-DVWK-A 127 [27]

Es wurde für eine Dauer von 26 Stunden zyklisch eine Verkehrslast simuliert, welche etwa einem SLW 60 entsprach (Phase 3.1). Die anschließende statische Belastung erzeugte in etwa eine Zusatzspannung von 50 kN/m² in Höhe des Rohrscheitels (gleichmäßig verteilten Flächenlast auf der Bodenoberkante) (Phase 3.2). Bei der Berechnung der Spannung in Höhe des Rohrscheitels wurde ausgehend von der Größe der Lastplatte in Anlehnung an ATV-DVWK-A 127, Abschnitt 5.2.2.4 [27] eine Druckausbreitung von 2:1 bis maximal an die Graben- bzw. Versuchsstandwand angenommen.



Bild 5.35 Einleitung von zyklischen und statischen Belastungen an der Geländeoberkante



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Die Stahlplatte zur Lasteinleitung hatte die Abmessungen 1,2 m x 1,2 m und war 120 mm dick. Bei der Auflage der Lastplatte wurde auf eine möglichst hohlraumfreie Montage zwecks gleichmäßiger Lasteintragung geachtet. Der Hydraulikzylinder wurde über eine zentrale Steuereinheit kraftgeregelt betrieben. Bild 5.35 zeigt die positionierte Stahlplatte sowie den an einer Quertraverse montierten Hydraulikzylinder.

Während des Belastungsvorgangs wurden die Randfaser-Dehnungen der Rohrwand über die Dehnungsmessstreifen und die resultierenden Erddrücke über die Erddruckgeber kontinuierlich erfasst. Nach Ende der statischen Belastung wurden Messwerte der Druckmessfolien aufgenommen und Niveaumessungen durchgeführt.

5.2.3.5 Phase 4: Simulation von Grundwasserspiegelveränderung

In der Praxis wird gegebenenfalls anstehendes Grundwasser häufig für die Dauer der Baumaßnahme abgesenkt, oder es wird in Zeiten geringer Grundwasserstände gebaut. Steigen nach Abschluss der Bautätigkeit die Grundwasserstände wieder an, kann es, je nach verwendetem Bettungsmaterial, zu unerwünschten Lastumlagerungen kommen. Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurde nach der Rohrleitungsverlegung durch Fluten des Großversuchsstandes ein Grundwasserstand von ca. 2 m über Rohrscheitel simuliert (Phase 4).

Während der Grundwassersimulation wurden die Randfaser-Dehnungen der Rohrwand über Dehnungsmessstreifen und die Erddrücke über Erddruckgeber kontinuierlich erfasst.

5.2.3.6 Phase 5: Simulation von Sackungen

Setzungen von Rohrleitungen, wie sie gerade in Nordrhein-Westfalen aufgrund von Bergsenkungen häufig zu beobachten sind, können mit unerwünschten Auflockerungen in der Leitungszone beziehungsweise Veränderungen der Bettungseigenschaften einhergehen. Durch ein auf dem Boden des Großversuchsstandes montiertes hydraulisches Druckkissen lassen sich derartige Verformungen nachempfinden, indem der Druck in diesen Kissen nachträglich reduziert wird.

Die Druckkissen hatten eine Länge von 2,6 und eine Breite von 1,7 m. Die Dicke im gefüllten Zustand betrug 250 mm. Im Rahmen von Vorversuchen wurde die Eignung der Kissen exemplarisch bei einer Sandüberdeckung von 1 m überprüft. Der Ausgangszustand und die infolge des Ablassens eines Kissens entstandene Sackung ist in Bild 5.36 zu erkennen.

Die Abmessungen der entstandenen Sackung sind Bild 5.37 zu entnehmen. Die Absenkung bildete sich nahezu vollständig auch 1 m über dem Druckkissen nach.

Nach Abschluss der Grundwassersimulation (Phase4) wurden die während der gesamten Versuchsdauer mit Wasser gefüllten Kissen entleert (Phase 5). Während dieses



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Absenkvorgangs wurden die Randfaser-Dehnungen der Rohrwand über die Dehnungsmessstreifen und die resultierenden Erddrücke über die Erddruckgeber kontinuierlich erfasst.





a) Ausgangszustand b) Nach Abschluss der Absenkung Bild 5.36 Vorversuch zur Quantifizierung der zu erwartenden Sackung



Bild 5.37 Abmessungen der entstandenen Sackungsmulde

5.2.3.7 Versuchsausbau

Nach Beendigung des Absenkvorgangs war die Versuchsdurchführung abgeschlossen. Es folgte der lagenweise Ausbau des Materials in den Einzelkammern unter Berücksichtigung der Stufen nach Bild 5.39. Hierbei wurde besonderer Wert auf eine intensive





Untersuchung der Leitungszone in den Stufen 4 bis 7 gelegt. Sobald eine Stufe vollständig ausgehoben war, wurden bodenmechanische Untersuchungen an der nächsten Schicht durchgeführt. Diese sind im Abschnitt 5.3.4 beschrieben.



Bild 5.38 Ausbau der Hauptverfüllung (Stufe 1 bis 3)

Der Ausbau begann mit dem Abtrag der aus dem Kies-Sand-Gemisch bestehenden Hauptverfüllung in den Stufen 1 bis 3 mit einem Hydraulikgreifer (Bild 5.38).









Parallel zum Aushub wurden, mit dem Ziel einer besseren Zugänglichkeit, die Schachtringe und die Kammertrennplatten demontiert. Im Anschluss an den Aushub der Hauptverfüllung wurde die Abdeckung entfernt. Im Ergebnis lagen dann die Rohrscheitel frei. In Bild 5.40 ist der freiliegende Rohrscheitel im Bereich des Messsterns zu erkennen.



Bild 5.40 Freiliegender Rohrscheitel nach dem Abtrag der Abdeckung, Bereich Messstern (Stufe 4, Kammer 1, MGM)

Der Ausbau wurde dann mit dem Freilegen der Versuchsrohre bis zum Kämpfer fortgesetzt (Bild 5.41).



d) Kammer 4 (RSS) Bild 5.41 Bis auf Kämpferhöhe freigelegte Versuchsrohre (Stufe 5)

In den Kammern 1 bis 4 konnte man deutlich die Abdrücke der gezogenen Leichtprofile erkennen (Bild 5.41 a –d). Lediglich in Kammer 5 konnte aufgrund des vollständigen Nachrutschens des Kies-Sand-Gemisches keine Verbauspur und auch kein Abdruck der Leichtprofile ausgemacht werden (Bild 5.41 e).



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Der Ausbau der fließfähigen Verfüllmaterialien (Kammer 2 und 4) erforderte besonderen Aufwand, z. B. durch Einsatz von Presslufthämmern mit Spatenvorsatz.

Im Rahmen des Ausbaus der oberen Bettungsschicht (Stufe 6) wurden sämtliche Versuchsrohre von der Bettung abgehoben und die Bettungsoberfläche in Augenschein genommen (Bild 5.42).

Während bei den Schüttgütern (Kammer 1, 3 und 5) deutlich ein Einfluss der Absenkung durch die Druckkissen in Form von Senkungen und Einbrüchen zu erkennen war, blieb die Bettung im Bereich der Rohrsohle bei den fließfähigen Verfüllmaterialien nahezu unbeeinflusst (Kammer 2 und 4).

Schließlich wurden mit den Stufen 7, 8 und 9 der gesamte Großversuchsstand geleert und die restlichen Einbauteile, wie beispielsweise die Stahltrennwände, die Schachtunterteile und die Druckkissen entfernt.



a) Kammer 1 (MGM)

b) Kammer 2 (WBM)



c) Kammer 3 (EKB)

d) Kammer 4 (RSS) Bild 5.42 Freigelegte Bettung in der Rohrsohle



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



5.2.4 Vorberechnungen

Um Anhaltswerte für die Rohrbeanspruchungen in den Großversuchen zu ermitteln, wurden die zu erwartenden Belastungszustände und daraus resultierenden Boden- und Rohrspannungen nach ATV-DVWK-A 127 [27] für den Standardfall "Kies-Sand-Gemisch" abgeschätzt (Programmsystem RIB). Dabei wurden folgende Belastungszustände unterschieden:

1. Ausgangszustand

Der Ausgangszustand wird durch den abgeschlossenen Einbauvorgang charakterisiert. Das heißt, es wurden die Spannungen nach dem Ziehen der Verbauelemente ermittelt.

2. Zyklische Belastung an der Geländeoberfläche

Die über einen Hydraulikzylinder eingeleitete zyklische Belastung an der Geländeoberfläche diente der Simulation einer Verkehrslast. Die entsprechende Berechnung wurde daher unter Berücksichtigung eines SLW 60 durchgeführt.

- 3. Statische Belastung an der Geländeoberfläche Die lokal eingeleitete Belastung an der Geländeoberfläche wurde über ein Lastverteilungsverhältnis von 2:1 auf Rohrscheitelhöhe bezogen. Der so berechnete Spannungswert floss als gleichmäßig verteilte Flächenlast auf der Geländeoberkante in die Berechnungen ein.
- Grundwasser über Rohrscheitel Bei den diesbezüglichen Berechnungen wurde ein Grundwasserstand bis 2 m über Rohrscheitel berücksichtigt.

	Ausgangszustand	and Zyklische Statische Belastung Belastung		Grundwasser							
Rohr	Duktiles Gusseise	Duktiles Gusseisen, D _I = 821 mm, Wanddicke = 14 mm, E-Modul = 170.000 N/mm ²									
Überdeckungs- höhe		3,2 m									
Grabenbreite		1	l,7 m								
Auflagerwinkel		2 x (α = 120°								
Grabenverbau		Leichtprofile mit	0,5 m Unterrammung								
Einbettungs- bedingung	B 3: Senkrechter V tung gegen den Ver	erbau innerhalb der L bau. Die Spundwände	eitungszone mit Spur e werden bis unter die	ndwänden und Verdich- Rohrsohle eingerammt.							
Überschüttungs- bedingung	A3: Senkrechter Ve ten ode	rbau des Rohrgraben r -geräte, die erst nac	s mit Spundwänden, I h dem Verfüllen entfe	Holzbohlen, Verbauplat- rnt werden.							
Bodengruppe	G1: Kies-Sar	nd-Gemisch in der Lei	tungszone und als an	stehender Boden							
Verkehrslast	-	SLW 60	-	-							
Flächenlast	-	-	50 kN/m ²								
Grundwasser	_	-	_	2 m über Rohrscheitel							

Tabelle 5.4Annahmen f
ür die statische Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 [27]





Für die Berechnungen wurde entsprechend eines sorgfältig durchgeführten Einbaus ein Auflagerwinkel von 120° angenommen.

Zur Berücksichtigung der relativ zum Rohr hohen Steifigkeit der Überschiebkupplungen aus duktilem Gusseisen, wurde eine "Ersatzwanddicke" abgeschätzt. Dies schien insbesondere aufgrund der geringen Rohrlänge zur Erfassung von Einflüssen der Kupplung auf die Rohrspannung erforderlich. Hierbei wurde die Steifigkeit der Kupplung näherungsweise berechnet und auf die Rohrlänge bezogen. Hieraus ergab sich eine rechnerische Wanddickenerhöhung von 3 mm. Die Berechnungsannahmen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

In Tabelle 5.5 sind die Berechnungsergebnisse für die unterschiedlichen Belastungszustände zusammengefasst. Unter den Rohrspannungen sind zudem die auf Basis des Elastizitätsmoduls des Rohrwerkstoffes von 170000 N/mm² berechneten Randfaser-Dehnungen in µm/m angegeben, um einen Vergleich mit den Messwerten der Dehnungsmessstreifen zu ermöglichen.

	Ausgangszu- stand	Zyklische Belastung	Statische Belastung	Grundwasser
Vertikale Boden- und Grundwasserbelastung über dem Rohr	64,0 N/mm ²	83,4 N/mm ²	114,0 N/mm ²	64,0 N/mm ²
Rohrspannung/-dehnung	93,8 N/mm²	127,9 N/mm ²	168,4 N/mm²	113,7 N/mm ²
im Kämpfer, Außen	551,8 μm/m	752,4 μm/m	990,6 μm/m	668,8 μm/m
Rohrspannung/-dehnung	97,9 N/mm ²	132,8 N/mm ²	176,2 N/mm ²	118,4 N/mm ²
im Scheitel, Innen	575,9 μm/m	781,2 μm/m	1036,5 μm/m	696,5 μm/m
Rohrspannung/-dehnung	107,9 N/mm²	145,9 N/mm ²	191,6 N/mm ²	128,1 N/mm ²
in der Sohle, Innen	634,7 μm/m	858,2 μm/m	1127,1 µm/m	753,5 μm/m

Tabelle 5.5	Berechnungsergebnisse für die unterschiedlichen B	Selastungszustände
-------------	---	--------------------

5.3 Versuchsergebnisse

5.3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die während der Versuchsdurchführung aufgenommenen Messwerte dargestellt. Um einen Überblick über den gesamten Versuchsablauf zu erhalten, werden zunächst die einzelnen Phasen der Versuche den Dehnungswerten am Beispiel der Kammer 5 (Kies-Sand-Gemisch) zugeordnet. Bild 5.43 zeigt die gemessenen Rohrwanddehnungen über die gesamte Versuchsdauer mit den zugehörigen Versuchsphasen.

In der Phase 1 ist deutlich die Zunahme der Dehnungen infolge des Einbaus von Leitungszone und Hauptverfüllung zu erkennen. Das Ziehen der Leichtprofile in Phase 2





bewirkte einen sprunghaften Anstieg der Rohrwanddehnungen. Die Belastung an der Geländeoberfläche im Rahmen der Phase 3 hatte eine weitere Erhöhung der Dehnungen zur Folge, die jedoch auch nach dem Entlasten nur unwesentlich zurückgingen. Der ungleichmäßige Verlauf bzw. der Anstieg der Messwerte in der Phase der Grundwassersimulation lässt gegebenenfalls auf Lastumlagerungen im Boden schließen. Die Absenkung der Druckkissen in der Phase 5 führte schließlich nochmals zu einer deutlichen Erhöhung der Dehnungswerte.

In den folgenden Abschnitten werden nun die aus unterschiedlichen Messwertgebern gewonnenen Werte bezogen auf die Einzelphasen vergleichend für alle Kammern ausgewertet.



Dehnung-Zeit-Diagramm Q5 (Kies-Sand)

Bild 5.43 Messwerte der DMS in Umfangsrichtung – Kammer 5 (KSG)

5.3.2 Dehnungsmessungen

5.3.2.1 Umfangsrichtung

Zur Auswertung der Randfaser-Dehnungen in Umfangsrichtung wurden zunächst die Messwerte von Kämpfer, Scheitel und Sohle herangezogen. Die grafischen Darstellungen beziehen sich zur besseren Übersicht grundsätzlich auf die Rohrsohle. Als Referenz für die gemessenen Randfaser-Dehnungen dienen die Werte aus der Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 [27] (vgl. Abschnitt 5.2.4). Grundsätzlich sind jedoch im Versuch aus folgenden Gründen geringere Werte zu erwarten:





Steifigkeit der Messrohre und Rohrkupplungen

Wie in Abschnitt 5.2.4 bereits beschrieben, wurde die Steifigkeit der Rohrkupplung als Wanddickenzuschlag bei der statischen Berechnung berücksichtigt. Tatsächlich wird das Rohr als Zylinderschale an den Enden jedoch vergleichsweise starr gelagert, so dass ergänzend zu dem Tragverhalten nach klassischer Kreisringstatik auch zusätzliche versteifende Effekte aus einer Schalentragwirkung (Membran-Spannungszustand) nicht auszuschließen sind.

- Sicherheiten / Bodenparameter
 Eingangsgrößen der Spannungs- bzw. Dehnungsberechnung werden nach ATV-DVWK-A 127 [27] In der Regel zur sicheren Seite abgeschätzt. Dies gilt insbesondere für die Standard-Parameter der einzelnen Bodengruppen, wie Verdichtungsgrad bzw. Verformungsmodul.
- Idealer Einbau

In den Versuchen wurde der Einbau unter idealen Bedingungen vorgenommen. So wurde beispielsweise auf den senkrechten Einbau der Verbauprofile, die zentrische Lage der Rohre im Rohrgraben und die Zwickelverdichtung besonderer Wert gelegt.

Auf den Abdeckungen der Messwertgeber an der Rohraußenseite der fließfähigen Bettungsmittel entstand ein Verbund zwischen Abdeckmaterial und Bettungsmittel. In Bild 5.44 ist ein Teil der Abdeckung der Messwertgeber zu sehen. Der Verbund war so stark, das die Abdeckung beim Herausheben des Rohrstrangs in der Halbschale verblieb. Durch diesen Verbund in Kombination mit der Schwindneigung der Bettungsmittel konnten Schubspannungen und Zugspannungen in unbekannter Größe auf die Messwertwertgeber übertragen werden. Dies bewirkte mitunter Ausfälle der Messwertgeber. Die Messwerte der Geber an der Rohraußenseite scheinen aus diesen Gründen nicht ausreichend zuverlässig und werden im Weiteren nicht verwendet.



Bild 5.44 DMS-Abdeckung in Halbschale

In den nachfolgend zusammengestellten Tabellen werden die aus den Berechnungen ermittelten Randfaser-Dehnungen als Vergleichswerte mit aufgeführt.





Phase 1: Einbauzustand

Der Einbauzustand war mit Einbau der Überschüttung abgeschlossen. Hier konnten in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres Randfaser-Dehnungen gemäß Tabelle 5.6 gemessen werden. Bei den Schüttgütern (Kammer 1, 3 und 5) ergaben sich tendenziell bei Kies-Sand und EK-Bett die höchsten Dehnungen mit bis zu 169 μ m/m. Die fließfähigen Verfüllmaterialien (Kammer 2 und 4) verhielten sich beide ähnlich.

	Kammer 1 MGM	Kammer 2 WBM	Kammer 3 EKB	Kammer 4 RSS	Kammer 5 KSG
Kämpfer (Außen)	66 µm/m	-	114 µm/m	-	135 µm/m
Scheitel (Innen)	79 µm/m	60 µm/m	95 µm/m	107 µm/m	96 µm/m
Sohle (Innen)	47 µm/m	50 µm/m	169 µm/m	83 µm/m	71 µm/m

Tabelle 5.6	Dehnungen in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres
	nach Abschluss der Phase 1 (Einbauzustand)

Phase 2: Dielenziehen



Bild 5.45 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m] (Phase 2: Dielenziehen, DMS Sohle Innen)





Der nächste Schritt bei der Versuchsdurchführung sah das Ziehen der Leichtprofile vor. Diese wurden zunächst auf der rechten und dann auf der linken Seite (vom Schacht aus gesehen) gezogen. Bild 5.45 zeigt den Dehnungsverlauf in allen fünf Kammern für den DMS an der Innenseite der Sohle. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die Daten über eine einheitliche Zeitachse aufgetragen. Die Pfeile markieren den Zeitpunkt des Ziehens.

Bei den fließfähigen Verfüllmaterialien (Kammer 2 und 4) konnten keine signifikanten Veränderungen der Randfaser-Dehnungen festgestellt werden. Bei den Schüttgütern (Kammer 1, 3 und 5) kam es demgegenüber zu erheblichen Dehnungszuwächsen. Die maßgebenden Dehnungen nach dem Ziehen der Leichtprofile sind der Tabelle 5.7 zu entnehmen. Als Referenzwerte wurden die aus der statischen Berechnung ermittelten Dehnungen mit aufgenommen.

	Kammer 1 MGM	Kammer 2 WBM	Kammer 3 EKB	Kammer 4 RSS	Kammer 5 KSG	Berechnung
Kämpfer (Außen)	218 µm/m	-	339 µm/m	-	266 µm/m	552 µm/m
Scheitel (Innen)	183 µm/m	79 µm/m	243 µm/m	105 µm/m	161 µm/m	576 µm/m
Sohle (Innen)	236 µm/m	75 µm/m	515 µm/m	98 µm/m	227 µm/m	635 µm/m

Tabelle 5.7Dehnungen in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres
nach Abschluss der Phase 2 (Dielenziehen)

Es ist ersichtlich, dass in allen Kammern die Berechnungswerte nicht überschritten wurden. KSG und MGM zeigen mit etwa 40 % der Berechnungswerte ein vergleichbares Verhalten, während sich bei EKB mit ca. 60 bis 80 % der Berechnungswerte die höchsten Dehnungen einstellten.

Phase 3: Zyklische und statische Belastung

Im Bild 5.46 sind die Messwerte der DMS in der Sohle für alle 5 Kammern dargestellt. Die Zeiträume bzw. –punkte der Belastung sind durch Pfeile gekennzeichnet. In dieser Phase wurde zunächst für 26 Stunden eine zyklische Belastung (Phase 3.1, Horizontale Pfeile) aufgebracht, an die sich eine statische Belastung für ca. 45 Minuten anschloss (Phase 3.2, Vertikale Pfeile). Die Eckdaten der Belastungen sind Abschnitt 5.2.3.4 zu entnehmen. Die rechnerische Spannungserhöhung direkt über dem Rohr betrug bei der zyklischen Belastung etwa 20 kN/m² und bei der statischen Belastung etwa 50 kN/m².





Bei der zyklischen Belastung (Phase 3.1) konnten bei den fließfähigen Verfüllmaterialien (Kammer 2 und 4) wiederum keine Veränderungen bei den Dehnungen beobachtet werden. Erst die statische Belastung (Phase 3.2) bewirkte eine geringe Dehnungszunahme. Bei den Schüttgütern stellte sich bereits bei der zyklischen Belastung eine Dehnungszunahme aus dem statischen Anteil der zyklischen Belastung ein. Die Dehnungen sind für die Phasen 3.1 und 3.2 in Tabelle 5.8 zusammengefasst. Nach der Entlastung ist kein Rückgang der Dehnungen festgestellt worden, d.h. die ermittelten Dehnungen sind bleibende Dehnungen.



Bild 5.46 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m] (Phase 3: Zyklische und statische Belastung, DMS Sohle Innen)

	Kamı M(Kammer 1 Kammer 2 MGM WBM		Kamı Eł	Kammer 3 Ka EKB		Kammer 4 RSS		Kammer 5 KSG		Berechnung	
Phase	3.1	3.2	3.1	3.2	3.1	3.2	3.1	3.2	3.1	3.2	3.1	3.2
Kämpfer (Außen)	346	424	-	-	467	548	-	-	363	399	752	991
Scheitel (Innen)	290	370	104	125	337	422	132	145	234	259	781	1037
Sohle (Innen)	338	447	104	133	640	750	136	172	327	345	858	1127

Tabelle 5.8Dehnungen in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres [µm/m] am Ende der
Phasen 3.1 (Zyklik) und 3.2 (Statik)





Sowohl in der Phase 3.1, als auch in der Phase 3.2 lagen alle Dehnungen unterhalb der Berechnungswerte.

Phase 4: Grundwassersimulation

Im Rahmen der Grundwassersimulation konnten in den Kammern 1, 2 und 4 keine signifikanten Veränderungen der Rohrdehnungen festgestellt werden. Lediglich in den Kammern 3 (EKA-Bett) und 5 (Kies-Sand) waren Zuwächse festzustellen. Der Grund hierfür kann in dem für die Dauer des Wasserandrangs nahezu wasserdichten Zustand der Bettungsmittel in den Kammern 1, 2 und 4 liegen. Die gemessenen Dehnungen sind in Tabelle 5.9 dargestellt.

Tabelle 5.9Dehnungen in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres
nach Abschluss der Phase 4 (Grundwassersimulation)

	Kammer 1 MGM	Kammer 2 WBM	Kammer 3 EKB	Kammer 4 RSS	Kammer 5 KSG	Berechnung
Kämpfer (Außen)	430 µm/m	-	583 µm/m	-	522 µm/m	669 µm/m
Scheitel (Innen)	405 µm/m	145 µm/m	570 µm/m	163 µm/m	430 µm/m	697 µm/m
Sohle (Innen)	411 µm/m	150 µm/m	775 µm/m	143 µm/m	499 µm/m	754 µm/m

In dieser Phase konnte lediglich bei EKB eine geringfügige Überschreitung der berechneten Dehnungen festgestellt werden.

Phase 5: Absenkung

Der letzte Schritt bei der Versuchsdurchführung war das Absenken der in jeder Kammer eingebauten Druckkissen. Bild 5.47 zeigt den Dehnungsverlauf in allen fünf Kammern für den DMS an der Innenseite der Sohle. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurde auch hier die Zeitachse neu skaliert. Die Pfeile markieren den Zeitpunkt des Absenkvorgangs.

	Kammer 1 MGM	Kammer 2 WBM	Kammer 3 EKB	Kammer 4 RSS	Kammer 5 KSG
Kämpfer (Außen)	661 µm/m	-	934 µm/m	-	681 µm/m
Scheitel (Innen)	664 µm/m	193 µm/m	841 µm/m	195 µm/m	604 µm/m
Sohle (Innen)	669 µm/m	168 µm/m	1232 µm/m	115 µm/m	540 µm/m

Tabelle 5.10Dehnungen in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres
nach Abschluss der Phase 5 (Absenkung)





Bild 5.47 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m] (Phase 5: Absenkung, DMS Sohle Innen)

Auch in dieser Phase konnten bei den fließfähigen Verfüllmaterialien (Kammer 2 und 4) keine bedeutsamen Veränderungen der Dehnungen festgestellt werden. Bei den Schüttgütern kam es zum Teil jedoch zu erheblichen Dehnungszunahmen. Die größten Veränderungen konnten in der Kammer 3 (EKB) beobachtet werden. Hier wurde ein Zuwachs von etwa 66 %, bezogen auf den Wert vor dem Absenken, ermittelt. Bei Kies-Sand (Kammer 5) und Mineralgemisch (Kammer 1) lagen die Zuwächse bei 20 % bzw. 44 %. Tabelle 5.10 gibt einen Überblick über die maßgebenden Dehnungen in allen Kammern.

Zusammenfassung

Um einen übersichtlichen Vergleich der gemessenen Dehnungen zu ermöglichen, wurden in Tabelle 5.11 für jede Kammer und jede Phase die Größe und Position der maximal gemessenen Dehnungen betragsmäßig zusammengestellt. Als Basis für eine vergleichende Bewertung werden die Maximaldehnungen der statischen Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 [27] herangezogen. Für die Phasen 1 und 5 sieht das ATV-DVWK-A 127 [27] keine Berechnungsmöglichkeiten vor. Daher sind hierfür auch keine Referenzwerte hinterlegt.

In der **Phase 1** ergaben sich Dehnungen zwischen 115 und 182 µm/m. Aufgrund des geringen Gesamtniveaus ließen sich in dieser Phase keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bettungsmitteln ausmachen. Zudem handelte es sich hier um den reinen Einbauzustand ohne den Rückbau von Verbauelementen, welcher für eine Bewertung nicht von maßgeblicher Bedeutung ist.





Bedeutsam war der Einfluss des Ziehens der Leichtprofile in der **Phase 2**. Nach diesem Ziehen waren bei den Schüttgütern deutliche Dehnungszuwächse zu beobachten. Relativ unbeeinflusst zeigten sich die fließfähigen Verfüllmaterialien, bei denen kaum Veränderungen festzustellen waren. Die zugehörigen Dehnungswerte lagen hier bei etwa 20 – 30 % des berechneten Wertes. Bei den Schüttgütern KSG und MGM zeigten sich Dehnungszuwächse auf etwa das Doppelte des Endwertes der Phase 1. Bezogen auf die Berechnungswerte bedeutet dies mit ca. 40 % allerdings noch immer eine deutliche Unterschreitung. Bei EKB kam es zu einem Anstieg in der Phase 2 auf etwa das Dreifache des Ausgangswertes. Bezogen auf die berechneten Dehnungen sind hier mit 81 % die höchsten Werte zu verzeichnen. Es war also festzustellen, dass das Ziehen der Leichtprofile bei EKB die größten Auswirkungen hatte. Deutlich geringer waren diese bei KSG und MGM, während bei RSS und WBM kaum ein Einfluss zu erkennen war.

		Kammer 1 MGM		Kammer 2 WBM		Kammer 3 EKB		Kammer 4 RSS		Kammer 5 KSG		Berechnung	
		[µm/m]	[%]	[µm/m]	[%]	[µm/m]	[%]	[µm/m]	[%]	[µm/m]	[%]	[µm/m]	[%]
Dhasa 1	Dehnung	115	-	60	-	169	-	107	-	137	-	-	-
(Einbau)	Ort	Scheitel	(A)*	Scheitel	(I)*	Sohle	(I)	Scheite	l (I)	Sohle	(A)	-	
Dhase 2	Dehnung	263	41	79	14	515	81	105	18	266	42	635	100
Phase 2 (Dielenziehen)	Ort	Kämpfer (I)		Scheitel (I)		Sohle (I)		Scheitel (I)		Kämpfer (A)		Sohle (I)	
	Dehnung	346	40	104	12	640	75	136	18	363	42	858	100
(Zyklik)	Ort	Kämpfer (A)		Sohle (I)		Sohle	(I)	Sohle	(I)	Kämpfer (A)		Sohle (I)	
Dhase 2.2	Dehnung	447	39	133	12	750	67	172	15	399	36	1127	100
(Statik)	Ort	Sohle	(I)	Sohle (I)		Sohle	Sohle (I)		(I)	Kämpfer (A)		Sohle	(I)
Dhase 4	Dehnung	430	57	150	20	775	103	163	21	522	69	754	100
Phase 4 (Grundwasser)	Ort	Kämpfe	r (A)	Sohle	(I)	Sohle	(I)	Scheite	l (l)	Kämpfei	r (A)	Sohle	(I)
Phase 5 (Absenkung)	Dehnung	669	-	193	-	1232	-	195	-	681	-	-	-
	Ort	Sohle	(I)	Scheite	I (I)	Sohle	(I)	Scheitel (I)		Kämpfer (A)			

* (I) = Innen / (A) = Außen

Im Rahmen der zyklischen Belastung (**Phase 3.1**) waren bei RSS und WBM wiederum kaum Dehnungszuwächse zu erkennen, so dass hier, bezogen auf die berechneten Werte, sogar eine Abnahme auf etwa 19 % festzustellen war. KSG und MGM zeigten demgegenüber ähnliche Dehnungssteigerungen, wie aufgrund der Berechnungsergebnisse erwartet werden konnte.



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Die statische Belastung auf der Geländeoberkante (**Phase 3.2**) hatte bei RSS und WBM nur geringfügige Dehnungsänderungen zur Folge, so dass im Vergleich zu den Berechnungswerten das Dehnungsniveau auf etwa 15 % abfiel. Die prozentuale Steigerung der Dehnungen bei KSG und MGM entsprach wiederum der statischen Berechnung. Auffällig war, dass in allen Kammern nach der Entlastung die Dehnungen in der Rohrwand kaum zurückgingen.

In der **Phase 4** (Grundwasser) zeigten sich nur in der Kammer 5 (KSG) bedeutsame Dehnungsveränderungen. Bei allen Materialien wuchsen jedoch die prozentualen Dehnungsangaben an. Dies ist zum Teil allein darauf zurückzuführen, das der in den Berechnungen berücksichtigte Entlastungseffekt am Ende der statischen Belastung (Phase 3.2) im Versuch tatsächlich nicht aufgetreten ist.

Die Absenkung der Druckkissen in der **Phase 5** bewirkte bei allen Materialien Dehnungszunahmen. Diese fielen bei RSS und WBM mit ca. 30 μ m/m vergleichsweise gering aus. Bei KSG und MGM wurden Zuwächse von 150 bis 250 μ m/m gemessen, während bei EKB der Messwert um etwa 450 μ m/m zunahm.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Dehnungswerte in den Phasen 2 (Dielenziehen) und 3 (Zyklik, Statik) in allen Kammern erwartungsgemäß deutlich unter den berechneten Werten lagen, mit RSS und WBM bei ca. 20 %, KSG und MGM bei ca. 40 % und EKB bei ca. 75 %.

Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass diese Werte bei allen Materialien in Versuchen mit optimal ausgeführtem Einbau gemessen wurden. In der Praxis können materialspezifische Schwachstellen zu einer Erhöhung der Dehnungen führen. Diese können bei den Schüttgütern beispielsweise im Verdichtungsgrad in der Leitungszone oder in einer exzentrischen Lage der Rohre im Rohrgraben zu finden sein. Bei den fließfähigen Verfüllmaterialien können die Lagerung der Rohre oder die Ausführung der Auftriebsicherung von Bedeutung sein.

5.3.2.2 Axiale Richtung

Die Auswertung der Randfaser-Dehnungen in Rohrlängsrichtung ergab in den Phasen 1 bis 4 in allen Kammern sehr geringe Werte zwischen 60 und 120 μ m/m. Im Bild 5.48 ist der Verlauf der Messwerte der Dehnungen im Rohrscheitel Innen für alle Kammern über die gesamte Versuchsdauer dargestellt.

Lediglich bei der Absenkung in der Phase 5 konnten bei den Schüttgütern (EKB, KSG und MGM) Dehnungszuwächse von etwa 40 μ m/m gemessen werden. Absolut gesehen waren die dann erreichten Dehnungen mit 140 bis 180 μ m/m relativ zu den Dehnungen in Umfangsrichtung gering. Bei den fließfähigen Verfüllmaterialien (RSS und WBM) lagen die Werte auch nach der Absenkung bei ca. 80 μ m/m. Dies lässt darauf schließen, dass Senkungsvorgänge bezüglich der Dehnung in Rohrlängsrichtung bei RSS und WBM wenig Einfluss ausüben.



Bild 5.48 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m] (Phase 1 bis 5, DMS Scheitel Innen, Axial)

5.3.3 Messstern

Die Verformungsmoduln werden separat aus den Erst- und Wiederbelastungslinien der Last-Setzungs-Diagramme berechnet. Ein typisches Ergebnis eines Plattendruckversuchs zeigt die Druck-Setzungs-Linie in Bild 5.49.









Um subjektive Einflüsse bei der Auswertung der Verformungsmoduln zu vermeiden werden die Druck-Setzungs-Linien in Anlehnung an [36] durch Polynome 2. Grades ausgeglichen:

$$\mathbf{S} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_0 + \mathbf{a}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_0^2$$

mit

 σ_0 mittlere Normalspannung unter Lastplatte in MN/m²

s Setzung der Lastplatte in mm

a₀,a₁,a₂ Konstanten des Polynoms 2. Grades.

Die Konstanten werden mit den Versuchsergebnissen s_1 , σ_{01} , s_2 , σ_{02} ... s_n , σ_{0n} aus dem Gleichungssystem

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{0} \cdot \mathbf{n} &+ \mathbf{a}_{1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i} + \mathbf{a}_{2} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^{2} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{s}_{i} \\ \mathbf{a}_{0} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i} + \mathbf{a}_{1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^{2} + \mathbf{a}_{2} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^{3} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{s}_{i} \cdot \sigma_{0i} \\ \mathbf{a}_{0} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^{2} + \mathbf{a}_{1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^{3} + \mathbf{a}_{2} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^{4} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{s}_{i} \cdot \sigma_{0i}^{2} \end{aligned}$$

nach der Methode der Minimierung der Fehlerquadrate berechnet.

Der Verformungsmodul errechnet sich dann aus der Neigung der Sekante zwischen den Punkten $0.3\sigma_{max}$ und $0.7\sigma_{max}$ nach:

$$E_{\rm v}=0,75\cdot d\cdot \frac{1}{a_1+a_2\cdot\sigma_{\rm 0max}}$$

mit

d Plattendurchmesser [mm]

σ_{0max} maximale Spannung [MN/m²]

a₁, a₂ Parameter des Polynoms 2. Grades

Üblicherweise wird der Bettungsmodul im Verkehrswegebau mit Plattendruckversuchen (Plattendurchmesser 762mm) ermittelt. Hierbei wird die elastische Setzung s=1,25mm aus dem Erstbelastungszyklus und die zugehörige Spannung $\sigma_{s=1,25}$ verwendet. Der Bettungsmodul k_s (Sekantenmodul) berechnet sich zu:

$$k_{s} = \frac{\sigma_{s=1,25}}{s}$$
 k_s Bettungsmodul [MN/m³].





Da der Messstern einen Plattendurchmesser von d=100mm aufweist, kann in diesem Fall der Grenzwert s=1,25 mm nicht als Kriterium angewendet werden. Nach der Elastizitätstheorie muss die Spannung bei kleinerem Plattendurchmesser im Verhältnis der Plattendurchmesser erhöht werden, um identische Setzungen zu erreichen, im vorliegenden Fall entspricht dies der 7,6fachen Auflast. Diese Vorgehensweise schien im Großversuchsstand nicht praktikabel, da die benötigten Spannungen im Voraus nicht bekannt sind. Eine alternative Möglichkeit, die unterschiedlichen Plattendurchmesser zu berücksichtigen, ist, den Grenzwert der Plattensetzung im Verhältnis der Plattendurchmesser abzumindern und den Bettungsmodul nachträglich mit Hilfe des Modellgesetzes

$$\frac{k_{s1}}{k_{s2}} = \frac{d_2}{d_1}$$

umzurechnen. Daher wird im Folgenden der Bettungsmodul bei einer Spannung von

 σ (s = $\frac{1,25mm}{7,62}$ = 0,164mm) berechnet.

5.3.3.1 Phase 1: Einbauzustand

Zu Begin der Messungen mit dem Messstern war nicht bekannt, wie das tatsächliche Last-Setzungs-Verhalten der Bettungsmittel im Großversuchsstand aussehen würde. Daher wurde eine zweistufige Belastung durchgeführt. In der ersten Phase wurde zur Bestimmung der Bettung soviel Druck auf die Zylinder aufgebracht, dass die Kolben einen geringen Weg von nur ca. 0,16 mm zurücklegten. Hintergrund war die Überlegung, möglichst nur elastische Verformungen zuzulassen, um den Bettungsmodul ermitteln zu können. Um eindeutige Ergebnisse zu erhalten, wurde anschließend in der zweiten Phase soviel Druck aufgebracht, dass der gesamte Weg der Zylinderkolben ca. 0,8 – 1,0 mm betrug.

<u>KSG</u>

Das Last-Setzungsdiagramm zeigt eine ungleichförmige Bettung des Rohres. Um die anvisierten Wege der Zylinderkolben zu erreichen waren, im First (Z1) die größten Spannungen nötig, in den Zwickeln die geringsten. Eine Symmetrie der Bettung ist in den Kämpfern zu erkennen, die Last-Verformungslinien liegen dicht beieinander. In den Kämpfern war annähernd nur die Hälfte der Spannung der Firstmessung (Z1) nötig, um einen vergleichbaren Weg der Zylinderkolben zu bewirken. Die geringsten Spannungen wurden in den Zwickeln aufgebracht, wobei die Last-Verformungslinien starke Unterschiede aufwiesen. Im Zwickel links (Z4) wurde die kleinste Steifigkeit festgestellt. Die berechneten Verformungsmoduln und Bettungsmoduln sind in Tabelle 5.12 dargestellt. Da während dieser Phase zwei Erstbelastungen (nach Erstbelastung, Entlastung und Wiederbelastung wird die maximal aufgebrachte Spannung während der zweiten Erstbelastung überschritten) durchgeführt wurden, werden die errechneten Verformungsmoduln separat dargestellt, die erste Erstbelastung bei einer maximalen Spannung von





 σ =260 kN/m² im Scheitel und σ =140 kN/m² in den Kämpfern wird mit E_{v1a} (Anfangsteifigkeit) bezeichnet, die zweite Erstbelastung bei einer maximalen Spannung von σ=760 kN/m² im Scheitel und σ=500 kN/m² in den Kämpfern mit E_{V1b}.



Bild 5.50 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand KSG

Im Scheitel wurde mit 105 MN/m² der höchste Erstbelastungsmodul E_{v1a} gemessen. Dies war zu erwarten, da dort die Überschüttung voll wirksam ist. Zudem wirkt im Scheitel der Verdichtungserddruck durch Einbau der Überschüttung. Die Erstbelastungsmoduln in den Kämpfern sind mit ca. 60 MN/m² nur halb so hoch wie im Scheitel. Geringer fiel der Verformungsmodul im Zwickel rechts (Z3) aus, er betrug 41 MN/m². Im gegenüberliegenden Zwickel wurden sogar nur 7 MN/m² gemessen. Hier zeigt sich die Problematik der Zwickelverdichtung eindeutig. Die großen Unterschiede in den Zwickeln deuten auf eine zumindest lokal unzureichende Verdichtung im linken Zwickel hin. Die Verformungsmoduln der zweiten Erstbelastung E_{v1b} sind im Vergleich zu E_{v1a} niedriger.

Zylinder Nr.	E _{v1a} [MN/m²]	E _{v1b} [MN/m²]	E _{v2} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m ³]
1	105,0	65,2	163,0	183,7
2	62,1	41,2	139,0	108,7
3	41,1	13,9	104,5	71,9
4	7,1	-	112,6	12,4
5	54,5	38,9	131,9	95,5





RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Im First wurde ebenfalls der höchste Wiederbelastungsmodul E_{v2} festgestellt. In den Kämpfern und im Zwickel rechts betrug E_{v2} im Mittel 135 MN/m², während im Zwickel links 112 MN/m² gemessen wurden. Auf Basis der Erstbelastung bei geringem Kolbenweg wurden die Bettungsmoduln k_{s762} berechnet, dabei wurde im First der höchste k_s errechnet, in den Kämpfern wurde k_{s762} im Mittel zu 100 MN/m³ bestimmt.

<u>RSS</u>

Um evtl. Veränderungen im Bettungsmittel wie z.B. Nacherhärtung zu überprüfen, wurden drei Messreihen durchgeführt. Die erste Reihe mit geringer Belastung nach 7 Tagen, die zweite Reihe nach 14 Tagen, wobei die Vorlast aus der vorangegangenen Messung nicht überschritten wurde (Messung auf dem Wiederbelastungsast). Nach 28 Tagen wurde die abschließende Messreihe der Phase 1 mit Überschreitung der Vorlast durchgeführt. Dadurch wurde eine neue Erstbelastung ermöglicht. Nach 7 Tagen war eine relativ gleichmäßige Verteilung des Erstbelastungsmoduls E_{v1} am Rohrumfang zu erkennen. Im Scheitel, im Kämpfer rechts(Z2) und im Zwickel rechts wurde im Mittel Ev1 = 50-60 MN/m² ermittelt, im Zwickel links(Z4) war der Verformungsmodul mit 95 MN/m² höher, im Kämpfer links (Z5) wurde Ev1 zu 33 MN/m² bestimmt. Allerdings wurden an dieser Messstelle unbeabsichtigt höhere Spannungen aufgebracht. Berücksichtigt man, dass das Bettungsmittel sich noch in der Erhärtungsphase befindet und wertet die Last-Setzungs-Linie nur bis zur geplanten Belastung aus, ergibt sich ein Ev1 von 42 MN/m². Damit wird im Kämpfer links immer noch der geringste Verformungsmodul festgestellt, die absolute Differenz relativiert sich jedoch. Die Wiederbelastungsmoduln waren sehr hoch, sie streuten zwischen 220 und 290 MN/m².



Bild 5.51 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand RSS nach 7d





Die zweite Messreihe nach 14 Tagen wurde bis zur Maximallast der vorangegangenen Messung auf dem Wiederbelastungsast durchgeführt. Es wurden keine Veränderungen der Wiederbelastungsmoduln festgestellt. Daher wird hier auf eine gesonderte Darstellung verzichtet. Das Last-Setzungs-Diagramm der abschließenden Messreihe (Bild 5.52) während Phase 1 zeigten ein relativ gleichmäßiges Last-Verformungs-Verhalten an allen Messstellen.

Zylinder Nr.	E _{V1} ⁷ [MN/m²]	E _{V2} ⁷ [MN/m²]	k _{s762} 7 [MN/m ³]
1	54,2	234,4	94,8
2	52,1	220,9	91,1
3	58,1	289,6	101,7
4	95,7	247,5	167,5
5	32,8 / 41,6	239,6	57,4 / 72,8

Tabelle 5.13 Verformungsmodul / Bettungsmodul, Einbauzustand nach 7d RSS

Die Ermittlung der E-Moduln erfolgte auf zwei Arten. Zuerst wurde der E-Modul unter Beachtung der gesamten Belastungsstufen bis zur maximalen Spannung berechnet. Im Scheitel ergab sich mit 67 MN/m² der höchste E_{v1} . Die Erstbelastungsmodule an den übrigen Messstellen lagen im Mittel bei 50 MN/m². Aus diesen Messungen lässt sich auf eine gleichmäßige Bettung des Rohres schließen. Da nach ATV 127 [27] Verformungsmodule bei Auflastspannungen von 0-100 kN/m² im Lastplattendruckversuch (Plattendurchmesser 300mm) für die statische Berechnung gefordert werden, wurde zusätzlich der Erstbelastungsmodul E_{v1-100} ermittelt. Hierzu wird die Auflastspannung mit Hilfe des Modellgesetzes für die Lastplatten des Messstern (Plattendurchmesser 100 mm) umgerechnet.

$$\frac{\sigma_{d=300}}{\sigma_{d=100}} = \frac{d_{300}}{d_{100}} \Longrightarrow \sigma_{d=100} = 300 \frac{kN}{m^2}$$

 E_{v1-100} ergab sich bei Auswertung der Last- Setzungs-Linien bis zu einer Zusatzspannung $\Delta\sigma$ von ca. 300 kN/m². Die so ermittelten Erstbelastungsmoduln waren mit Werten zwischen 100 – 120 MN/m² ebenfalls gleichmäßig um den Rohrumfang verteilt. Die Wiederbelastungsmoduln E_{v2} streuten dagegen erneut zwischen 200 und 280 MN/m². Der Bettungsmodul betrug im Mittel 200 MN/m³ am gesamten Rohrumfang.







Bild 5.52 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand RSS nach 28d

Zylinder Nr.	E _{V1} ²⁸ [MN/m²]	E _{V2} ²⁸ [MN/m²]	E _{V1-100} ²⁸ [MN/m²]	k _{s762} ²⁸ [MN/m ³]
1	67,7	281,2	123,0	215,2
2	52,4	206,7	102,1	178,6
3	49,9	221,2	117,6	205,7
4	56,4	242,8	119,9	209,8
5	46,4	200,5	123,4	215,9

Tabelle 5.14 Verformungsmodul / Bettungsmodul, Einbauzustand nach 28d RSS

<u>EKB</u>

Laut Auskunft des Lieferanten werden Plattendruckversuche nach DIN 18134 zur Bestimmung der Verformungsmoduln erst 2-3 Tage nach Einbau des Materials durchgeführt. Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass Versuche, die sofort nach Einbau des Materials durchgeführt werden, im Vergleich zu Messungen nach wenigen Tagen deutlich geringere Verformungsmodule ergeben, teilweise sogar keine Bestimmung des Verformungsmoduls möglich ist, da bereits nach Aufbringen der ersten Laststufe die nach DIN 18134 erlaubte Setzung der Platte von 5mm überschritten wird. Die geforderten Steifigkeiten werden It. Lieferant jedoch nach einigen Tagen sicher erreicht.







Bild 5.53 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand EKB

Hintergrund dieser verzögerten Stabilisierung des Materials ist die Konditionierung des Aushubbodens mit Weißfeinkalk (Branntkalk CaO). Das beim Löschen entstehende Kalziumhydroxid (Ca(OH₂)) dissoziiert im Wasser und erhöht den pH-Wert sowie die Elektrolytkonzentration des Porenwassers. Dadurch lösen sich Silikate (SiO₂) und Aluminate (Al₂O₃) aus den Partikeln und den Materialien der amorphen Oberflächen. Diese Reaktionen bewirken einen Ionenaustausch, Wasserstoffbrückenbildung und puzzolanische Reaktionen (Bildung von CSH-Phasen). Im Zusammenspiel bewirken diese Reaktionen eine Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften des Materials. Dabei ist die zeitliche Abfolge der Reaktionen von Bedeutung. Während der Sofortreaktion in der ersten Phase dominieren eine Änderung des Wasserhaushaltes, erhöhte Saugspannungen und daraus resultierende Strukturänderung des Materials (Schluffpartikel aggregieren zu größeren Körnern). Diese Aggregatbildung hängt vom Feinteilgehalt des Bodens und von der zugesetzten Kalkmenge ab. Die Effekte des Ionenaustauschs setzen sich in der zweiten Phase (Gelstadium) fort. Das Neolithstadium ist durch puzzolanische Reaktion des Kalkhydrats mit den Silikaten und Aluminaten geprägt. Die Reaktionen beginnen einige Tage nach der Hydratation und können mehrere Jahre andauern. Der Porenraum wird gelartig von den Silikaten und Aluminaten ausgefüllt. Sie führen durch die puzzolanische Reaktion zu einer Verkittung oder Zementierung der Bodenpartikel. Durch diese Reaktionen wird maßgeblich die Festigkeitseigenschaft des Bodens erhöht (vergleichbar mit Zement, jedoch viel langsamer). Indem die Lastplattendruckversuche wenige Tage nach Einbau durchgeführt werden, können die puzzolanischen Reaktionen eine Verfestigung des Materials durch Verkittung der Bodenpartikel bewirken. Aufgrund der oben beschriebenen Reaktion des Materials und aus verfahrenstechnischen Gründen wurden die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus sieben Tage nach Einbau des Bettungsmittels in der Leitungszone durchgeführt.





Die Ermittlung des Last-Setzungsverhaltens von EKA-Bett im Großversuchsstand war problematisch. Schon nach geringen Belastungen konnte das Bettungsmittel keine weiteren Spannungen aufnehmen. Der Hydraulikdruck fiel kontinuierlich ab, während der Weg der Zylinderkolben zunahm. Da dieses Verhalten teilweise bei sehr geringen Spannungen (60 kN/m²) zu Tage trat und es nicht absehbar war, wie weit die Zylinderkolben in das Bettungsmittel eindringen würden, mussten die Messungen mitunter abgebrochen werden (begrenzter Kolbenweg). Im linken Zwickel (Z4) konnte kein Druck im Zylinder aufgebaut werden. Dieses Verhalten tritt in diesem hydraulischen System nur auf, wenn der Kolben keinerlei Widerstand erfährt. Vermutlich war der Einbau des Bettungsmittels an dieser Messstelle fehlerhaft. Hier zeigt sich der offensichtliche Nachteil von lokalen Messungen. Aus der fehlenden Bettung an dieser Messstelle lässt sich nicht auf eine generell schlechte Bettung entlang des gesamten Rohrstrangs schließen.

Zylinder Nr.	E _{v1} [MN/m²]	E _{v2} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m ³]
1	40,1	105,7	70,2
2	15,4	-	26,9
3	13,6	87,1	23,8
4	-	-	-
5	28,1	-	49,2

Tabelle 5.15 Verformungsmodul / Bettungsmodul, Einbauzustand EKB nach 7 d

Im Scheitel konnte während der Messung die Spannung bis ca. 160 kN/m² gesteigert werden. Danach war der als Richtwert definierte Weg (ca. 1mm) des Zylinderkolbens erreicht. Die Last-Setzungs-Diagramme deuten auf einen Bruch im Bettungsmittel hin. Bei der Berechnung der Verformungsmoduln wurde daher nur die Anfangssteifigkeit berücksichtigt. Der schlagartige Abfall des Hydraulikdrucks im Last-Setzungs-Diagramm legt hierbei die "Bruchgrenze" fest. Betrachtet man die Verformungsmodule bis zu dieser Grenze so ergab sich ein gemischtes Bild, die Erstbelastungsmoduln variierten zwischen 15 und 40 MN/m², mit dem höchsten Modul im Scheitel und dem kleinsten im Zwickel des Rohres. Für die Messstellen, an denen die Messung abgebrochen wurde, konnten keine Wiederbelastungsmoduln E_{v2} ermittelt werden. Die in Tabelle 5.15 angegebenen E_{v2} sollten daher nicht überbewertet werden. Der Bettungsmodul k_s streute zwischen 25 MN/m³ an den Messstellen Z2/Z3 und 70 MN/m³ an der Messstelle Z1 im Scheitel.

WBM

Bei WBM wurden ebenso wie beim Bettungsmittel RSS drei Messreihen während des Einbauzustandes durchgeführt. Nach 7 Tagen wurden bis auf die Messung im rechten Kämpfer (Z2) bereits hohe Erstbelastungsmoduln $E_{v1} > 70$ MN/m² festgestellt. Die Wiederbelastungsmoduln E_{v2} streuten erheblich und waren mit Werten zwischen 240 und 450 MN/m² im Vergleich zu RSS teilweise doppelt so hoch. Derart hohe E_{v2} deuten dar-





auf hin, dass der Großteil der Verformungen des Bettungsmittels irreversibel (plastisch) war. Der Bettungsmodul lag zwischen 90 und 200 MN/m³.



Bild 5.54 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand WBM nach 7d

Zylinder Nr.	E _{V1} ⁷ [MN/m²]	E _{V2} ⁷ [MN/m²]	k _{s762} ⁷ [MN/m³]
1	117,9	254,2	206,3
2	82,3	421,6	144,0
3	87,3	319,6	152,8
4	97,2	375,5	170,8
5	47,6	221,3	83,2

Tabelle 5.16 Verformungsmodul / Bettungsmodul, Einbauzustand WBM nach 7d

Ähnlich wie bei RSS ergab die Messreihe nach 14 Tagen keine Änderungen des berechneten Wiederbelastungsmoduls. Daher wurde hier auf eine explizite Darstellung verzichtet. Nach 28 Tagen waren die ermittelten Erstbelastungsmoduln wie, schon zuvor bei RSS beobachtet, größer. Unter Berücksichtigung der gesamten Last-Setzungs-Linie bei Ermittlung des Verformungsmoduls, ergaben sich im Mittel E_{v1} von 100 MN/m² für die Zylinder 1 bis 4. Im Kämpfer rechts wurde der Erstbelastungsmodul zu 57 MN/m² berechnet. Die Auswertung von E_{v1-100} zeigte erneut ein gleichmäßigeres Bild. Die Verformungsmoduln lagen bei dieser Auswertungsstrategie im Mittel bei 120 MN/m² an allen Messstellen.





Spannung [MN/m²] 0,4 0,6 0,8 0,1 0,2 0,3 0,5 0,7 0,9 0.000 0,500 Veg [mm] 1,000 1,500 **Z**2 Z5 - Z1 -- Z2 - Z3 Z4 – — Z5

Bild 5.55 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand WBM nach 28d

Zylinder Nr.	E _{V1} ²⁸ [MN/m²]	E _{V2} ²⁸ [MN/m²]	k _{s762} ²⁸ [MN/m ³]	E _{V1-100} ²⁸ [MN/m²]
1	101,4	221,5	177,4	143,0
2	103,6	211,5	181,3	111,7
3	106,1	226,2	185,7	131,2
4	107,5	276,9	188,2	117,9
5	57,3	211,0	100,3	95,8

Tabelle 5.17 Verformungsmodul / Bettungsmodul, Einbauzustand WBM nach 28d

<u>MGM</u>

Das Dywidag Mineralgemisch zeigte während der ersten Messung im Einbauzustand ein unerwartet weiches Verhalten mit großen Wegen der Zylinderkolben bei geringen Lasten auf. Zunächst wurden die Verformungsmoduln unter Einbeziehung der gesamten Last-Verformungs-Linie ermittelt, anschließend wurde zum Vergleich die Anfangssteifigkeit unter Einbeziehung der Hälfte der maximal aufgebrachten Spannungen errechnet. Bei Auswertung des gesamten Last-Setzungs-Verlaufs ergab sich ein E_{v1} von 20 MN/m² im Scheitel. An den übrigen Messstellen wurden deutlich geringere Erstbelastungsmoduln gemessen.







Bild 5.56 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand MGM

In den Kämpfern betrug E_{v1} noch 6-7 MN/m², in den Zwickeln hingegen war kaum ein Widerstand messbar, die Verformungsmoduln errechneten sich zu max. 3 MN/m². Die Auswertung der Anfangssteifigkeit ergibt hier ein anderes Bild. Im Scheitel betrug der Erstbelastungsmodul ca. 57 MN/m². In den Kämpfern wurde der Erstbelastungsmodul im Mittel zu 16 MN/m² berechnet. Diese Auswertung unter Berücksichtigung der halben Maximallast bewirkt jedoch kaum Änderungen der ermittelten E-Moduln in den Zwickeln. Die großen Unterschiede zwischen Zwickel und Kämpfer weisen auf eine lokal fehlerhafte Verdichtung des Zwickelbereichs hin. Der Wiederbelastungsmodul E_{v2} wurde an den Messstellen Z2-Z5 im Mittel zu 63 MN/m² ermittelt. Der Bettungsmodul k_s errechnete sich in den Kämpfern im Mittel zu 28 MN/m³, im Scheitel wurde k_s zu 101 MN/m³ berechnet.

Zylinder Nr.	E _{v1} [MN/m²]	E _{v2} [MN/m²]	E _{v1-100} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m ³]
1	20,1	107,3	57,8	101,1
2	7,0	60,1	15,5	27,1
3	2,9	64,4	7,1	12,4
4	2,0	67,1	2,3	3,9
5	6,0	60,0	16,4	28,7

Tabelle 5.18 Verformungsmodul / Bettungsmodul, Einbauzustand MGM





Vergleich der Bettungsmittel

In Tabelle 5.19 wird die Gleichmäßigkeit der Bettung der Rohre bei den verschiedenen Materialien dargestellt. Hierzu werden die an den fünf Messstellen ermittelten Erstbelastungsmoduln untereinander verglichen. Es werden folgende Grenzwerte der Quotienten für die Bewertung angewendet:

• 0,85 < $\frac{E_{vi}}{E_{vi}}$ < 1,18 sehr gut

• 0,75 <
$$\frac{E_{vi}}{E_{vj}}$$
 < 1,33 gut

- 0,50 < $\frac{E_{vi}}{E_{vj}}$ < 2,00 ungleichmäßig
 0,25 < $\frac{E_{vi}}{E_{vj}}$ < 4,00 stark streuend.

Die Gleichmäßigkeit der Bettung der fließfähigen Bettungsmittel wird auf dieser Basis als sehr gut bewertet. Die Schüttgüter weisen eine stark streuende Bettung auf.

Material	Verhältnis	Verhältnis	Verhältnis	Verhältnis	Verhältnis	Mittel	Gesamthewertung
Material	E _{v1-Z1} / E _{v1max}	E _{v1-Z2} / E _{v1max}	E _{v1-Z3} / E _{v1max}	E _{v1-Z4} / E _{v1max}	E _{v1-Z5} / E _{v1max}	Witter	Counterwortung
KSG	1,00	0,63	0,21	0,00	0,60	0,49	stark streuend
D 00	1.00	0.00	0.05	0.07	1.00	0.05	
RSS	1,00	0.83	0,95	0,97	1,00	0,95	senr gut
	,	,	,	,	,		9
	0.62	0.24	0.21	0.00	0.43	0.30	stark stroughd
LIND	0,02	0,24	0,21	0,00	0,43	0,30	Stark Streuenu
	0.04	0.06	0.00	1 00	0.54	0.00	achr aut
VVDIVI	0,94	0,96	0,99	1,00	0,54	0,69	seni gut
MGM	1.00	0.27	0.12	0.04	0.28	0.34	stark streuend
2	,	- ,	-,-=	-,	-,	-,	

Tabelle 5.19 Auswertung der Gleichmäßigkeit der Bettung

5.3.3.2 Phase 2: Ziehen der Spunddielen

Das Ziehen der Spunddielen bewirkt bei allen Bettungsmitteln bis auf KSG einen Anstieg des Erddrucks in Ebene des Rohrscheitels. Bei den granularen und bindigen Bettungsmitteln geht der Anstieg einher mir einer Reduktion des Erddrucks in den Kämpfern. Die flüssigen Bettungsmittel verhalten sich im Vergleich zu den granularen und bindigen Bettungsmitteln vollkommen anders. Die Spannung steigt am ganzen Rohrumfang, wobei die Lasterhöhung bei WBM ausgeprägter ist.

In den folgenden Last-Setzungs-Diagrammen werden jeweils die Entlastungspfade der Last-Setzungs-Linien der vorangegangenen Phase 1 (Einbauzustand) den Be- und Entlastungspfaden der Messung in Phase 2 (Ziehen der Spunddielen) gegenübergestellt. Ein Überschreiten der maximalen Vorlast aus Phase 1 und damit ein Verlassen des Wiederbelastungsastes war nicht vorgesehen, da eine Änderung der Bettung des Roh-





res daraus abgeleitet werden kann, ob der neue Belastungspfad sich auf dem Entlastungspfad der letzten Messung befindet.

<u>KSG</u>

Die Last-Setzungs-Diagramme der Messstellen in den Kämpfern (Bild 5.57) belegen, dass das Bettungsmittel sich aufgrund des Ziehens der Spunddielen aufgelockert hat. Eine Erhöhung der Last bewirkt ein sofortiges Verlassen des Entlastungsastes der Messung des Einbauzustandes (EBZ) in Phase 1.



Bild 5.57 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Kämpfer KSG

Zylinder Nr.	E _{v1-EBZ} [MN/m²]	E _{v2-EBZ} [MN/m²]	E _{v1 SpW} [MN/m²]	E _{v2 SpW} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m ³]
1	65,2	163,0	95,2	151,1	-
2	41,2	139,0	26,5	128,7	46,4
3	13,9	104,5	88,2	113,3	-
4	7,1	112,6	40,9	105,9	71,6
5	38,9	131,9	15,9	107,1	27,8

Tabelle 5.20 Verformungsmodul E_v vor und nach Ziehen der Spundwand KSG

Die aus der ersten Belastung nach Ziehen der Spunddielen errechneten Steifemoduln betragen 26 MN/m² an Messstelle Z2, bzw. 16 MN/m² an Messstelle Z5. Im Scheitel wurde E_{v1} zu 95 MN/m² bestimmt, im Vergleich zum Entlastungsmodul der Phase 1 ist hier rechnerisch eine leichte Auflockerung festzustellen, unter Berücksichtigung des Last-Setzungs-Diagramms (Bild 5.59) ist hier davon auszugehen, dass eine Wiederbelastung vorliegt. Die Messung im Zwickel links (Z4) ergibt nach Ziehen der Spunddielen





einen Modul von 41 MN/m² an. Dieser E-Modul ist zwar größer als der Erstbelastungsmodul des Einbauzustands, er ist jedoch um 50 % niedriger als der Wiederbelastungsmodul der vorangehenden Messung. Im Zwickel rechts fällt der Erstbelastungsmodul um 30% ab. Der Wiederbelastungsast wird verlassen. Somit liegt in den Zwickelbereichen eine erneute Erstbelastung mit einhergehender vorheriger Auflockerung vor.



Bild 5.58 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Zwickel KSG



Bild 5.59 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel KSG

<u>RSS</u>

Das Ziehen der Spunddielen hat an keiner Messstelle eine messbare Auswirkung auf das Bettungsverhalten gezeigt. Die Last-Setzungs-Linien folgen dem Entlastungsast aus der vorangehenden 28 Tage Messung in Phase 1. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Bild 5.60 exemplarisch jeweils die Pfade einer Messstelle im Scheitel,



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Kämpfer und Zwickel dargestellt. Die nicht aufgeführten Messungen zeigen identisches Verhalten. Die berechneten Verformungsmoduln zeigen keine Änderungen auf. Das Ziehen der Spunddielen hat somit keine nachweisbaren Auswirkungen auf die Bettung des Rohres gehabt.



Bild 5.60 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel/Kämpfer/Zwickel RSS

<u>EKB</u>

Wie schon bei den gemessenen Last-Verformungs-Kurven des Einbauzustands gestaltet sich die Auswertung für EKA-Bett auch während dieser Versuchsphase sehr schwierig. Das Bettungsmittel nimmt erneut bei geringen Belastungen von ca. 60 kN/m² keine weitere Last auf. Bei der Berechnung der Verformungsmoduln werden daher die Last-Setzungs-Linien nur bis zum Bruch des Bettungsmittels einbezogen. Genau betrachtet handelt es sich hierbei um Wiederbelastungsmoduln, da die Vorlast aus den Messungen des Einbauzustandes nicht überschritten wird.

Zylinder Nr.	E _{v1 EBZ} [MN/m²]	E _{v2 EBZ} [MN/m²]	E _{v1 SpW} [MN/m²]
1	40,1	105,7	92,1
2	15,4	-	38,7
3	13,6	87,1	56,2
4	-	-	-
5	28,1	-	5,4

Tabelle 5.21 Verformungsmoduln vor und nach Ziehen der Spundwand, EKB






Bild 5.61 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel / Zwickel EKB

Der Verformungsmodul im Scheitel beträgt 92 MN/m² und ist somit im Vergleich zum Wiederbelastungsmodul in Phase 1 (E_{v2} =105MN/m²) nur geringfügig niedriger. Im Scheitel folgt die Last-Setzungs-Linie somit dem Entlastungspfad aus Phase 1, an dieser Messstelle hat keine Auflockerung stattgefunden. Im Zwickel rechts (Z3) wurde eine leichte Auflockerung mit abnehmendem Verformungsmodul festgestellt. Im Kämpfer rechts (Z2) wurde der Verformungsmodul zu 39 MN/m² bestimmt. Die Messung im gegenüberliegenden Kämpfer ergibt eine Reduktion des berechneten E-Moduls von 28 MN/m² auf 5 MN/m², hier ist deutlich eine Auflockerung des Bettungsmittels festzustellen.



Bild 5.62 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Kämpfer





Bei Betrachtung der Last-Setzungs-Kurven lässt sich an allen Messstellen, außer Z1, die Tendenz erkennen, das die Belastungspfade dieser Messung zunächst dem Entlastungsast aus Phase 1 folgen, dann aber bei teilweise geringeren Lasten die Spannung abfällt. Die berechneten Verformungsmoduln sollten hier nur als tendenzielle Größen betrachtet werden, der Spannungsbereich der während der Messungen aufgebracht wurde ist größtenteils zu niedrig, um gesicherte Aussagen treffen zu können. In Kombination mit den Dehnungsmessungen können wahrscheinlich gesicherter Aussagen getroffen werden. Eindeutig lässt sich nur feststellen, dass im Kämpfer links (Z5) Auflockerungen stattgefunden haben, während im Scheitel die Bettung konstant geblieben ist. Der Unterschied zwischen den Verformungsmoduln in den Kämpfern lässt sich auf das Ziehen der Spunddielen zurückführen. Hierbei wurden zunächst die Dielen rechts vom Rohrstrang (Z2) gezogen und nachfolgend die gegenüberliegende Seite.

<u>WBM</u>

Ebenso wie der Flüssigboden RSS verhält sich WBM. Während der Belastungsstufen wird der Entlastungsast der vorangehenden Messung des Einbauzustands nicht verlassen. Somit ändert sich der Verformungsmodul der Wiederbelastung auch nicht. Die beobachtete Zunahme der Spannungen am Rohrumfang als Resultat des Ziehens der Spunddielen kann in den Last-Setzungsdiagrammen nachvollzogen werden. Gegenüber dem hier untersuchten Ziehen der Spundwand und der damit einhergehenden Verringerung der seitlichen Bettung außerhalb der Leitungszone verhält sich WBM sehr gutmütig. Ein Einfluss auf das Bettungsverhalten für den Rohrstrang ist nicht ersichtlich. In Bild 5.63 sind exemplarisch die Zylinder im Scheitel, und jeweils ein Zylinder im Kämpfer und im Zwickel dargestellt. Die nicht dargestellten Zylinder zeigen identische Reaktionen auf und sind aus Übersichtlichkeitsgründen entfallen.



Bild 5.63 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel/ Kämpfer/ Zwickel WBM



____Z1_1.Messung ___Z1_n_SpW ___Z2_1.Messung ___Z2_n_SpW ___Z5_1.Messung ___Z5_n_SpW

Bild 5.64 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel / Kämpfer MGM

Die Last-Setzungslinien der Messungen in den Kämpfern (Bild 5.64) zeigen einen deutlichen Einfluss des Ziehens der Spunddielen auf das Bettungsverhalten von MGM. Neben einer Reduktion des Erddrucks in Kämpferhöhe ist eine Auflockerung aus den Last-Setzungs-Linien erkennbar. In den Kämpfern liegt eine neue Erstbelastung vor, da die Entlastungspfade aus dem Einbauzustand (Phase 1) sofort verlasen werden. Der Erstbelastungsmodul der Kämpfer nach Ziehen der Spunddielen beträgt noch 3 MN/m².



Bild 5.65 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Zwickel MGM

Die Messung im Scheitel ergibt einen Wiederbelastungsmodul $E_{v2 SpW}$ =86 MN/m², durch das Ziehen der Spunddielen ist keine entscheidende Änderung der Bettung im Scheitel des Rohres festzustellen. Die Messungen im Zwickel (Bild 5.65) ergeben ein anderes

0.5





Bild. War die Bettung bei Untersuchung des Einbauzustands sehr gering, so beträgt der Verformungsmodul in beiden Zwickeln ca. 57 MN/m², solange die Vorlast nicht überschritten wird, und entspricht damit dem Entlastungsmodul aus Phase 1. Nach Überschreitung der Vorlast stellt sich erneut ein sehr niedriger Erstbelastungsmodul von ca. 3 MN/m² ein. In den Zwickeln kann somit keine Änderung der Bettung des Rohres festgestellt werden.

Zylinder Nr.	E _{v1 EBZ} [MN/m²]	E _{v2 EBZ} [MN/m²]	E _{v1-100} [MN/m²]	E _{v1 SpW} [MN/m²]	E _{v2 SpW} [MN/m²]
1	20,1	107,3	57,8	85,5	137,2
2	7,0	60,1	15,5	3,0	35,1
3	2,9	64,4	7,1	59,5	60,15
4	2,0	67,1	2,3	54,2	51,9
5	6,0	60,0	16,4	2,4	43,2

Tabelle 5.22 Verformungsmoduln E_v vor und nach Ziehen der Spundwand MGM

Vergleich der Bettungsmittel

In Tabelle 5.23 ist das Verhältnis der Steifemoduln nach und vor Ziehen der Spunddielen an den Messstellen in den Kämpfern und Zwickeln aller Bettungsmittel dargestellt. Bei den fließfähigen Bettungsmitteln ist kein Einfluss erkennbar, die Schüttgüter reagieren alle mit deutlichen Auflockerungen in den Kämpfern und geringen Änderungen der Bettung in den Zwickeln.

Material		Verhältnis E	_{v SpW} / E _{v2 EBZ}	Bewertung	
	Z2	Z3	Z4	Z5	
KSG	0,18	0,84	0,36	0,12	in Zwickeln mäßiger Einfluss, in Kämpfern Verlust der Bettung
RSS	1,02	0,92	1,02	1,02	kein Einfluss
EKB	0,34	0,65	-	0,19	in Zwickeln mäßiger Einfluss, in Kämpfern Verlust der Bettung
WBM	1,08	1,05	1,03	1,04	kein Einfluss
MGM	0,05	0,92	0,81	0,04	in Zwickeln geringer Einfluss, in Kämpfern Verlust der Bettung

Tabelle 5.23 Bewertung des Einflusses des Ziehens der Spunddielen auf die Bettung der Rohre





5.3.3.3 Phase 3: Statische und zyklische Belastung KSG

Während der zyklischen Belastung an der GOK nimmt der Hydraulikdruck im geschlossenen Hydrauliksystem an den Messstellen im Scheitel und in den Zwickeln kontinuierlich, jedoch nicht ausgeprägt ab. Die Spannung im Scheitel reduziert sich um 8 kN/m², die Spannung in den Zwickeln um 6 kN/m². Im Messpunkt Kämpfer links (Z2) konnte aus technischen Gründen die Änderung des Drucks nicht aufgezeichnet werden. Die Lastwechsel der zyklischen Belastung können in Bild 5.66 nicht als Schwankung des



Bild 5.66 Verlauf Hydraulikdruck während zykl. / stat. Belastung KSG

Hydraulikdrucks erkannt werden. Das Aufbringen der statischen Last unmittelbar nach Beendigung der zyklischen Belastung bewirkt einen Anstieg der Spannungen an allen Messstellen (Bild 5.67). Die Spannungen im Scheitel und in den Zwickeln steigen um ca. 13 kN/m², im Kämpfer links um ca. 4 kN/m². Die sich aus der statischen Last



Bild 5.67 Verlauf Spannung [kN/m²] während statischer Belastung KSG





rechnerisch in Rohrscheitelebene ergebende Erhöhung der Spannung um 50 kN/m² stellt sich nicht ein. Nach Beendigung der statischen Belastung fällt der Druck im Scheitel und in den Zwickeln jedoch nicht auf den Ausgangswert ab. Die statische Belastung führt somit zu einer wenn auch geringen, irreversiblen Spannungserhöhung im Rohrstrang. Im Kämpfer links (Z5) dagegen fällt der Druck auf den Ausgangswert ab.



Bild 5.68 Last-Setzungsdiagramm nach zyklischer-statischer Belastung Scheitel / Kämpfer KSG

KSG zeigt nach der zyklischen und statischen Belastung an der GOK ähnliches Verhalten wie schon nach dem Ziehen der Spundwände. Den Last-Setzungs-Diagrammen ist zu entnehmen, dass im Scheitel und in den Zwickeln des Rohres die Last-Setzungs-Linien dem Entlastungsast der vorangegangenen Messung nach Ziehen der Spunddielen (Phase 2) folgen. Der Verformungsmodul ändert sich dementsprechend nur geringfügig. Auffällig ist, dass in den Kämpfern eine erneute Erstbelastung erkennbar ist. Der Entlastungsast der vorangegangenen Messung wird zu Beginn der ersten Belastungsstufe sofort verlassen. Demnach ist es in den Kämpfern der Leitungszone erneut zu Auflockerungen gekommen. Der Erstbelastungsmodul im Kämpfer rechts beträgt 12 MN/m² im gegenüberliegenden Kämpfer 10 MN/m².

Zylinder Nr.	E _{v1-SpW} [MN/m²]	E _{v2-SpW} [MN/m²]	E _{v1 Zykl} [MN/m²]	E _{v2 Zykl} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m ³]
1	95,2	151,1	-	132,7	-
2	26,5	128,7	12,3	110,1	21,5
3	88,2	113,3	-	109,4	-
4	40,9	105,9	-	119,4	-
5	15,9	107,1	10,1	84,0	17,7

Tabelle 5.24 Verformungsmoduln vor und nach zyklischer / statischer Belastung KSG







Bild 5.69 Last-Setzungsdiagramm nach zyklischer-statischer Belastung Zwickel KSG

<u>RSS</u>



Bild 5.70 Verlauf Hydraulikdruck während zyklischer / statischer Belastung RSS

Die zyklische Beanspruchung hat keine messbaren Schwankungen des Hydraulikdrucks in den Zylindern zur Folge (Bild 5.70). Während der zyklischen Belastung fällt der Hydraulikdruck an Zylinder 1 leicht kontinuierlich ab.



Bild 5.71 Verlauf Spannung [kN/m²] während statischer Belastung RSS

Das Aufbringen der statischen Last an der GOK bewirkt eine unerwartete Reaktion an den Messstellen (Bild 5.71). In allen Hydraulikzylindern fällt der Druck ab. Im Scheitel reduziert sich die Spannung um ca. 45 kN/m². In den Zwickeln und im Kämpfer fällt die Spannungsreduktion geringer aus. Nach Beendigung der statischen Belastung reagiert das Bettungsmittel erneut ungewöhnlich. Im Scheitel steigt die Spannung leicht um 15 kN/m² an. Die gleiche Reaktion ist im Zwickel links (Z4) festzustellen, wo die Spannung um 8 kN/m² ansteigt. Im Kämpfer ist die Reaktion so wie erwartet, das Entfernen der statischen Last bewirkt einen Abfall der Spannung am Hydraulikzylinder. Allerdings fällt hier der Hydraulikdruck auf Null ab.



Bild 5.72 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Zwickel RSS





Die Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens nach zyklischer und statischer Belastung ergibt bei dem Bettungsmittel RSS keine signifikante Änderung der Verformungsmoduln im Vergleich zur vorangegangenen Messung. Der Wiederbelastungsast wird in den Zwickeln nicht verlassen. Im Scheitel und in den Kämpfern ändert sch der E-Modul nicht, obwohl sich die Position der Hydraulikkolben geändert hat. Die betreffenden Kolben sind nach der zyklischen/statischen Belastung unter Abbau des Hydraulikdrucks (Bild 5.73) weiter in das Bettungsmittel eingedrungen. Im Scheitel hat der Kolben einen Weg von 0,1mm zurückgelegt, in den Kämpfern sind es je 0,2 mm. Erstaunlicherweise hat das aber keinen negativen Einfluss auf das Bettungsverhalten (Änderung des Verformungsmoduls, als Maßstab angenommen).



Bild 5.73 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Scheitel / Kämpfer RSS

Welche Einflüsse bei RSS diese Reaktion auf die der zyklischen Belastung folgende statische Belastung bewirkten, kann auf Basis der vorliegenden Daten nicht geklärt werden, und muss an dieser Stelle offen gelassen werden. Anhand der DMS-Messungen konnte diese Reaktion nicht verifiziert werden. Dieses Verhalten bedarf weiterer Untersuchungen.

<u>EKB</u>

Die zyklische Belastung an der GOK bewirkt bei EKB ebenfalls eine kontinuierliche Reduktion des Hydraulikdrucks im gesamten System. In diesem Fall ist die zyklische Belastung bei der Darstellung des Hydraulikdrucks als Schwankung des Hydraulikdrucks im Scheitel und im Zwickel sichtbar (Bild 5.74). Dies liegt an der Körnungslinie des Materials (weitgestuft).





Bild 5.74 Verlauf Hydraulikdruck während zyklischer Belastung EKB

Nach Aufbringen der statischen Last steigt am gesamten Rohrumfang die Spannung auf den Lastplatten an (Bild 5.75). Im Scheitel und in den Zwickeln erhöht sich die Spannung um ca. 20 kN/m², im Kämpfer ist ein geringer Anstieg von 4 kN/m² messbar. Nach Beendigung der statischen Belastung reduzieren sich die Spannungen annähernd auf den Ausgangswert.



Bild 5.75 Verlauf Spannung [kN/m²] während statischer Belastung EKB

Die Problematik des frühen Versagens bei Aufbringen von begrenzten Lasten besteht bei EKB auch zwei Monate nach dem Einbau. Die Messung im Scheitel des Rohres zeigt nur minimale Veränderung des Verformungsmoduls im Vergleich zur vorangegangenen Messung nach Ziehen der Spunddielen. Prinzipiell wird diese Belastung auf dem Wiederbelastungsast durchgeführt. An den verbleibenden Messstellen konnte maximal





ca. 60 kN/m² Last aufgebracht werden. Die Berechnung des E-Moduls erfolgt daher wieder bis zum vermeintlichen Bruch des Bettungsmittels. Im Zwickel rechts (Z3) verbleibt die Last-Setzungs-Linie nahezu auf dem Wiederbelastungsast, der Verformungsmodul nimmt von 56 MN/m² auf 44 MN/m² ab. Im Kämpfer links (Z5) liegt eine neue Erstbelastung vor, der Erstbelastungsmodul wird zu 9 MN/m² ermittelt. Im rechten Kämpfer (Z2) bleibt der Verformungsmodul im Vergleich zur Phase 2 fast unverändert. Anhand dieser Ergebnisse kann eine Auflockerung in der Seitenverfüllung links des Rohres vermutet werden.



Bild 5.76 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung EKB

Zylinder Nr.	E _{v SpW} [MN/m²]	E _{v1 Zykl} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m³]
1	92,1	86,7	151,7
2	38,7	35,8	62,6
3	56,2	43,8	76,7
4	-	-	-
5	5,4	8,7	15,2

Tabelle 5.25 Verformungsmoduln vor und nach zyklischer / statischer Belastung EKB



Bild 5.77 Verlauf Hydraulikdruck während zyklischer Belastung WBM

Auch beim Bettungsmittel WBM nimmt der Hydraulikdruck im Laufe der zyklischen Belastung kontinuierlich ab (Bild 5.77). Nach statischer Belastung verhält sich WBM ähnlich wie das Bettungsmittel RSS. Die Spannung der Zylinder in den Zwickeln und im Kämpfer fällt bei Aufbringen der statischen Last ab (Bild 5.78). In den Zwickeln reduziert sich die Spannung um ca. 25 kN/m², im Kämpfer um ca. 20 kN/m². Laut Messwerterfassung steigt der Hydraulikdruck im Kämpfer sofort nach Lastaufbringung zwar leicht an, fällt jedoch im Verlauf der statischen Belastung wieder an. Nach Entfernen der statischen Last steigt der Druck im Zwickel rechts (Z3) wieder an, während er im gegenüberliegenden Zwickel keinerlei Änderungen aufzeigt.



Bild 5.78 Verlauf Spannung [kN/m²] während statischer Belastung WBM





Lediglich die Messung im Kämpfer zeigt, ebenso wie bei RSS, einen Abfall des Hydraulikdrucks nach Beendigung der statischen Belastung. Die Spannungsreduktion an dieser Stelle beträgt 20 kN/m².



Bild 5.79 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Scheitel / Zwickel WBM

Nach zyklischer und statischer Belastung reagiert WBM ähnlich wie RSS. Im Scheitel und in den Zwickeln wird bei Be- und Entlastung der Wiederbelastungsast der vorangegangenen Messung nicht verlassen, der Verformungsmodul ändert sich nicht (Bild 5.79). In den Kämpfern sind die Kolben der Hydraulikzylinder während der Versuchsphase 0,1 bis 0,2 mm herausgefahren (Bild 5.80). Dies bleibt aber ohne Einfluss auf den berechneten Verformungsmodul, der sich nicht signifikant verändert.



Bild 5.80 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Kämpfer WBM





<u>MGM</u>

Dywidag Mineralgemisch zeigt die deutlichste Reaktion auf die statische Belastung an der GOK (Bild 5.82). Das Anfahren des Zylinders zu Beginn der zyklischen Belastung auf die Mittelkraft ist in der Datenerfassung bereits sichtbar. Danach tritt eine kontinuierliche Reduktion des Hydraulikdrucks auf (Bild 5.81). Nach Beendigung der zyklischen Belastung verhält sich Dywidag in viel kleinerem Maßstab ähnlich wie die Flüssigböden. Im Scheitel und in den Zwickel steigt die Spannung minimal an, während sie im



Bild 5.81 Verlauf Hydraulikdruck während zyklischer/statischer Belastung MGM

Kämpfer leicht abfällt. Die Reaktion auf das Aufbringen der statischen Last ist eine deutliche Erhöhung des Hydraulikdrucks an allen Messstellen. Die rechnerische Zusatzlast von 50 kN/m² aus statischer Belastung in Ebene des Rohrscheitels wurde bei MGM am deutlichsten nachgewiesen. Im Scheitel steigt die Spannung um ca. 50 kN/m², in den Zwickeln um ca. 40 kN/m². Im Kämpfer ist der Spannungsanstieg mit 10 kN/m² gering. Auch hier zeigt sich, dass die statische Belastung an der GOK, selbst nach Entfernung eine permanente Erhöhung der Rohrbelastung zur Folge hat. Im Scheitel ist die Spannungsreduktion gering, während im Zwickel 50% der Zusatzlasten nach Beendigung der statischen Belastung abgebaut werden. Im Kämpfer stellt sich der Spannungszustand vor der statischen Belastung ein.

Zylinder Nr.	E _{v1 SpW} [MN/m²]	E _{v2 SpW} [MN/m²]	E _{v1 Zykl} [MN/m²]	E _{v2 Zykl} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m³]
1	85,5	137,2	112,7	-	-
2	3,0	35,1	6,1	35,1	10,6
3	59,5	60,2	55,0	103,0	96,2
4	54,2	51,9	65,0	102,2	113,7
5	2,4	43,2	4,9	44,4	8,5





Bild 5.82 Verlauf Spannung [kN/m²] während statischer Belastung MGM

Die Be- und Entlastungsstufen nach zyklischer und statischer Belastung bleiben im Scheitel und in den Zwickeln auf dem Wiederbelastungsast (Bild 5.83). Der Verformungsmodul im Scheitel beträgt 113 MN/m². In den Zwickeln ist der Verformungsmodul nahezu unverändert, der Wiederbelastungsast wird nicht verlassen. Rechts beträgt der Verformungsmodul 55 MN/m², links nimmt er von 52 MN/m² auf 65 MN/m² leicht zu. In den Kämpfer zeigt das Dywidag Mineralgemisch ähnliches Verhalten wie KSG. Bei Belastung wird der Entlastungsast der vorangegangenen Messung sofort verlassen, es tritt eine neue Erstbelastung mit einem Verformungsmodul von 5 MN/m² ein (Bild 5.84).



Bild 5.83 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Scheitel/Zwickel MGM







Bild 5.84 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Kämpfer MGM

Vergleich der Bettungsmittel

In Tabelle 5.27 sind die Quotienten der Verformungsmoduln nach und vor zyklischer/statischer Belastung an den Messstellen in den Kämpfern und Zwickeln dargestellt. Wie in Phase 2 treten bei den fließfähigen Bettungsmitteln keine Änderung der Bettung auf. Bei den Schüttgütern KSG und MGM ist ein Bettungsverlust in den Kämpfern zu erkennen, während in den Zwickeln die Änderung der Bettung gering bleibt.

Material	١	/erhältnis E	w zykl∕ E _{v2 SpV}	Bewertung	
	Z2	Z3	Z4	Z5	
KSG	0,10	0,97	1,13	0,09	in Zwickeln geringer Einfluss, In Kämpfern Verlust der Bettung
RSS	1,04	0,99	1,07	0,94	kein Einfluss
EKB	0,93	0,78	-	1,61	ungleichmäßiger Einfluss
WBM	0,97	1,05	0,93	1,00	kein Einfluss
MGM	0,17	0,91	1,25	0,11	in Zwickeln mäßiger Einfluss, In Kämpfern Verlust der Bettung

Tabelle 5.27 Bewertung des Einflusses der zyklischen/statischen Belastung auf die Bettung der Rohre





5.3.3.4 Phase 4: Simulation von Grundwasserspiegelveränderung KSG

Im Scheitel ändert sich der Verformungsmodul nicht, während in den Kämpfern der Entlastungsast der vorangegangenen Messung sofort nach Aufbringen der ersten Belastungsstufe verlassen wird (Bild 5.85). In den Zwickeln wird der Entlastungsast erst nach Überschreitung der Vorbelastung verlassen (Bild 5.86). Somit ist keine Änderung des Wiederbelastungsmoduls feststellbar.



Bild 5.86 Last-Setzungsdiagramm GW Zwickel KSG

Bild 5.85 Last-Setzungsdiagramm nach GW Scheitel/Kämpfer KSG





RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik
--

Zylinder Nr.	E _{v1 Zykl} [MN/m²]	E _{v2 Zykl} [MN/m²]	E _{v1 GW} [MN/m²]	E _{v2 GW} [MN/m²]	E _{v1-b GW} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m ³]
1	-	132,7	-	129,7	-	-
2	12,3	110,1	11,9	112,1	-	20,8
3	-	109,4	-	99,9	54,9	96,0
4	-	119,4	-	90,3	51,6	90,2
5	10,1	84,0	12,2	98,8	-	21,3

Tabelle 5.28 Verformungsmoduln vor und nach Simulation GW KSG

<u>RSS</u>



Bild 5.87 Last-Setzungsdiagramm nach GW Scheitel / Kämpfer RSS

Nach der Simulation von Grundwasserspiegel Veränderung und Absenkung ist keine Änderung des Last-Setzungsverhalten von RSS feststellbar. Die Verformungsmodule sind im Vergleich zur vorherigen Messung in Phase 3 nicht signifikant verändert.









<u>EKB</u>

Da EKA-Bett bereits bei geringen Belastungen versagt und die Grundwassersimulation zum Anstieg der Ausgangsspannungen geführt hat, ist eine zuverlässige Ermittlung des Verformungsmoduls nicht möglich. Tendenziell ist aus dem Last-Setzungs-Diagramm allerdings keine Veränderung der Bettung festzustellen (Bild 5.89).



Bild 5.89 Last-Setzungsdiagramm nach GW EKB

<u>WBM</u>

Bei dem Bettungsmittel WBM ist wie bei RSS kaum Einfluß der Grundwassersimulation auf das Last-Verformungsverhalten feststellbar. In Bild 5.90 ist exemplarisch für den Scheitel, Kämpfer und Zwickel das Last-Setzungs-Diagramm dargestellt.



Bild 5.90 Last-Setzungsdiagramm nach GW WBM



Entlastungspfad Phase

-Z2 Zvkl

Z2 GW -

Z1_Zyki

Z1 GW



Z3_GW

Z4_Zyki

Z4 GW

Z3_Zyki

MGM reagiert ähnlich wie KSG auf die Grundwassersimulation. Im Scheitel und in den Zwickeln ist keine Änderung des Wiederbelastungsmoduls ersichtlich, während in den Kämpfern der Entlastungsast schnell verlassen wird und eine neue Erstbelastung auftritt (Bild 5.91). In den Kämpfern tritt demnach erneut eine Auflockerung ein.

Zylinder Nr.	E _{v1 Zykl} [MN/m²]	E _{v2 Zykl} [MN/m²]	E _{v1 GW} [MN/m²]	E _{v2 GW} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m³]
1	112,7	-	118,4	-	-
2	6,1	35,1	2,2	32,6	3,8
3	55,0	103,0	114,9	-	-
4	65,0	102,2	101,2	-	-
5	4,9	44,4	2,2	44,7	3,8

Tabelle 5.29 Verformungsmoduln vor und nach Simulation GW MGM

Vergleich der Bettungsmittel

B 10,0

12.0

14,0

16.0

18,0

In Tabelle 5.30 sind die Quotienten der Verformungsmoduln nach und vor Simulation des Grundwasseranstiegs aller Bettungsmittel dargestellt. Wie in den vorherigen Versuchsphasen bleibt die Bettung bei den fließfähigen Materialien nahezu konstant. Die Schüttgüter KSG und MGM weisen einen Bettungsverlust im Kämpferbereich auf. Im Zwickelbereich tritt bei MGM keine signifikante Bettungsänderung auf, dagegen tritt bei KSG rechnerisch eine Erhöhung der Verformungsmoduln im Zwickelbereich auf. Wie

0,4

71

Z2

Z5

Z5_GW





bereits beschrieben, können für EKB keine zuverlässigen Aussagen über evtl. Änderungen der Bettung getroffen werden.

Material		Verhältnis I	E _{v GW} / E _{v2 zyl}	Bewertung	
	Z2	Z3	Z4	Z5	g
KSG	0,11	0,91	0,76	0,15	in Zwickeln mäßiger Einfluss, in Kämpfern Verlust der Bettung
RSS	1,01	1,00	0,99	1,10	kein Einfluss
EKB	0,93	0,78	-	1,61	-
WBM	0,94	1,02	0,96	1,02	kein Einfluss
MGM	0,06	1,12	0,99	0,05	in Zwickeln kein Einfluss, In Kämpfern Verlust der Bettung

Tabelle 5.30 Bewertung des Einflusses der Grundwasserspiegel Veränderung auf die Bettung der Rohre

5.3.3.5 Phase 5: Simulation von Sackungen KSG

Die Absenkung der Druckkissen hatte einen vollständigen Verlust der Bettung im Bereich der Rohrsohle des Messrohres zur Folge.



Bild 5.92 Rohrsohle nach Ausgrabung



Bild 5.93 Ausgrabung





Bild 5.94 Last-Setzungs-Diagram nach Simulation von Setzungen KSG

In den Zwickeln und im Kämpfer links fiel der Druck in den Hydraulikzylindern vollständig ab, das Aufbringen einer Belastung war nicht möglich. Dieser Zustand wird nur erreicht, wenn keinerlei Bettung vorhanden ist. Die Messungen ergaben zudem Auflockerungen an den übrigen Messstellen. Sowohl im Scheitel als auch im Kämpfer rechts findet eine neue Erstbelastung statt.

Oberhalb des Druckkissens konnte bei der Ausgrabung festgestellt werden, dass tatsächlich ein handbreiter Spalt zwischen Rohrsohle und Bettungsmittel entstanden war (Bild 5.92). Die Oberfläche der Bettung nach Ausbau der Rohre ist in Bild 5.93 dargestellt. Deutlich sind die Senkungen und Einbrüche infolge Absenkung der Druckkissen zu sehen.

Zylinder Nr.	E _{v1 GW} [MN/m²]	E _{v2 GW} [MN/m²]	E _{v1-b GW} [MN/m²]	E _{v1 Kissen} [MN/m²]	E _{v2 Kissen} [MN/m²]
1	-	129,7	-	55,6	119,0
2	11,9	112,1	-	14,8	107,2
3	-	99,9	54,9	2,5	76,0
4	-	90,3	51,6	0	-
5	12,2	98,8	-	1,3	72,9

Tabelle 5.31 Verformungsmoduln vor und nach Absenkung Kissen KSG







Bild 5.95 Last-Setzungs-Diagram nach Absenkung Druckkissen Scheitel/Kämpfer RSS

In Bild 5.96 ist die obere Bettungsschicht nach Ausbau der Rohre abgebildet. Es ist auf den ersten Blick keine Auswirkung aus Absenken der Druckkissen erkennbar. Nach Auswertung der Lastplattendruckversuche muss diese Vermutung relativiert werden.



Bild 5.96 Halbschale RSS



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Die Messungen im Scheitel und im Zwickel rechts ergaben keine Änderung des Verformungsmoduls im Vergleich zur vorangegangenen Messung nach GW-Absenkung. In beiden Kämpfern und im Zwickel links war der Hydraulikdruck komplett abgefallen. Nach Aufbringen der ersten Belastungsstufe haben die Kolben der Zylinder im Kämpfer schon bei geringer Belastung einen Weg von ca. 0,2 mm zurückgelegt. Im Zwickel links war der Weg des Zylinderkolbens im Vergleich dazu sehr viel größer. Nach Aufbringen der ersten Belastungsstufe wurde der Kolben um mehr als 1 mm herausgedrückt. Das Absenken der Kissen hatte somit zur Folge, dass der Kontakt zwischen Kolben und Bettungsmittel verloren ging. Jedoch geschah dies in minimalem Maßstab, wenn man z.B. die granularen und das bindige Bettungsmittel zum Vergleich heranzieht. Auch an den Messstellen in den Kämpfern und im Zwickel links hat die minimale Änderung der Bettung keine Auswirkung auf die Steifigkeit. Nachdem der Kontakt zwischen Kolben und Bettungsmittel durch Erhöhung des Hydraulikdrucks hergestellt war, wurde keine signifikante Änderung der Verformungsmoduln ermittelt.

Bei genauer Betrachtung der Halbschale waren kleine Risse von ca. 1mm Breite in der Halbschale zu erkennen (Bild 5.98). Der Risspfad verlief entlang der Senkungsmulde aus der Absenkung des Druckkissens, die sich bei den granularen und dem bindigen Bettungsmittel allerdings viel deutlicher einstellte. An der Messstelle im Zwickel rechts (Bild 5.99) war ebenso ein Riss zu erkennen. Im Zwickel links, dort wo der Kolben den größten Weg zurücklegte war jedoch kein Riss sichtbar.



Bild 5.97 Last-Setzungs-Diagram nach Absenkung Druckkissen Zwickel RSS





Bild 5.98 Riss in oberer Bettungsschicht RSS



Bild 5.99 Riss an Messtelle im Zwickel rechts

Zylinder Nr.	E _{v1} ²⁸ [MN/m²]	E _{v2} ²⁸ [MN/m²]	E _{v1-100} ²⁸ [MN/m²]	E _{v1 Kissen} [MN/m²]	E _{v2 Kissen} [MN/m²]
1	67,7	281,2	123,0	123,2	-
2	52,4	206,7	102,1	104,1	159,3
3	49,9	221,2	117,6	243,0	-
4	56,4	242,8	119,9	117,9	219,1
5	46,4	200,5	123,4	135,0	189,2

Tabelle 5.32 Verformungsmoduln vor und nach Absenkung Kissen RSS

<u>EKB</u>

Das Last-Setzungs-Diagramm der Messreihe nach Absenkung des Druckkissens ist in Bild 5.100 dargestellt. Die Ausgangsspannung im Scheitel ist abgefallen. Bis zu einer Spannung von 100 kN/m² verläuft die Belastung auf dem Wiederbelastungsast, danach tritt eine neue Erstbelastung ein. Im Zwickel rechts folgt die Last-Setzungs-Linie dem Wiederbelastungspfad. Die Steigung der Last-Setzungs-Kurve ändert sich zunächst auch nach Überschreitung der Vorlast nicht. Im Kämpfer rechts (Z2) wird zunächst keine Änderung des Verformungsmoduls festgestellt, es ist aber auch nicht möglich die maximale Vorlast zu überschreiten. Nach Druckerhöhung entzieht sich das Material der Belastung. Die Kolben der Zylinder im Kämpfer fahren ca. 6 mm aus.

Die Setzungsmulde ist in Bild 5.101 deutlich sichtbar. Sie erstreckt sich von der ersten Muffe zwischen dem Übergangsrohr und dem Rohr mit Folienmessung bis zur dritten Muffe zwischen Messstern und DMS-Rohr. Daraus ist auch zu erkennen warum im Zwickel rechts eine Messung möglich war. Der Bruch in der Bettungsschicht verläuft ca. 5 cm unterhalb der Messstelle.







Bild 5.100 Last-Setzungs-Diagramm nach Absenkung Kissen EKB



Bild 5.101 Bettungsschicht nach Ausbau Rohrstrang EKB

Zylinder Nr.	E _{v GW} [MN/m²]	E _{v1 Kissen} [MN/m²]	E _{v2 Kissen} [MN/m²]
1	89,6	36,2	97,5
2	47,7	47,8	-
3	91,6	87,4	104,3
4	-	-	-
5	63,2	22,0	-

Tabelle 5.33 Verformungsmoduln vor und nach Absenkung Kissen EKB





<u>WBM</u>



Bild 5.102 Last-Setzungs-Diagramm nach Absenkung Kissen WBM

Bei WBM ist kein Einfluss der Absenkung des Druckkissens erkennbar. Die Verformungsmoduln ändern sich im Vergleich zur vorangegangenen Belastungsphase nicht signifikant. Auch sind keine Risse in der oberen Bettungsschicht (Bild 5.103) nach Ausbau der Rohre aufgefallen.



Bild 5.103 Halbschale nach Ausbau Rohrstrang WBM





RUB-Lehrstuhl für G	Grundbau und	Bodenmechanik
---------------------	--------------	---------------

Zylinder Nr.	E _{V1} ²⁸ [MN/m²]	E _{V2} ²⁸ [MN/m²]	E _{V1-100} ²⁸ [MN/m²]	E _{v1 Kissen} [MN/m²]
1	101,4	221,5	143,0	93,9
2	103,6	211,5	111,7	111,8
3	106,1	226,2	131,2	108,6
4	107,5	276,9	117,9	-
5	57,3	211,0	95,8	-

Tabelle 5.34 Verformungsmoduln vor und nach Absenkung Kissen WBM

<u>MGM</u>

Nach Absenkung des Druckkissens ist an den Messstellen im Zwickel keine Bettung vorhanden. Im Zwickel rechts war kein Druckaufbau im Hydraulikzylinder möglich. Im gegenüberliegenden Zwickel hat der Kolben einen Weg von 8mm bei geringer Spannung von 100 kN/m² zurückgelegt. Im Scheitel war keine Änderung des Verformungsmoduls nachzuweisen. In den Kämpfern war ebenfalls eine Auflockerung feststellbar. Bei Belastung wurde der Entlastungsast der vorangegangenen Messung verlassen, es trat eine neue Erstbelastung ein.



Bild 5.104 Last-Setzungs-Diagramm nach Absenkung Kissen MGM

Zylinder Nr.	E _{v1 GW} [MN/m²]	E _{v2 GW} [MN/m²]	E _{v1 Kissen} [MN/m²]	E _{v2 Kissen} [MN/m²]	k _{s762} [MN/m³]
1	118,4	-	119,4	-	-
2	2,2	32,6	16,4	32,2	28,7
3	114,9	-	19,5	25,6	34,1
4	101,2	-	0	0	-
5	2,2	44,7	15,5	31,3	27,1

Tabelle 5.35 Verformungsmoduln vor und nach Absenkung Kissen MGM





In Bild 5.105 ist die Setzungsmulde infolge Absenkung sichtbar. Sie erstreckt sich wie bei KSG und EKB von der ersten Muffe bis zur dritten Muffe zwischen Messstern und DMS-Rohr.



Bild 5.105 Bettungschicht nach Absenkung Druckkissen MGM

Vergleich der Bettungsmittel

In Tabelle 5.36 sind die Quotienten der Verformungsmoduln nach Absenkung der Druckkissen in Relation zu den Verformungsmoduln vor dem Absenken aufgeführt. Es zeigt sich, dass KSG und MGM die Bettung verloren haben, an allen Messstellen sind die Steifemoduln infolge der Absenkung abgefallen. Bei EKB ist die Bettung an den Messzylindern nur beeinflusst, sie ist aber noch vorhanden. In Bild 5.101 ist jedoch deutlich die Setzungsmulde zu erkennen, die Beurteilung gilt demnach nur für die Messstellen und nicht für den gesamten Rohrstrang. Eine Beeinflussung der Bettung liegt auch bei RSS besonders im rechten Kämpfer und linken Zwickel vor. WBM ist das einzige Bettungsmittel, bei dem die Bettung auch nach Absenkung der Druckkissen nahezu unverändert bleibt.

Material	Verhältnis E _{v Kissen} / E _{v2 GW}				Bewertung
	Z2	Z3	Z4	Z5	g
KSG	0,13	0,03	-	0,01	Bettung verloren
RSS	0,43	1,06	0,40	0,81	Bettung beeinflusst
EKB	1,00	0,95	-	0,35	Bettung beeinflusst
WBM	1,13	1,04	1,02	0,92	Bettung gering beeinflußt
MGM	0,50	0,17	-	0,35	Bettung verloren

Tabelle 5.36 Beurteilung der Bettung nach Ablassen der Druckkissen





5.3.4 Bodenparameter

Im Verlauf des Projektes wurden zahlreiche bodenmechanische Untersuchungen sowohl im Großversuchsstand als auch im Labor des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik durchgeführt. Im Großversuchsstand wurde während des Einbaus der Böden und während des schichtweisen Abtrags des Bettungs- und Verfüllmaterials kontinuierlich die Dichte und der Wassergehalt der Materialien mit Densitometerversuchen überprüft. Nach Ziehen des Verbaus wurden Rammsondierungen durch die seitliche Bettungsschicht durchgeführt, um Anhaltswerte für die Lagerungsdichte in der Leitungszone zu erhalten. Zusätzlich wurden Lastplattendruckversuche, vornehmlich am Verfüllmaterial, durchgeführt.

Zur Ermittlung von Materialkenngrößen und Untersuchung des Last-Setzungsverhaltens bei unterschiedlichen Dichten der Bettungsmittel standen Triaxialversuche, Kompressionsversuche und einaxiale Druckversuche im Vordergrund. Darüber hinaus wurden während der Voruntersuchungen Versuche zur Ermittlung der Kornverteilung, der lockersten u. dichtesten Lagerung und der Proctordichte durchgeführt.

5.3.4.1 Densitometerversuche nach DIN 18125

Während der gesamten Versuchsreihe wurde fortlaufend die Verdichtung sowohl der Bettungsmittel als auch der Kies-Sand-Verfüllung mit Hilfe von Densitometerversuchen nach DIN 18125 überprüft. Änderungen der Dichte konnten durch den Vergleich der Messungen während des Einbaus und während des schichtweisen Abtrags der Bettungs- und Verfüllmaterialien dokumentiert werden.

Die Dichtebestimmung fand an charakteristischen Messpunkten im Großversuchsstand statt. Während der Einbauphase und während des Abtrags wurde die Dichte der Bettungsmittel wenn möglich an der oberen Bettungsschicht, der Seitenverfüllung und der Abdeckung bestimmt. Die Dichte des Verfüllmaterials wurde an der Grabensohle, und in Tiefen von 1m, 2m und 3m von GOK bestimmt. Zudem wurde die Dichte der Verfüllung seitlich der Spundwand in Stichproben untersucht.

Während des Einbaus des Verfüllmaterials konnte eine gleichmäßige Verdichtung nachgewiesen werden. Die geforderten 90% Proctordichte wurden sicher sowohl in der Leitungszone als auch in den schwer zugänglichen Bereichen seitlich der Spundwand erreicht. Im Durchschnitt wurde in der Leitungszone, dort wo keine Randeinflüsse vorlagen, eine Proctordichte von 100% erreicht. Die Proctordichte in der schwer zugänglichen Verfüllung seitlich der Spundwand betrug 90-95 %.

Die Proctordichten und zugehörigen Wassergehalte der Bettungsmittel sind in Tabelle 5.37 bis Tabelle 5.39 gesondert dargestellt.





KSG



Bild 5.106 in situ Dichtebestimmung Einbau KSG

In der oberen Bettungsschicht (Rohrsohle) von KSG betrug die Proctordichte im Bereich des Messsterns 99 % und fiel zu den Rändern hin auf 96% ab. In der Seitenverfüllung (Kämpfer) und in der Abdeckung wurde die Proctordichte zu 99 -100% ermittelt. In der Hauptverfüllung kann man von einer durchschnittlichen Proctordichte von 100% ausgehen.

Während des schichtweisen Abtrags nach Beendigung der Versuchsreihen konnte in Kammer 5 Auflockerung festgestellt werden, wobei die Proctordichte nicht unter 90% fiel. Seitlich des Rohrstrangs war die Auflockerung in der Überdeckung größer als in der Längsachse des Rohrstrangs. Zudem konnte festgestellt werden, dass an der Seite, an der die Spunddielen zuerst gezogen wurden, die Reduktion der Dichte im Mittel um 1-2% geringer ausfiel.



Bild 5.107 Verbauspur Spunddielen rechts





Bild 5.108 in situ Dichtebestimmung Ausbau KSG

Densitometerversuche mittig durch die Verbauspur der rechten Spunddielen (Bild 5.107) ergaben Proctordichten von 93-95%. Mit zunehmender Tiefe war die Auflockerung in den Seitenbereichen geringer. So wurde in der Leitungszone im rechten Kämpfer keine Reduktion der Proctordichte festgestellt. In der Rohrsohle betrug die Proctordichte in der direkten Einflusszone der Setzungsmulde des Druckkissens noch 97%.

RSS

Die Bestimmung der Dichte in der Überdeckung von Kammer 4 ergab in Längsachse des Rohrstrangs Proctordichten von 100%. In diesem Bereich kann weder eine Auflockerung noch Verdichtung nachgewiesen werden. In den Seitenbereichen links und rechts des Rohrstrangs konnten ebenso keine auffälligen Veränderungen der Dichte festgestellt werden. Wie schon in Kammer 5 war die Dichte an der Seite, an der die Spunddielen zuerst gezogen wurden, größer als an der gegenüberliegenden Seite. Rechts wurden Dichten von 97 -100% bestimmt, links 92-96%. Bei den Bettungsmitteln RSS und WBM wurde nach Einbau keine Dichtebestimmung im Versuchsstand durchgeführt, da die Dichte am zuverlässigsten aus den Rückstellproben für Laborversuche bestimmt werden konnte. Da zudem an diesen Bettungsmitteln keine Proctorversuche durchgeführt wurden, wurde als Referenzdichte die mittlere Trockendichte aller Probenkörper zugrunde gelegt. Die Densitometerversuche an RSS ergaben eine leichte Zunahme der Dichte in Längsachse des Rohstrangs. In der Abdeckung wurden Dichten von 105 bis 110% bestimmt, in der Rohrsohle nahm die Dichte entlang des Rohstrangs ab. Am Schacht wurden 109% ermittelt, am offenen Ende des Rohrstrangs 102%. In





der Seitenverfüllung war die Dichte im rechten Kämpferbereich mit 106% höher als im linken Kämpfer, wo keine Nachverdichtung ermittelt werden konnte.



Bild 5.109 in situ Dichtebestimmung Einbau RSS









EKB

Bei Ausbau der Hauptverfüllung wurden durchweg geringere Dichten als die Einbaudichten des Verfüllmaterials bestimmt. Im Mittel betrug die Proctordichte 95 %, wobei auch teilweise 91% gemessen wurden. Somit war hier eine deutliche Auflockerung festzustellen.

EKB war nur mit erhöhtem Aufwand verdichtbar. Nach dem vom Lieferanten vorgeschlagenen Einbau mit Schütthöhen von 20 cm und zwei Übergängen wurden Proctordichten von unter 80% festgestellt. Um eine Proctordichte von mindestens 85% zu erreichen, wurde die Anzahl der Übergänge mit dem WACKER SB 600 verdoppelt. Die Einbaudichte der oberen Bettungsschicht betrug i.M. 92 %, während in der Seitenverfüllung und Abdeckung Dichten von 85% erreicht wurden. Die deutliche Setzungsmulde infolge Kissenabsenkung führte dazu, dass nur zwei Densitometerversuche in der Rohrsohle durchgeführt werden konnten. Hier lag die Proctordichte bei 88 bzw. 92%. In der Abdeckung wurde 85% Proctordichte bestimmt, damit ergaben sich auch hier keine Änderungen im Vergleich zur Einbaudichte. In der Seitenverfüllung betrug die Proctordichte 75-78%, die Reduktion um 7% ist ein deutlicher Hinweis auf Auflockerungen. In Bild 5.111 ist die Abdeckung aus EKB während des Ausbaus dargestellt. Links und rechts vom Scheitel des Rohrstrangs hat sich das Bettungsmittel deutlich gesetzt. Auf welche Versuchsphase diese große Setzung zurückzuführen ist, kann im Nachhinein nicht zweifelsfrei festgestellt werden.



Bild 5.111 Abdeckung Leitungszone EKB

Das Ziehen der Spundwände und das Ablassen des Druckkissens sowie Grundwassereinfluss sind mögliche Gründe, gesicherte Aussagen können wegen der Vielzahl der Versuchsphasen nicht gegeben werden. Eine Verdichtung infolge der Setzungen konnte in den Kämpfern nicht nachgewiesen werden. EKB war das einzige Bettungsmittel, bei dem solch deutliche Setzungen in der Abdeckung sichtbar waren.







Bild 5.112 in situ Dichtebestimmung Einbau EKB



Bild 5.113 in situ Dichtebestimmung Ausbau EKB





WBM

Die Einbaudichten des Verfüllmaterials in Kammer 2 betrugen in der Leitungszone im Mittel 100%, in der Verfüllung seitlich der Spunddielen wurden Proctordichten von 90 - 95 % erreicht. Die Dichtebestimmung in der Hauptverfüllung ergab leichte Auflockerungen im Vergleich zur Einbaudichte. Die kleinste ermittelte Dichte betrug 93%. Auch hier wurden an der Seite, an der die Spunddielen zuerst gezogen wurden, höhere Proctordichten nachgewiesen.

In der gesamten Leitungszone wurden beim Ausbau höhere Dichten als die Referenzdichten aus den Rückstellproben ermittelt. In der Rohrsohle wurde die Dichte zu 105-108% bestimmt, in der Abdeckung 102-106%. Die Proctordichten in der Seitenverfüllung wurden zu 106-110% bestimmt, wobei wiederum die rechte Seite stärker verdichtet war.



Bild 5.114 in situ Dichtebestimmung Einbau WBM




Bild 5.115 in situ Dichtebestimmung Ausbau WBM

MGM

Aufgrund der guten Verdichtbarkeit des MGM wurden beim Einbau im Mittel Proctordichten von 104% bei einem Wassergehalt von 2,84% gemessen. Beim Ausbau des MGM wurde die Proctordichte in der Abdeckung zu 99 % bestimmt, wobei der Wassergehalt ca. 9% betrug. In der Seitenverfüllung rechts wurden bei drei Densitometerversuchen Proctordichten von 96 bis 103% festgestellt, in der Seitenverfüllung links war eine deutliche Auflockerung mit Proctordichten von 87 bis 99% festzustellen. Der Wassergehalt wurde aus den Densitometerversuchen zu 4-5 % berechnet. Auflockerungen waren ebenso in der unteren Bettungsschicht vorhanden. Die Dichten wurden dort zu 91 -94 % bestimmt, wobei der Wassergehalt zwischen 6 und 9% variierte. In der Überdeckung zeigte sich erneut, dass die Dichten des Verfüllmaterials rechts vom Rohrstrang höher waren als links.

In Längsachse des Rohrstrangs wurden Proctordichten von 97 bis 108% in der Überdeckung bestimmt, somit sind die Auflockerungen wie bei den fließfähigen Materialien gering ausgefallen.



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik





Bild 5.116 in situ Dichtebestimmung Einbau MGM



Bild 5.117 in situ Dichtebestimmung Ausbau MGM





		Postion	ρ _f	w	ρd	Proctordichte
			1,914	3,81	1.844	96,78
		obere	1,962	3,54	1,894	99,45
		Bettungsschicht	1,971	3,81	1,898	99,65
		_	1,895	3,58	1,829	96,02
	Einbau	seitliche	1,984	4,18	1,904	99,96
		Bettungsschicht	1,968	4,18	1,889	99,17
			2,022	4,74	1,931	101,36
		Abdeckung	2,008	4,74	1,917	100,64
		Abdeckung	1,974	4,92	1,881	98,76
			2,005	4,92	1,911	100,33
		Postion	Pf	w	ρa	Proctordichte
			1,891	2,90	1,838	96,46
KSG		obere	1,898	2,80	1,847	96,94
		Bettungsschicht	1,940	2,70	1,889	99,17
			1,903	2,80	1,851	97,19
		obere	1,931	3,33	1,869	98,11
		Bettungsschicht	1,929	3,80	1,859	97,57
		Zwickel	1,897	3,67	1,830	96,06
	Auchau					
	Ausbau		1,994	3,50	1,927	101,14
		seitliche	1,907	3,33	1,845	96,87
		Bettungsschicht	1,942	3,50	1,876	98,50
			1,967	3,33	1,904	99,93
			1 000	2.000	4.040	404.00
			1,998	3,000	1,940	101,82
		Abdeckung	1,923	3,000	1,807	98,01
			1,700	2,090	1,755	91,10
			1,900	3,710	1,917	100,02
			1,337		1,555	101,00
		Postion	<u>^-</u>	w	<u>.</u> .	Finhaudiahta
		1 03001	Pf	**	Pd	Einbaudichte
	Einbau	Mittolwort	1 884	30.11	1 1 1 1	100.00
		Rückstellnrohen	1,004	00,11	1,440	100,00
		Postion	ρ _f	w	Ри	Ausbaudichte
			1.978	23.91	1.596	109.74
		obere	1,920	27.06	1,511	103.90
		Bettungsschicht	1,920	28.62	1,493	102,63
		Ŭ Ö	1,918	29.15	1,485	102.06
Pee						
			1,880	28,68	1,461	100,42
			1,887	28,61	1,467	100,86
	Ausbau	coitlicho	1,989	26,11	1,577	108,43
	, asbau	Battungeschicht	1,963	27,22	1,543	106,05
			1,894	30,27	1,454	99,97
			1,960	27,10	1,542	106,03
			1,992	25,51	1,587	109,10
		Abdeckung	1,939	26,22	1,536	105,60
		Ŭ	1,916	28,32	1,493	102,64
			1,944	25,98	1,543	106,07

Tabelle 5.37 Ergebnisse Densitometerversuche in Leitungszone; KSG, RSS





		Postion	Pf	w	ρa	Proctordichte
			1,963	14,00	1,722	91,01
		obere	1,988	14,00	1,744	92,17
		Bettungsschicht	2,067	14,00	1,813	95,83
			2,038	14,00	1,788	94,49
	Finbau	seitliche	1,835	14,00	1,609	85,06
	Embad	Bettungsschicht	1,834	14,00	1,609	85,02
			1,876	14,00	1,645	86,96
			1,849	14,00	1,622	85,71
		Abdeckung	1,829	14,00	1,604	84,78
			1,836	14,00	1,611	85,14
	000000000000000000000000000000000000000	*****	1,844	14,00	1,617	85,49
FKB		T				
		Postion	Pf	w	Pα	Proctordichte
		obere	1,994	19,41	1,670	88,26
		Bettungsschicht	2,065	18,37	1,745	92,21
			1,725	18,00	1,462	77,25
			1,721	18,00	1,459	77,09
	Ausbau	seitliche	1,759	20,25	1,463	77,31
		Bettungsschicht	1,652	18,00	1,400	74,01
			1,709	18,00	1,449	76,57
			1,795	21,57	1,477	78,04
			1,887	18,34	1,594	84,26
		Abdeckuna	1,898	18,99	1,595	84,29
			1,921	19,81	1,603	84,75
			1,791	18,10	1,516	80,15
		Postion	Pf	w	ρa	Einbaudichte
	E in the second					
	Einbau	Mittelwert	1,751	35,80	1,289	100,00
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben	1,751	35,80	1,289	100,00
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben	1,751	35,80	1,289	100,00
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben	1,751	35,80	1,289	100,00
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion	1,751	35,80 w	1,289	100,00 Ausbaudichte
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion	1,751 Pr 1,852 1,852	35,80 w 33,01	1,289 <u>Pa</u> 1,392 1,252	100,00 Ausbaudichte 107,99
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,826	35,80 w 33,01 34,24 23,24	1,289 <u>Pa</u> 1,392 1,362 1,277	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,706	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,24	1,289 Pa 1,392 1,362 1,377 1,251	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82
	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94	1,289 Pa 1,392 1,362 1,377 1,351	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65	1,289 <u>Pa</u> 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04	1,289 Pa 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65	1,289 Pd 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83	1,289 Pd 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88	Pd 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,34	1,289 Pa 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374 1,395	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,34	1,289 Pa 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374 1,395	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847 1,800	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,34 35,54	1,289 P d 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374 1,395 1,328	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24 103,01
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847 1,800 1,777	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,34 35,54 34,84	1,289 Pd 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374 1,395 1,328 1,318	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24 103,01 102,25
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847 1,800 1,777	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,34 35,54 34,84	1,289 P d 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374 1,395 1,328 1,318	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24 103,01 102,25
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847 1,800 1,777 1,808	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,88 32,34 35,54 34,84 34,09	1,289 P d 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,381 1,374 1,395 1,328 1,318 1,349	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24 103,01 102,25 104,60
WBM	Einbau	Mittelwert Rückstellproben Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	1,751 Pr 1,852 1,828 1,836 1,796 1,835 1,846 1,871 1,835 1,846 1,871 1,835 1,826 1,847 1,800 1,777 1,808 1,815	35,80 w 33,01 34,24 33,31 32,94 33,65 33,04 32,65 32,83 32,88 32,88 32,88 32,84 35,54 34,84 34,09 32,22	1,289 Pa 1,392 1,362 1,377 1,351 1,373 1,388 1,411 1,388 1,411 1,374 1,395 1,328 1,318 1,349 1,372	100,00 Ausbaudichte 107,99 105,65 106,83 104,82 106,50 107,64 109,42 107,14 106,61 108,24 103,01 102,25 104,60 106,45

Tabelle 5.38 Ergebnisse Densitometerversuche in Leitungszone; EKB, WBM





		Postion	Pf	w	ρa	Proctordichte
			2,053	2,84	1,997	103,78
		obere	2,120	2,84	2,061	107,12
		Bettungsschicht	2,105	2,84	2,047	106,39
			2,051	2,84	1,994	103,64
	Finbau	seitliche	2,032	2,84	1,976	102,71
	Linbau	Bettungsschicht	2,080	2,84	2,023	105,15
			2,054	2,84	1,997	103,80
			2,012	2,84	1,956	101,68
	Abdeckung	2,104	2,84	2,045	106,31	
			2,007	2,84	1,952	101,44
			2,066	2,84	2,009	104,42
IVIGIVI		Postion	ρr	w	ρα	Proctordichte
INIGINI		Postion	<u>Рг</u> 1,992	w 9,20	<u>ρα</u> 1,824	Proctordichte 94,80
INGIN		Postion Rohrsohle	<u></u>	w 9,20 5,82	<mark>Ра</mark> 1,824 1,764	Proctordichte 94,80 91,69
INGINI		Postion Rohrsohle	<u>Pr</u> 1,992 1,867 1,879	w 9,20 5,82 6,71	Ра 1,824 1,764 1,761	Proctordichte 94,80 91,69 91,54
INGIN		Postion Rohrsohle	<u>Pr</u> 1,992 1,867 1,879	w 9,20 5,82 6,71	Ρ α 1,824 1,764 1,761	Proctordichte 94,80 91,69 91,54
INGIN		Postion Rohrsohle	<u>Pr</u> 1,992 1,867 1,879 1,760	w 9,20 5,82 6,71 4,40	Ρ α 1,824 1,764 1,761 1,686	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62
INGIN	Aushau	Postion Rohrsohle	<u>Pr</u> 1,992 1,867 1,879 <u>1,760</u> 1,877	w 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70	Ρ α 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10
INGIN	Ausbau	Postion Rohrsohle seitliche	Pr 1,992 1,867 1,879 1,760 1,877 1,980	W 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70 3,90	Ρ α 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810 1,906	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10 99,04
INGIN	Ausbau	Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	Pr 1,992 1,867 1,879 1,760 1,877 1,980 1,954	W 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70 3,90 5,49	Ρ α 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810 1,906 1,852	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10 99,04 96,25
INGIN	Ausbau	Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	Pr 1,992 1,867 1,879 1,760 1,877 1,980 1,954 2,055	W 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70 3,90 5,49 3,62	Pd 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810 1,906 1,852 1,984	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10 99,04 96,25 103,09
INGIN	Ausbau	Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	Pr 1,992 1,867 1,879 1,760 1,877 1,980 1,954 2,055 1,997	W 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70 3,90 5,49 3,62 3,64	Pd 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810 1,906 1,852 1,984 1,927	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10 99,04 96,25 103,09 100,14
INGIN	Ausbau	Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	Pr 1,992 1,867 1,879 1,760 1,877 1,980 1,954 2,055 1,997	W 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70 3,90 5,49 3,62 3,64	Pd 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810 1,906 1,852 1,984 1,927	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10 99,04 96,25 103,09 100,14
INGIN	Ausbau	Postion Rohrsohle seitliche Bettungsschicht	Pr 1,992 1,867 1,879 1,760 1,877 1,980 1,954 2,055 1,997 2,085	 ₩ 9,20 5,82 6,71 4,40 3,70 3,90 5,49 3,62 3,64 9,09 	Pd 1,824 1,764 1,761 1,686 1,810 1,906 1,852 1,984 1,927 1,911	Proctordichte 94,80 91,69 91,54 87,62 94,10 99,04 96,25 103,09 100,14 99,32

Tabelle 5.39 Ergebnisse Densitometerversuche in Leitungszone; MGM

In Tabelle 5.40 ist die Dichteänderung in der Seiteverfüllung, der oberen Bettungsschicht und der Abdeckung aus den Densitometerversuchen während des Einbaus und Ausbaus der Bettungsmittel dargestellt. Dabei werden exemplarisch die Maximalwerte der Densitometerversuche während des Ausbaus und Mittelwerte des Einbaus verwendet. Bei den Schüttgütern treten als Folge des nachträglichen Ziehens des Verbaus die größten Dichtereduktionen in der seitlichen Bettungsschicht auf.

	Dichteänderung [%]								
Material	seitliche Bet	tungsschicht	obere Betti	ungsschicht	Abdeckung				
	Einbau [g/cm³]	Ausbau [g/cm³]	Einbau [g/cm³]	Ausbau [g/cm³]	Einbau [g/cm³]	Ausbau [g/cm³]			
KSG	1,987	1,845	1,866	1,847	1,910	1,867			
	-7	,70	-1	-1,03		,3			
RSS	1,448	1,577	1,448	1,596	1,448	1,587			
	8,18		9,27		8,76				
EKB	1,609	1,400	1,764	1,670	1,620	1,595			
	-14	,93	-5,63		-1,57				
WBM	1,289	1,411	1,289	1,392	1,289	1,377			
	8,	8,65		7,40		6,39			
MGM	2,000	1,686	2,025	1,761	1,992	1,902			
	-18	3,62	-14	,99	-4,73				

Tabelle 5.40 Dichteänderung der Bettungsmittel





Bei MGM werden insgesamt die größten Dichteänderungen und somit Auflockerungen festgestellt. Bei EKB treten in der seitlichen Bettungsschicht mit 15% ebenfalls große Auflockerung auf. Dagegen sind bei KSG in der seitlichen Bettungsschicht auch hohe Dichteänderungen aufgetreten, in der oberen Bettungsschicht und Abdeckung ist die Dichtereduktion mit max. 2% minimal. Die fließfähigen Bettungsmittel weisen im Vergleich zur mittleren Dichte der Rückstellproben maximale Dichtezuwächse von 9% auf. Bei keinem Versuch konnte eine Auflockerung festgestellt werden.

5.3.4.2 Kompressionsversuche nach DIN 18135

Die Kompressionsversuche an den Bettungsmitteln KSG, EKB und MGM wurden in einem Mittelödometer spannungsgesteuert durchgeführt. Die Abmessungen des Mittelödometers waren:

- Durchmesser d = 28cm
- Höhe h = 8cm.

Das Verhältnis Probendurchmesser zu Probenhöhe betrug 3,5 und lag damit innerhalb der Grenzewerte, die in E DIN 18135 [37] zur Minimierung des Einflusses der Wandreibung angegeben werden. Da die Probenhöhe mindestens das Fünffache des größten Korndurchmessers betragen muss, waren Proben mit maximalem Korndurchmesser von 16mm zulässig. Die vorliegenden Bettungsmittel erfüllen diese Voraussetzungen.

Die Bettungsmittel RSS und WBM wurden in einem modifizierten Mittelödometer (Durchmesser Laststempel d=23,5cm) eingebaut (Bild 5.118). Die Modifikation wurde



Bild 5.118 modifizierter Mittelödometer



Bild 5.119 Probekörper mit Schalung , RSS

gewählt, um ungestörte Probekörper der Bettungsmittel RSS und WBM verwenden zu können, und um den Einfluss des Probenalters untersuchen zu können. Hierfür wurden





die Bettungsmittel in flüssigem Zustand in Schalungsformen (Innendurchmesser $d_0 = 23,5$ cm; Höhe $h_0 = 6,8$ cm) eingebaut (Bild 5.119) und klimatisiert feucht gelagert. Durch diese Vorgehensweise, war es möglich die Probekörper zu verschiedenen Zeitpunkten zu verwenden und Störungen der Proben durch den Einbau im Versuchsstand zu vermeiden. Die Probekörper wurden samt Schalung im Mittelödometer zentrisch ausgerichtet. Der verleibende Spalt zwischen der Schalung des Probekörpers und dem feststehenden Ring des Mittelödometers ($\Delta d = 4,5$ cm) wurde mit einem hochfesten, fließfähigen Vergussmörtel ausgefüllt. Nach Erhärtung des Vergussmörtels wurden die einaxialen Kompressionsversuche durchgeführt.

Nach Einbau der Proben wurde die Kopfplatte aufgelegt und zunächst eine geringe Vorlast von ca. 5 kN/m² zur Anpassung der Probe an die Versuchsapparatur aufgebracht. Die Belastung wurde dann stufenweise gesteigert, wobei die Last bei jeder Lasterhöhung verdoppelt wurde, und bei Entlastung auf jeweils ¼ bzw. ½ reduziert wurde. Die Last wurde frühestens nach Abschluss der Primärkonsolidation gesteigert. Hierzu wurde der zeitliche Verlauf der Zusammendrückung beobachtet. Nach Abschluss des Versuches wurden die Feucht- und Trockenmasse der gesamten Probe ermittelt.

Für jeden Versuch wurden ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm und ein Porenzahl-Dehnungs-Diagramm erstellt.

In Bild 5.120 ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Proben unterschiedlichen Alters für RSS dargestellt. Auf der Ordinate wird die vertikale Dehnung ε_1 aufgetragen, die Spannung σ_1 wird als Abszisse in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Die vertikale Spannung σ_1 wird als Quotient der gemessenen gesamten Vertikalkraft (einschließlich des Gewichtes der Lastplatte) F und der konstanten Querschnittsfläche A berechnet:

$$\sigma_1' = \frac{F}{A}$$

Die vertikale Dehnung der Probe nach der i-ten Laststufe ϵ_i wird aus der Höhenänderung Δs_i und der Anfangsprobenhöhe h_0 ermittelt:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta \mathbf{s}_i}{h_0}$$

Aus der Sekante der Spannungs-Dehnungs-Linie wird der Steifemodul bei behinderter Seitendehnung E_s für einen Spannungsintervall bestimmt:

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}} = \frac{\Delta \boldsymbol{\sigma}_{1i}'}{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{i}} (1 - \boldsymbol{\varepsilon}_{i-1})$$

Dabei wird anhängig von der Belastungsgeschichte unterschieden zwischen:



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



- Steifemodul bei Erstbelastung E_{s1}
- Steifemodul bei Entlastung Ese
- Steifemodul bei Wiederbelastung Es2

Die Porenzahl e jeder Laststufe berechnet sich aus der Korndichte des Materials ρ_S und aus der aktuellen Trockendichte ρ_d :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$
$$= (1 + w)\frac{\rho_s}{\rho_t} - 1$$

1



Bild 5.120 Spannungs-Dehnungs-Diagramm halblogarithmisch ; RSS

Ein typisches Spannungs-Porenzahl-Diagramm für granulare Böden mit Variation der Lagerungsdichte ist in Bild 5.121 dargestellt. Die Porenzahl e wurde als Ordinate in linearem Maßstab aufgetragen, die Spannung σ_1 als Abszisse in logarithmischem Maßstab.

In den folgenden Tabellen 5.41– 5.45 sind die Steifemoduln bei behinderter Seitendehnung E_S in Abhängigkeit der Belastungsgeschichte (Erstbelastung, Entlastung, Wiederbelastung) und der vertikalen Auflastspannung σ_1 ' für die untersuchten Bettungsmittel dargestellt. Bei RSS und WBM wurde zusätzlich das Probenalter berücksichtigt, während bei KSG, EKB und MGM die Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D_{Pr} dargestellt wurde.







Bild 5.121 Spannungs-Porenzahl-Diagramm halblogarithmisch ; KSG

KSG

Bei einer Auflast von σ = 100 kN/m² steigt der Steifemodul der Erstbelastung E_S mit zunehmender Proctordichte von 10 MN/m² auf 18 MN/m². In gleichem Maße steigen die Steifemoduln bei höherer Auflastspannung. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} liegt im Mittel bei 75 MN/m² bei einer Auflast von σ = 100 kN/m². Eine Erhöhung der Spannung bewirkt einen geringen Anstieg des Wiederbelastungsmoduls. Die Variation der Proctordichte hat nur geringen Einfluss auf den erzielten Wiederbelastungsmodul. Bild 5.122 zeigt die Steifemoduln bei Erstbelastung und Wiederbelastung, in Abhängigkeit der Spannung σ_1 und der Proctordichte D_{Pr}.

Material	Proctordichte D _{Pr}	Trockendichte ρ _d	Spannung		Steifemodul Es	
	[%]	[%] [g/cm³]		[kN/m²]		
				100	10120	
			Erstbelastung	200	18642	
				400	28235	
	90	1,661	Entlastung	400	189089	
				100	62744	
			Wiederbelastung	200	81333	
				400	93095	
				100	11720	
			Erstbelastung	200	22794	
	95	1,752		400	37065	
KSG			Entlastung	400	193207	
				100	86919	
			Wiederbelastung	200	85342	
				400	100460	
				100	18229	
			Erstbelastung	200	30737	
				400	45629	
	100	1,845	Entlastung	400	198971	
				100	76128	
			Wiederbelastung	200	82130	
				400	101457	

Tabelle 5.41 Steifemoduln E_S aus einaxialen Kompressionsversuchen KSG





Bild 5.122 Steifemodul in Abh. von Spannung und Verdichtungsgrad D_{Pr}; KSG

RSS

Da die Dichten der Proben aus den Voruntersuchungen und der Proben aus der Verfüllung der Leitungszonen sich deutlich unterscheiden, werden die Versuchsergebnisse aus den Voruntersuchungen zum Vergleich ebenfalls in Tabelle 5.42 dargestellt. Bild 5.123 zeigt die spannungs- und altersabhängigen Steifemoduln der Erst- und Wiederbelastung. E_S beträgt unabhängig vom Probenalter im Mittel 12 MN/m² bei einer Auflast von σ =100 kN/m². Erst bei höheren Spannungen zeigt sich ein Einfluss des Probenalters. Der Wiederbelastungsmodul bei σ =100kN/m² liegt bei 96 MN/m² im Mittel, es konnte kein Einfluss des Probenalters festgestellt werden. Mit höherer Spannung steigt E_{s2} für die Proben mit 14 und 28 Tagen Alter deutlich auf 150 MN/m² an, während die Probe nach 7 Tagen einen leichten Abfall des Steifemoduls verzeichnet.



Bild 5.123 Steifemodul in Abh. von Spannung und Probenalter ; RSS





Material	Probenalter	Trockendichte ρ _d	Wassergehalt w	alt Spannung		Steifemodul E _S
	[d]	[g/cm³]	[%]	[kN/m²]	[kN/m²]
					100	11598
				Erstbelastung	200	12000
	7				400	16087
		1,417	31,5	Entlastung	200	272593
					100	98742
				Wiederbelastung	200	89028
					400	-
					100	9316
				Erstbelastung	200	20416
					400	21469
RSS	14	1,450	31,2	Entlastung	200	559869
					100	93957
				Wiederbelastung	200	144707
					400	-
		1,355	34,6		100	15383
				Erstbelastung	200	21130
					400	23813
	28			Entlastung	200	591431
					100	98185
				Wiederbelastung	200	157631
					400	-
			28,7		100	8299
				Erstbelastung	200	12940
					400	13671
	7	1,498		Entlastung	400	207688
					100	90607
				Wiederbelastung	200	125468
					400	156577
				Frotbolootung	100	9000
				Ersibelasiung	200	11803
RSS		4 5 4 9	07.0		400	14177
Vorunter-	14	1,510	27,6	Entlastung	400	207133
odonang				Wiederbelastung	100	120907
				wiederbeidstung	200	141204
					400	143033
				Frstbelastung	200	17576
				Listbelastarig	400	23402
	28	1 460	29,6	Entlastung	400	105971
	20	1,403		Enllasiung	400	00440
				Winderheineturz	100	92418
				Wiederbelastung	200	12030
					400	139023

Tabelle 5.42 Steifemoduln E_S aus einaxialen Kompressionsversuchen RSS

Trotz der Dichteunterschiede der Proben aus den Voruntersuchungen und aus dem Einbau der Leitungszone im Großversuchsstand wurden keine signifikant abweichenden Steifemoduln bei σ =100kN/m² festgestellt. Während der Voruntersuchungen wurde jedoch ein geringerer Anstieg des Wiederbelastungsmoduls E_{s2} unter Lasterhöhung festgestellt.





Bild 5.124 Steifemodul in Abh. von Spannung und Probenalter ; RSS Voruntersuchung

EKB

Material	Proctordichte D _{Pr}	Wassergehalt w	Trockendichte ρ _d	Spannung		Steifemodul Es
	[%]	[%]	[g/cm ³]	[kN/m²]		[kN/m²]
					100	5882
				Erstbelastung	200	6083
				-	400	8929
	77	14,00	1,463	Entlastung	400	161016
					100	34343
				Wiederbelastung	200	37055
					400	-
					100	12991
				Erstbelastung	200	16131
					400	15967
	90	11,20	1,702	Entlastung	400	144027
					100	44328
				Wiederbelastung	200	63525
EKB					400	89087
ERD					100	17389
				Erstbelastung	200	25780
					400	33556
	94	11,10	1,783	Entlastung	400	167184
					100	51853
				Wiederbelastung	200	82331
					400	105277
					100	13867
				Erstbelastung	200	23206
					400	35545
	99	11,70	1,867	Entlastung	400	111320
				Wiederbelastung	100	39794
					200	58728
					400	77378

Tabelle 5.43 Steifemoduln E_S aus einaxialen Kompressionsversuchen EKB

Im Spannungsbereich von σ =100kN/m² beträgt der Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} für Proctordichten ab D_{Pr}=90% im Mittel ca. 14MN/m². Für die geringere Proctordichte D_{Pr}=77% wird nur etwa die Hälfte des Steifemoduls erreicht. Ein Spannungsanstieg bis





 σ = 400kN/m², bewirkt einen Anstieg des Steifemoduls auf bis zu 35MN/m² bei 100% Proctordichte und 16MN/m² bei 91% Proctordichte an. Der Wiederbelastungsmodul E_{s2} liegt im Schnitt bei 40MN/m² bei einer Auflast von σ = 100kN/m². Mit höherer Auflast steigt E_{s2} bis auf 105 MN/m² an. Die Versuche mit Verdichtungsgrad D_{Pr}=77%, zeigen deutlich geringere Steifemoduln bei Erstbelastung sowie Wiederbelastung.



Bild 5.125 Steifemodul in Abh. von Spannung und Verdichtungsgrad D_{Pr} ; EKB

WBM

Auch beim Bettungsmittel WBM war die Probendichte während der Voruntersuchungen im Vergleich zur Probendichte aus der Verfüllung der Leitungszone deutlich unterschiedlich. Betrug die Trockendichte während der Voruntersuchungen im Mittel ρ_d =1,53 g/cm³, so wurde beim Verfüllen der Leitungszone ρ_d =1,29 g/cm³ festgestellt. Ursächlich hierfür war die Herstellung des Bettungsmittels. So wurden die Proben der Voruntersuchung unter Aufsicht des Herstellers in einem Zwangsmischer im Labor des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik hergestellt, während das Material für die Verfüllung der Leitungszone in der Produktionsanlage des Herstellers hergestellt wurde.

Die Versuche während der Voruntersuchungen zeigten für die Steifigkeit bei Erstbelastung weder einen signifikanten Einfluss des Probenalters noch der Auflastspannung, im Mittel betrug $E_s=11 \text{ MN/m}^2$. Zudem konnte der Einfluss des Probenalters auf den Wiederbelastungsmodul bei $\sigma=100$ kN/m² nicht eindeutig festgestellt werden, E_{s2} streute zwischen 88 und 130 MN/m². Mit zunehmender Spannung nahm die Streuung jedoch ab, bei $\sigma=400$ kN/m² betrug E_{s2} unabhängig vom Probenalter ca. 150 MN/m². Auffallend





		Trockendichte	Wassergehalt			Steifemodul
Material	Probenaiter	ρd	w	Spannu	ng	Es
	[d]	[a/cm³]	[%]	[kN/m ²	2]	[kN/m²]
					100	9334
				Erstbelastung	200	11708
	7				400	18452
		1,269	35,8	Entlastung	200	95796
					100	71927
				Wiederbelastung	200	69956
					400	-
ſ					100	18738
				Erstbelastung	200	25391
					400	29364
WBM	14	1,279	36,4	Entlastung	200	112794
					100	86761
				Wiederbelastung	200	85404
					400	-
		1,289			100	10771
			35,5	Erstbelastung	200	11991
					400	19668
	28			Entlastung	200	103909
					100	60910
				Wiederbelastung	200	73675
					400	-
		1,538	27,7		100	11286
	7			Erstbelastung	200	12006
					400	9250
				Entlastung	400	226132
				Wiederbelastung	100	88632
					200	126680
					400	165787
					100	12689
				Erstbelastung	200	12813
WBM					400	10685
Vorunter-	14	1,527	27,8	Entlastung	400	239100
suchung					100	131565
				Wiederbelastung	200	149274
					400	159290
				L L	100	10772
				Erstbelastung	200	15176
					400	11533
	28	1,535	27,6	Entlastung	400	251504
					100	110030
				Wiederbelastung	200	130069
					400	156212

Tabelle 5.44 Steifemoduln E_S aus einaxialen Kompressionsversuchen WBM

war, dass die Proben nach 14 Tagen Lagerung im Spannungsbereich bis σ =200kN/m² höhere Steifemoduln ergaben, als ältere Proben.

Die Ergebnisse der Versuche an Proben aus der Hauptuntersuchung zeigten eine ausgeprägte Variation der Steifemoduln. Der Erstbelastungsmodul lag zwischen 10 und 18 MN/m² bei σ =100 kN/m², E_{s2} streute zwischen 60 und 86 MN/m². Hierbei konnte kein eindeutiger Zeiteinfluss nachgewiesen werden. Auffällig war im Vergleich zu den Voruntersuchungen der deutlich geringere Wiederbelastungsmodul E_{s2} und der annähernd verdoppelte Erstbelastungsmodul bei σ =400 kN/m². Der Steifemodul bei Entlastung E_{se} ist mit 100MN/m² nur halb so groß wie während der Voruntersuchungen.







Bild 5.126 Steifemodul in Abh. von Spannung und Probenalter ; WBM



Bild 5.127 Steifemodul in Abh. von Spannung und Probenalter ; WBM Voruntersuchungen

MGM

Der Einfluss der Lagerungsdichte auf den Steifemodul der Erst- sowie Wiederbelastung wird in Bild 5.128 deutlich. Bei einer Auflast von 100 kN/m² steigt der Erstbelastungsmodul E_{s1} von 4,6 MN/m² (D_{Pr} =90%) auf 13 MN/m²(D_{Pr}=100%) an. Mit zunehmender Spannung nimmt die Differenz der ermittelten Erstbelastungsmoduln nur leicht ab. Bis σ =200 kN/m² hat die Lagerungsdichte kaum Einfluss auf den Wiederbelastungsmodul. Erst bei σ =400 kN/m² differiert E_{s2} eindeutig. Bei D_{Pr}=90% wurde E_{s2}=85MN/m² gemessen, bei D_{Pr}=100% hingegen 129 MN/m². Auch der Steifemodul bei Lastumkehr, der Entlastungsmodul, zeigt Abhängigkeit von der Proctordichte. Er steigt von 129 MN/m² auf 184 MN/m² bei D_{Pr}=100% an.





Material	Proctordichte D _{Pr}	Trockendichte ρ _d	Spannung		Steifemodul E _S
	[%]	[g/cm³]	[kN/m	[kN/m²]	
				100	4635
			Erstbelastung	200	8125
				400	14198
	90	1,731	Entlastung	400	129981
				100	63282
			Wiederbelastung	200	85922
				400	85956
		1,828		100	6717
			Erstbelastung	200	10657
	95			400	17325
MGM			Entlastung	400	172301
				100	66213
			Wiederbelastung	200	91274
				400	115121
				100	13181
			Erstbelastung	200	21685
				400	30321
	100	1,924	Entlastung	400	184011
				100	61552
			Wiederbelastung	200	90981
				400	129644

Tabelle 5.45 Steifemoduln E_S aus einaxialen Kompressionsversuchen MGM



Bild 5.128 Steifemodul in Abh. von Spannung und Verdichtungsgrad D_{Pr} ; MGM

Der Vergleich der Steifemoduln der Erstbelastung in Abhängigkeit von der Auflast σ_1 für die untersuchten Bettungsmittel ist in Bild 5.129 dargestellt. Aufgeführt sind bei den Schüttgütern die Steifemoduln für D_{Pr}=100%, bei den fließfähigen Materialien sind die Versuchsergebnisse von 28 Tage alten Proben dargestellt. Die fließfähigen Materialien



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



haben eine höhere Anfangssteifigkeit, mit zunehmender Belastung reagieren sie weicher. Bei den Schüttgütern liegt eine kleinere Anfangssteifgkeit vor, mit zunehmender Belastung nimmt der Steifemodul deutlicher zu. Bis σ_1 =200 kN/m² sind die Steifemoduln der Schüttgüter nahezu identisch.



Bild 5.129 Vergleich Steifemodul der Erstbelastung E_{s1} in Abhängigkeit von σ_1 aus Kompressionsversuchen

Betrachtet man nur die Ergebnisse der Kompressionsversuche, so müssten die Bettungsmittel bei optimalem Einbau im Großversuchsstand eine vergleichbare Steifigkeit bei Erstbelastung aufweisen. Der Steifemodul der Wiederbelastung E_{s2} ist in Bild 5.130 dargestellt. Hier sind deutliche Unterschiede zwischen den Bettungsmitteln zu erkennen. Die größte Wiederbelastungssteifigkeit wird bei WBM festgestellt. Bei den Schüttgütern weist EKB die kleinste Steifigkeit bei Wiederbelastung auf.



Bild 5.130 Vergleich Steifemodul der Wiederbelastung E_{s2} in Abhängigkeit von σ_1 aus Kompressionsversuchen





5.3.4.3 Triaxialversuche nach DIN 18137

Triaxialversuche an Bettungsmitteln mit flüssigem Einbau wurden in zwei Versuchsreihen an zylindrischen Proben (Höhe: 200mm, Durchmesser: 100mm) mit einem Alter von mindestens 28 Tagen sowie 200 Tagen nach Einbau der Bettungsmittel im Großversuchsstand durchgeführt. Die Proben, an denen die Versuche nach 28 Tagen durchgeführt wurden, wurden im IKT zum Zeitpunkt des Einbaus der Bettungsmittel im Großversuchsstand in Probenformen hergestellt. Die Proben für die Versuchsreihe nach 200 Tagen wurden aus den Leitungszonen entnommen und auf eine vergleichbare Geometrie getrimmt.



Bild 5.131 Entnehmen der Proben aus der Leitungszone

Da bei den granularen und bindigen Bettungsmitteln keine Zeitabhängigkeit vorlag, wurde das Probenalter nicht als Einflussgröße berücksichtigt. Die Triaxialversuche wurden an Proben, die aus dem jeweiligen Material, dass in den Leitungszonen verarbeitet wurde, hergestellt. Von EKB wurden zudem ungestörte Proben mittels eines modifizierten Ausstechzylinders aus der Abdeckung der Leitungszone entnommen. Diese Vorgehensweise war bei KSG und MGM wegen des vorliegenden Größtkorns nicht anwendbar.

Folgende Versuchsrandbedingungen wurden für die Versuche festgelegt:

- zylindrische Probenkörper (Höhe 200mm, Durchmesser 100m)
- weggesteuertes Abscheren mit einer Rate von 0,01% der Ausgangsprobenhöhe pro Minute
- jeweils drei Versuche mit Seitendrücken von σ_3 = 10, 50, 100 kN/m²
- Messung folgender Größen:
 - Vertikalkraft F
 - Seitendruck σ₃
 - vertikale Zusammendrückung der Probe ∆h
 - Volumenänderung der Probe ∆V





Vor jedem Versuch wurde die Feuchtdichte der Probe ermittelt. Nach dem Versuch wurde der Wassergehalt der Probe bestimmt.

Bild 5.132 zeigt eine schematische Darstellung des Triaxialversuchsstandes. Die vertikale Kraft wurde in den Triaxialversuchen mit Hilfe einer Lastpresse auf die Proben aufgebracht. Dabei wurde die obere Traverse mit konstanter Geschwindigkeit verfahren, während die untere Traverse fixiert war. Die vertikale Kraft wurde an einer Kraftmessdose oberhalb der oberen Probenendplatte gemessen. Die vertikale Zusammendrückung der Probe wurde über einen am Laststempel angebrachten Wegaufnehmer aufgezeichnet. Über die Veränderung des Wasservolumens in der Druckzelle wurde die Volumenänderung der Probe aufgezeichnet. Hierfür wurde die Druckzelle vollständig mit Wasser gefüllt und über eine Drainageleitung mit der Messsäule der Volumenmessanlage verbunden. Mit einem Differenzdruckaufnehmer wurden Veränderungen des Wasservolumens in der Messsäule gemessen. Mit Hilfe eines manuellen Druckreglers wurde der Druck in der Zelle über die Messsäule der Volumenmessanlage aufgebracht.





Bild 5.132 Schematsiche Darstellung des Triaxialversuchsstandes

Bild 5.133 Triaxialversuchsstand

Während der Triaxialversuche war die Dränage der Proben geöffnet, um einen eventuellen Ausritt von Porenfluid zu ermöglichen. Die Verformungsgeschwindigkeit wurde gemäß [38] über die Ermittlung der Bezugszeit t_{100} zu 0,01% der Ausgangsprobenhöhe pro Minute gewählt, so dass eine Porendruckentwicklung nicht stattfinden konnte.

Versuchsauswertung

Die vertikale Spannung σ_1 wird als Quotient der gemessenen Vertikalkraft und der aktuellen Querschnittfläche A berechnet:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Die aktuelle Querschnittsfläche errechnet sich aus dem aktuellen Volumen V und der aktuellen Höhe h:

$$A = \frac{V}{h}$$

Die vertikale Dehnung ϵ_1 der Probe wird aus der Höhenänderung der Probe Δh und der Anfangsprobenhöhe h_0 ermittelt:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Die Volumendehnung ϵ_{vol} berechnet sich aus der Volumenänderung der Probe ΔV (positive Werte: Volumenreduzierung) und dem Ausgangsvolumen der Probe V₀:

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Die nachfolgenden Tabellen 5.46 - 5.50 enthalten die Kennwerte für den Bruchzustand (maximale Deviatorspannung σ_1 - σ_3 und zugehörige Längsdehnung ϵ_1) der Bettungsmittel RSS, WBM, EKB und MGM.

Bettungsmittel	Versuch Nr.	Feuchtdichte ρ _f [g/cm³]	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ _d [g/cm³]	Seitendruck σ ₃ [kN/m²]	Bruchlast max.(σ ₁ - σ ₃) [kN/m²]	Längsdehnung bei max.(σ ₁ -σ ₃) ε ₁ [%]
	13	1,889	28,16	1,474	10	175	2,447
	14	1,889	29,91	1,454	50	208	1,808
	16	1,881	30,07	1,446	50	210	2,771
	15	1,736	30,11	1,334	100	292	4,151
RSS	17	1,875	29,18	1,451	10	278	0,544
	20	1,943	24,29	1,563	10	328	0,886
	18	1,893	28,74	1,470	50	352	2,15
	21	1,893	28,03	1,479	50	418	1,525
	19	1,849	29,88	1,424	100	425	2,957
	22	1,885	29,08	1,460	100	449	2,398

Tabelle 5.46: Bruchwerte im Triaxialversuch RSS





RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik

Bettungsmittel	Versuch Nr.	Feuchtdichte p _f [g/cm³]	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ _d [g/cm³]	Seitendruck σ ₃ [kN/m²]	Bruchlast max.(σ ₁ - σ ₃) [kN/m²]	Längsdehnung bei max.(σ ₁ -σ ₃) ε ₁ [%]
	23	1,758	35,53	1,297	10	180	1,216
	24	1,757	36,58	1,286	50	235	2,636
WBM	25	1,736	35,36	1,283	100	303	4,216
	26	1,748	34,84	1,296	10	208	1,614
	27	1,735	35,96	1,276	50	255	2,884
	28	1,743	35,41	1,287	100	318	4,366

Tabelle 5.47: Bruchwerte im Triaxialversuch WBM

Bettungsmittel	Versuch Nr.	Trockendichte ρ _d [g/cm³]	Verdichtungsgrad D _{Pr} [%]	Seitendruck σ ₃ [kN/m²]	Bruchlast max.(σ ₁ - σ ₃) [kN/m²]	Längsdehnung bei max.(σ ₁ -σ ₃) ε ₁ [%]
	29	1,555	82,18	10	88	5,802
	30	1,623	85,80	50	191	5,714
EKB	31	1,679	88,74	100	169	5,775
	32	1,727	91,29	50	450	2,334
	33	1,754	92,70	100	579	2,901
	34	1,729	91,37	150	705	4,236

Tabelle 5.48: Bruchwerte im Triaxialversuch EKB

Bettungsmittel	Versuch Nr.	Trockendichte ρ _d [g/cm³]	Verdichtungsgrad D _{Pr} [%]	Seitendruck σ ₃ [kN/m²]	Bruchlast max.(σ ₁ - σ ₃) [kN/m²]	Längsdehnung bei max.(σ ₁ -σ ₃) ε ₁ [%]
MGM	35	1,956	102	50	318	5,392
	36	1,952	101	50	239	6,881
	37	1,916	100	100	513	6,131
	38	1,940	101	150	734	8,428

Tabelle 5.49: Bruchwerte im Triaxialversuch MGM

Die nachfolgende Tabelle 5.50 enthält die Kennwerte für den Bruchzustand (maximale Deviatorspannung σ_1 - σ_3 und zugehörige Längsdehnung ϵ_1) von KSG [31].





Bettungsmittel	Versuch Nr.	Trockendichte ρ _d [g/cm³]	Verdichtungsgrad D _{Pr} [%]	Seitendruck σ ₃ [kN/m²]	Bruchlast max.(σ ₁ -σ ₃) [kN/m²]	Längsdehnung bei max.(σ ₁ -σ ₃) ε ₁ [%]
	1			50	168	1,95
	2	1,730	93	100	305	2,29
KSG	3			200	562	3,84
	4	1,800	97	50	243	1,22
	5			100	427	1,61
	6			200	736	2,55
	7		100	50	289	1,03
	8	1,860		100	591	1,3
	9			200	848	1,86

Tabelle 5.50 Bruchwerte im Triaxialversuch KSG [31]

Scherparameter

Die Scherparameter der Versuchsserien sind in Tabelle 5.51 zusammengestellt.

Bettungsmittel	Nr.	Verdichtungsgrad D _{Pr} [%]	Reibungswinkel φ[°]	Kohäsion c [kN/m²]
	1	93	34,8	11,8
KSG	2	97	38,3	25,2
	3	100	40,7	25,5
RSS	1	-	35,1	78,0
	2	-	38,9	136,2
WBM	1	-	35,2	86,4
	2	-	33,4	104,8
ЕКВ	1	91	34,1	85,3
	2	85	35,6	14,6
MGM	1	100	44,3	9,5

Tabelle 5.51 Scherparameter aus p-q-Diagramm

Probensteifigkeit

Um repräsentative Steifigkeiten aus den durchgeführten Triaxialversuchen angeben zu können, wurde eine Anpassung des nicht linearen Spannungs-Dehnungsverhaltens der Proben an das elasto-plastische Stoffgesetz durchgeführt. Als repräsentative Steifigkeit der Versuchskurven für den Gebrauchszustand wurde das in der Bodenmechanik be-



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



währte Verfahren, bei dem die Tangentensteifigkeit bei 50% der Bruchlast E_{T50} (max. σ_1 - σ_3) angegeben wird, angewendet. Zusätzlich wurde der ebenfalls gebräuchliche Steifemodul bei 30% der Bruchlast E_{T30} berechnet. Die zeichnerische Herleitung der Steifigkeit E_{T50} und E_{T30} ist in Bild 5.134 dargestellt.



Bild 5.134 Bestimmung des E-Moduls E_{T50} und E_{T30} aus Tangentenneigung

KSG

Für KSG wurden die Steifigkeiten in [31] als Tangentensteifigkeit E_{T50} und E_{T0} berechnet. E_{T0} entspricht der Anfangssteifigkeit im Diagrammursprung. Die berechneten Steifigkeiten aus den Versuchskurven sind in Tabelle 5.52 aufgeführt. Mit zunehmender

Material	Nr.	Trockendichte ₽₫	Wassergehalt w	Verdichtungsgrad D _{Pr}	Probenalter	Seitenspannung	E _{TO}	E _{T50}
		[g/cm³]	[%]	[%]	[d]	[kN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]
KSG	1		5,50	93	-	50	70,0	35,0
	2	1,730			-	100	82,0	41,0
	3				-	200	115,0	69,0
	4	1,800	5,50	97	-	50	69,0	37,0
	5				-	100	94,0	86,0
	6				-	200	196,0	82,0
	7				-	50	86,0	48,0
	8	1,860	5,50	100	-	100	132,0	93,0
	9				-	200	154,0	112,0



Lagerungsdichte wurde ab einem Seitendruck von >50kN/m² eine ausgeprägte Zunahme der Steifigkeit E_{T50} festgestellt, während bei Seitendrücken von 50kN/m² die Lagerungsdichte einen geringen Einfluss auf die Steifigkeit hatte.

In Tabelle 5.53 sind die Steifigkeiten E_{T50} und E_{T30} für die Bettungsmittel RSS, EKB, WBM und MGM aus allen Triaxialversuchen dargestellt.





Matarial	Ma	Trockendichte	Wassergehalt w	Verdichtungsgrad	Probenalter	Seitenspannung	E _{T30}	E ₇₅₀
materiai	NI.	[g/cm ³]	[%]	[%]	[d]	[kN/m²]	[MN/m ²]	[MN/m ²]
	1	1,458	28,16	-	38	10	79,5	51,8
	2	1,454	29,91	-	36	50	96,5	61,2
	3	1,446	30,07	-	43	50	85,3	46,7
	4	1,334	30,11	-	45	100	66,1	33,4
Dee	5	1,451	29,18	-	219	10	156,0	203,6
855	6	1,563	24,29	-	228	10	136,6	127,8
	7	1,470	28,74	-	221	50	65,4	94,2
	8	1,479	28,03	-	240	50	159,0	123,3
	9	1,424	29,88	-	225	100	172,6	99,4
	10	1,460	29,08	-	247	100	182,9	144,7
ЕКВ	1	1,555	18,27	82	-	10	8,0	5,1
	2	1,623	20,00	86	-	50	11,5	6,9
	3	1,679	18,70	89	-	100	23,1	13,8
	4	1,727	14,41	91	-	50	46,9	40,9
	5	1,754	14,26	93	-	100	68,1	56,3
	6	1,729	14,25	91	-	150	73,0	61,1
	1	1,297	35,53	-	38	10	100,3	89,0
	2	1,286	36,58	-	36	50	99,4	58,2
	3	1,283	35,36	-	43	100	110,2	51,3
WBM	4	1,296	34,84	-	200	10	124,6	111,8
	5	1,276	35,96	-	204	50	144,0	144,4
	6	1,287	35,41	-	206	100	135,7	97,3
MGM	1	1,956	1,73	102	-	50	38,9	35,9
	2	1,952	1,96	101	-	50	17,6	11,1
	3	1,916	1,56	100	-	100	62,1	32,2
	4	1,940	1,98	101	-	150	29,4	20,6

Tabelle 5.53 Verformungsmoduln E_{T} aus Triaxialversuchen; RSS, EKB, WBM, MGM

WBM

Die Zunahme der Probensteifigkeit E_{T30} mit zunehmendem Seitendruck ist bei WBM gering ausgeprägt. Die mittlere Steifigkeit bei einem Probenalter von 36 Tagen beträgt 105 MN/m². Die Triaxialversuche nach 200 Tagen an den aus der Leitungszone herausgearbeiteten Proben ergaben nur geringfügig größere Steifigkeiten E_{T30} von im Mittel 135 MN/m². Die Steifigkeiten bei 50% der Bruchlast E_{T50} nahmen nach 36 Tagen hingegen mit zunehmendem Seitendruck ab. Bei einem Seitendruck von 10 kN/m² betrug die Steifigkeit 89 MN/m², während sie 51 MN/m² bei einem Seitendruck von 100 kN/m² betrug. Dieses ungewöhnliche Verhalten kann möglicherweise durch eine Zerstörung der Zementbrücken bei der isotropen Konsolidierung der noch jungen Probe im Triaxialversuch erklärt werden. Ein ähnliches Verhalten wird in [39] beschrieben. Mit zunehmendem Seitendruck σ_3 im Triaxialversuch wurde bei einem mit Zement stabilisierten weichen Ton eine abnehmende Bruchlast q beobachtet. Nach 200 Tagen varierter Zusammenhang zwischen Seitendruck und Probensteifigkeit kann auf Basis weniger Versuche nicht eindeutig hergestellt werden.

Der sich aus den Triaxialversuchen ergebende Reibungswinkel wurde an den 36 Tage alten Proben zu φ = 35,2° ermittelt, der Kohäsionsanteil betrug c= 86,4 kN/m². Die aus der Leitungszone herausgearbeiteten Proben wiesen ein leicht geringeren Reibungswinkel φ = 33,4° und einen höheren Kohäsionsanteil c = 104,8 kN/m² auf.





RSS

Die Ermittlung der Steifigkeiten von RSS war aufgrund nicht unerheblicher Streuungen der Versuchergebnisse schwierig. Im Mittel betrug E_{T50} 48 MN/m² bei 36 Tage alten Proben, tendenziell war hier eine Abnahme der Steifigkeit mit zunehmendem Seitendruck sichtbar. Mit 81 MN/m² im Mittel war die Steifigkeit bei 30 % der Bruchlast E_{T30} ca. 70% größer. Nach 219 Tagen betrug die mittlere Steifigkeit der Proben aus der Leitungszone E_{T50} 131 MN/m². Dies entspricht einer Zunahme von 170% im Vergleich zu den Versuchsergebnissen an 36 Tage alten Proben. Die Steifigkeit bei 30% der Bruchlast E_{T30} stieg mit zunehmendem Seitendruck von 136 MN/m² auf 182 MN/m² an. Die Abnahme der Steifigkeit mit zunehmendem Seitendruck bei den 36 Tage alten Proben kann an den 219 Tage alten Proben somit nicht mehr festgestellt werden. Ein Grund hierfür kann die lange Erhärtungszeit der Proben sein. Die eindeutige Zunahme der Steifigkeit mit der Zeit deutet auf eine ausgeprägte Verfestigung des Bettungsmittels hin.

Auch die Ermittlung der Scherparameter aus dem Triaxialversuch zeigt eine Verfestigung auf. So betrug der Reibungswinkel an den 36 Tage alten Proben 34,8°, die Kohäsion wurde zu c = 80,7 kN/m² ermittelt. Die Versuche an den aus der Leitungszone herausgearbeiteten Proben ergab dagegen einen deutlich höheren Reibungswinkel φ = 38,9° und zudem, wie auch bei WBM festgestellt, einen höheren Kohäsionsanteil c = 136,2 kN/m². Diese Parameter wurden wegen der Streuung der Versuchsergebnisse als Mittelwert aller Versuche ermittelt.

EKB

Bei den aus der Abdeckung der Leitungszone entnommenen Proben mit einem Verdichtungsgrad von D_{Pr}=85% nimmt der Steifemodul E_{T30} mit zunehmendem Seitendruck von 8 auf 23 MN/m² zu. Auch die Steifigkeit bei 50 % der Bruchlast steigt mit zunehmender Überlagerungsspannung von 5 auf 14 MN/m². Um den Einfluss der Lagerungsdichte auf die Steifigkeit zu untersuchen, wurde eine zweite Versuchreihe mit Verdichtungsgrad D_{Pr}=91% durchgeführt. Diese Proben wurden im Labor hergestellt. Bei dieser Reihe wurden 3-4mal so hohe Steifemoduln ermittelt, wobei ebenfalls eine Abhängigkeit der Steifigkeit vom Überlagerungsdruck zu erkennen war. Diese Abhängigkeit ist im Vergleich zu den Kompressionsversuchen viel ausgeprägter. Die ermittelten Verformungsmoduln sind jedoch auch mit D_{Pr}=85% immer noch größer, als die Richtwerte nach [27]. EKB wird dort in die Gruppe G2 (schwachbindige Böden) eingeordnet. Bei einem Verdichtungsgrad von 85 % wird in der Gruppe G2 ein Verformungsmodul E_B von 1,2 MN/m² für die statischen Berechnungen empfohlen.

Die Scherparameter der Proben aus der Leitungszone wurden zu φ = 35,6° und c = 14,6 kN/m² ermittelt. Der Reibungswinkel der im Labor hergestellten Proben betrug φ = 34,1°, allerdings wurde mit c = 85,3 kN/m² ein viel größerer Kohäsionsanteil ermittelt.

Ursache für diese Diskrepanz scheint die unterschiedliche Verdichtungsenergie und folglich Einbaudichte im Großversuchsstand und bei der Herstellung der Probekörper im





Labor zu sein. Möglicherweise wurde auch die Kohäsion aufgrund der Beanspruchungen im Großversuchsstand in Mitleidenschaft gezogen.

MGM

Die ermittelten Steifemoduln E_T streuen sehr stark. Daher kann hier kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Seitendruck und der Steifigkeit der Proben ermittelt werden. E_{T30} nimmt Werte zwischen 18 und 62 MN/m² an, E_{T50} streut zwischen 11 und 35 MN/m². Mit ein Grund hierfür ist die schwierige Probenherstellung. In den Laborversuchen wurde beobachtet, dass das Material eine starke Neigung zur Entmischung beim Einbau zeigt, indem die Feinbestandteile sich am Boden des Probekörpers ablagern und Kiesnester im oberen Teil der Probe verbleiben. Die gewünschte Probendichte konnte einerseits leicht erreicht werden, der homogene Aufbau der Probe hingegen konnte nicht gewährleistet werden. Somit können die Versuchergebnisse abhängig vom Aufbau der Kornmatrix erheblich schwanken. Ähnliche Erscheinungen wurden beim schichtweisen Abtrag der Leitungszone festgestellt (Bild 5.135). In der oberen Bettungsschicht wurden lokale Kiesnester und Ansammlungen von Feinbestandteilen vorgefunden.

Die aus Triaxialversuchen ermittelten Scherparameter von MGM sind ϕ = 44,3° und c = 9,5 kN/m². Dabei tritt die Kohäsion als Gefügewiderstand der Grobkörnung auf.



Bild 5.135 Obere Bettungsschicht MGM ; Ausbau

Vergleich der Steifigkeit der Materialien

In Bild 5.136 sind die aus der Tangentensteifigkeit bei 50% der Bruchlast ermittelten Verformungsmoduln E_{T50} aller Böden dargestellt. Es fällt hier besonders die große Streuung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Einbaudichte oder des Probenalters auf. Das deutlich weichere Verhalten von MGM (obwohl D_{Pr}=100%) sticht hier besonders heraus. Zudem zeigt sich, dass die fließfähigen Verfüllmaterialien Verformungsmoduln in ähnlicher Größenordnung aufweisen. Zum Vergleich sind die im Groß-





versuch mit Hilfe des Messsterns ermittelten Verformungsmoduln im Scheitel des Rohres (Z1) aufgeführt. Es zeigt sich, dass die in Triaxialversuchen ermittelten Verformungsmoduln mit den in situ (nur im Scheitel) festgestellten Steifigkeiten durchaus vergleichbar sind. Die Verformungsmoduln bei 30% der Bruchlast E_{T30} sind bei allen Bettungsmitteln teilweise deutlich größer. Bei WBM hat das Probenalter einen geringeren Einfluss auf die Steifigkeit als bei RSS.





Bild 5.136 Verformungsmodul E_{T50} bei 50% der Bruchlast



Bild 5.137 Verformungsmodul E_{T30} bei 30% der Bruchlast





5.3.4.4 Einaxiale Druckversuche nach DIN 18136

Einaxiale Druckversuche wurden an den fließfähigen Bettungsmitteln nach DIN 18136 durchgeführt. Die Druckfestigkeit von Bodenproben bei unbehinderter Seitendehnung wurde ermittelt. Die Versuche wurden an zylindrischen Proben mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (Stauchungsgeschwindigkeit) durchgeführt.

Die Versuche wurden an 7, 14 und 28 Tage alten Proben, sowie an ca. 200 Tage alten Proben (diese wurden aus der Leitungszone entnommen) durchgeführt. Gemessen wurden jeweils die Vertikalkraft sowie die Zusammendrückung der Probe. Durch die Durchführung der Versuche zu verschiedenen Zeitpunkten nach Herstellung der Proben konnte festgestellt werden, ob die erzielbare Druckfestigkeit zeitabhängig ist, ob die Bettungsmittel Nacherhärten. Zudem wurde aus dem Last-Dehnungsverhalten der einaxialen Druckversuche der E-Modul bei unbehinderter Seitendehnung errechnet.



Bild 5.138 Druck-Stauchungsdiagramm WBM

WBM zeigt eine Zunahme der einaxialen Druckfestigkeit (Bild 5.138) mit der Zeit auf, die jedoch nach Erreichen des Probenalters von 28 Tagen etwa konstant bleibt. Nach 28 Tagen stieg die einaxiale Druckfestigkeit im Vergleich zum Versuch nach sieben Tagen um 50% an, während nach 200 Tagen keine weitere Zunahme zu verzeichnen war. Dies ist ein Indiz dafür, dass nach ca. 28 Tagen keine bedeutsame weitere Nacherhärtung stattfindet.

Nach 28 Tagen stieg bei RSS (Bild 5.139) die einaxiale Druckfestigkeit im Vergleich zum Versuch nach sieben Tagen um ca. 65 % auf 0,25 MN/m² an, nach 229 Tagen wurde die Druckfestigkeit zu 0,48 MN/m² ermittelt, dies entspricht einer Zunahme um das dreifache. RSS zeigt eine deutliche Nacherhärtung auch nach 28 Tagen auf.







Bild 5.139 Druck-Stauchungsdiagramm RSS

Der einaxiale E-Modul E_U wurde aus der Tangentenneigung m an der Druck-Stauchungslinie bei der Hälfte der Bruchlast q_U (Bild 5.140) und zusätzlich bei 30% der Bruchlast bestimmt.



Bild 5.140 Bestimmung des E-Moduls E_U aus Tangentenneigung bei 0,5 q_U

Mit der Steigung der Tangente m errechnet sich E_U zu:

$$E_{U}=\frac{1}{m}$$

Nach 7 und 14 Tagen ergab sich somit ein E_{U50} von 70 MN/m² für WBM. Nach 28 bzw. 200 Tagen betrug der Elastizitätsmodul ca. 110 MN/m². Die Nacherhärtung von RSS





konnte ebenfalls anhand der Berechnung von E_{U50} nachgewiesen werden. Der E-Modul stieg proportional zur einaxialen Druckfestigkeit von 54 MN/m² bei einem Probenalter von 7 Tagen auf 160 MN/m² nach 229 Tagen an.

Material	Versuch Nr.	Trockendichte ^ρ d [g/cm³]	Wassergehalt w [%]	einaxiale Druckfestigkeit q _u [MN/m²]	E-Modul E _{U50} [MN/m²]	E-Modul E _{U30} [MN/m²]
RSS	1	1,443	31,08	0,156	54,3	67,5
	2	1,438	30,69	0,209	80,3	71,5
	3	1,450	29,75	0,257	100,7	119,3
	4	1,517	27,45	0,482	162,6	149,6
WBM	1	1,288	35,54	0,233	71,7	66,6
	2	1,286	36,26	0,304	70,1	105,7
	3	1,291	36,11	0,363	121,5	119,4
	4	1,311	34,98	0,351	107,1	79,7

Tabelle 5.54: E-Modul E_U aus einaxialen Druckversuchen

Die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit mit zunehmendem Probenalter ist für beide Materialien in Bild 5.141 dargestellt.



Bild 5.141 Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit q_u

5.3.4.5 Plattendruckversuche nach DIN 18134

Plattendruckversuche nach DIN 18134 wurden wegen der ungünstigen Geometrie des Kammeraufbaus (fehlendes Widerlager) und des daraus folgenden zeitintensiven Aufbaus des Versuchsgerätes seitens des IKT nicht durchgeführt. Der Aufwand stand nicht im vernünftigen Einklang mit den zu erwartenden Erkenntnissen aus diesen Versuchen.





Der Lasteinflussbereich eines Standard-Lastplattendruckversuchs beträgt ca. das 1,5 bis 2-fache des Plattendurchmessers. Bei einem Durchmesser von d=30cm ist dies 45 bis 60cm. Da sowohl die obere Bettungsschicht als auch die Abdeckung der Leitungszone eine Mächtigkeit von nur 25cm aufwiesen, waren eindeutige bettungsmittelspezifische Aussagen nicht wahrscheinlich. So konnte man in der oberen Bettungsschicht lediglich einen Verformungsmodul ermitteln, der sich aus der Kombination von Bettungsmittel und umgebendem Verfüllmaterial einstellen würde, wobei der jeweilige Anteil unklar wäre. In der Abdeckung war keine Messung sinnvoll. Zentrisch, in Längsrichtung der Rohrachse, hätte der Rohrstrang im Einflussbereich der Messung undefinierbare Messergebnisse bewirkt, oberhalb der Seitenverfüllung war der Randeinfluss der Spunddielen nicht quantifizierbar. Vielmehr könnten nur vergleichende Aussagen zwischen den Bettungsmitteln getroffen werden. Aus diesem Grund, d.h. um vergleichende und nicht qualitative Aussagen zu treffen, wurden Versuche an der oberen Bettungsschicht mit der dynamischen Lastplatte durchgeführt.

In Bild 5.142 ist der dynamische Verformungsmodul E_{vd} [40] des Verfüllmaterials in der Grabensohle aller Leitungszonen vor Einbau der Bettungsmittel dargestellt.



Bild 5.142 dyn. Verformungsmodul E_{vd} Grabensohle; Material Kies-Sand-Gemisch

Im Mittel wurde E_{vd} zu 30 MN/m² ermittelt. Das Verformungsverhalten der Grabensohle war nach Bild 5.142 in allen Kammern vergleichbar. Aus E_{vd} wurde der Verformungsmodul der Widerbelastung E_{v2} gemäß [40] errechnet. Demnach kann für das vorliegende Verfüllmaterial (Sand-Kies-Gemisch) folgende Umrechnung angewendet werden:

$$E_{v2} = 2 \cdot E_{vd}$$

Somit ergaben sich abgeleitete Verformungsmoduln von im Mittel 60 MN/m² in der Grabensohle. Als Qualitätskriterium wurde ein Grenzwert von $E_{v2}>45$ MN/m² gemäß [41] festgelegt. Dieser Grenzwert wurde in allen Kammern eingehalten.





Bild 5.143 dyn. Verformungsmodul E_{vd} obere Bettungsschicht; KSG, EKB, MGM

In Bild 5.143 ist der dynamische Verformungsmodul E_{vd} in der oberen Bettungsschicht der Bettungsmittel KSG, EKB und MGM dargestellt. Für KSG wurde ein mittleres E_{vd} von 34 MN/m² gemessen, dies entspricht einem E_{v2} von ca. 68 MN/m². Die Proctordichte der oberen Bettungsschicht wurde in Densitometerversuchen zu D_{Pr} =100% ermittelt (Abschnitt 5.3.4.1). Mit E_{vd} =26,4 MN/m² wurde bei EKB der geringste Verformungsmodul gemessen. Die korrespondierende Proctordichte betrug im Mittel D_{Pr} =93%. Der höchste E_{vd} mit 42,8 MN/m² wurde bei MGM ermittelt. In der oberen Bettungsschicht wurde die Proctordichte im Mittel zu D_{Pr} =105% ermittelt.

Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche ließ sich keine Korrelation zwischen E_{vd} und E_{v2} der Bettungsmittel EKB und MGM durchführen. Die Versuchsergebnisse reichen jedoch für einen qualitativen Vergleich der Bettungsmittel.

Danach wurde der größte Verformungsmodul E_{v2} von MGM mit ca. 85 MN/m² gefolgt vom KSG mit einem E_{v2} von ca. 68MN/m² ermittelt. Die niedrigsten Werte wurden mit ca. E_{v2} =53 MN/m² beim EKB ermittelt.

Im Verlauf der Versuchsreihe wurden fortlaufend Versuche mit der dynamischen Lastplatte in der Überdeckung der Leitungsgräben durchgeführt. Im Mittel wurde in allen Kammern ein E_{vd} =30 MN/m² festgestellt, die korrespondierende Proctordichte lag im Durchschnitt bei D_{Pr}=100%. Die Verhältnisse in der Überdeckung waren somit vergleichbar.

5.3.4.6 Rammsondierungen nach DIN 4094

Nach Ziehen der Spunddielen wurden Rammsondierungen nach DIN 4094 von der Oberkante der Überdeckung durch die Seitenverfüllung durchgeführt, nicht primär um Auflockerungen durch Ziehen des Verbaus nachzuweisen, sondern um die Bettungsmittel untereinander zu vergleichen. Es wurde eine leichte Rammsonde mit Sondierspit-





zenquerschnitt von 5cm² und Durchmesser der Spitze von 2,52 cm eingesetzt. Die Gestängeabschnitte betrugen 1m.



Bild 5.144 Rammdiagramm KSG, RSS, WBM

Der Eindringwiderstand im KSG war sehr gering, die Anzahl der Schläge je 10 cm Eindringtiefe betrugen sowohl in der Überdeckung, als auch in der Seitenverfüllung der Leitungszone nur 3-5 Schläge. In der Überdeckung der fließfähigen Bettungsmittel wurden ebenfalls nur 3-5 Schläge aufgezeichnet. In der Leitungszone stieg die Schlagzahl jedoch sprunghaft an. RSS wurde mit einer Schlagzahl von 15 Schlägen im Mittel durchörtert, der Spitzenwert betrug 22 Schläge. Die mittlere Schlagzahl des WBM war mit 22 Schlägen größer, der Spitzenwert betrug 28 Schläge. Die Rammsondierung von EKB ergibt in der Überdeckung ebenfalls lediglich 3-5 Schläge, beim Erreichen der Leitungszone fallen die Schlagzahlen allerdings eindeutig ab, die kleinste Schlagzahl beträgt 1. Bei MGM (Bild 5.145) wurden in der Überdeckung leicht höhere Schlagzahlen von 5-6 Schlägen festgestellt. In der Leitungszone wurden im Mittel 7-8 Schläge benötigt. Aus den Densitometerversuchen wurde in der Nähe der Rammsondierung beim Rückbau der Verfüllung eine D_{Pr} von 96% festgestellt. Nach [42] besteht eine Korrelation zwischen Schlagzahl und Verdichtungsgrad D_{Pr}. Hiernach beträgt die Proctordichte für einen Überlagerungsdruck von 25-50 kN/m² 96-99%. Diese Werte stimmen mit den Ergebnissen der Densitometerversuche während des schichtweisen Abtrags relativ gut überein. Die in [42] angegebene Korrelation zwischen dem Verdichtungsgrad und dem Verformungsmodul E_v wird durch die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus nicht bestätigt. Mit dem in situ ermittelten Verdichtungsgrad D_{Pr}=96% korreliert nach [42] ein Verformungsmodul von 10-14 MN/m², während die Messsternversuche im Kämpferbereich nach Ziehen des Verbaus nur ein Ev1 von 2-3 MN/m² ergeben. Der Wert aus [42] konnte jedoch mit Hilfe des Messsterns während des Einbauzustandes in Phase 1 (Einbaudichte D_{Pr}=100%) in den Kämpfern nachgewiesen werden. Die Korrelation der Schlagzahl mit dem Verformungsmodul ist insbesondere wegen der beobachte-





ten Tendenz zur Separation der Kornfraktionen (Abschnitt 5.3.4.3) zu hinterfragen. In allen Kammern stieg die Schlagzahl nach Durchörterung der Leitungszone im Sand-Kies-Gemisch an. Bis auf Kammer 3 mit EKB, wo Schlagzahlen von 15 Schlägen festgestellt wurden, lagen in den restlichen Kammern die Schlagzahlen unterhalb der Leitungszone bei ca. 10 Schlägen. DIN 4094 gibt lediglich einen Zusammenhang zwischen Schlagzahl n₁₀ der DPL-5 und der Lagerungsdichte D bzw. der bezogenen Lagerungsdichte I_D für einen enggestuften Sand SE mit einer Ungleichförmigkeitszahl U<3 an.



Bild 5.145 Rammdiagramm EKB, MGM

Das hier verwendete Sand-Kies-Gemisch weist jedoch eine Ungleichförmigkeitszahl von U>4 auf. Der in der DIN 4094 angegebene Zusammenhang zwischen Schlagzahl und Lagerungsdichte ist demnach hier nicht anwendbar. Die Schlagzahlen in der Überdeckung können teilweise im niedrigen Wassergehalt des Sand-Kies-Gemisches begründet sein. Da die Schlagzahlen unterhalb der Leitungszone sprunghaft ansteigen, ist davon auszugehen, dass das Ziehen der Spunddielen Auflockerungen bewirkt hat, die zu diesen niedrigen Schlagzahlen führen.



Bild 5.146 Rammsondierungsspur





5.3.5 Bodenspannungen mit Erddruckgebern

Während der Versuche wurden ca. 1 m über dem Rohrscheitel die Bodenspannungen mit zwei Erdruckgebern aufgenommen (vgl. Bild 5.30). Der Mittelwert dieser Messwerte kann herangezogen werden, um Einflüsse der einzelnen Versuchsphasen auf die Bodenspannungen im einheitlich hergestellten Überdeckungsbereich zu erkennen. Auch bieten sie ggf. eine Orientierungshilfe für weitergehende Vergleichsrechnungen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Langzeiteffekte lassen sich mit der eingesetzten Messtechnik allerdings nicht zuverlässig bestimmen, so dass die Messdaten im Folgenden nur phasenbezogen und qualitativ ausgewertet werden.

Ebenso darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Steifigkeit der eingebauten Erddruckmessdosen nicht der Steifigkeit des umgebenden Mediums angepasst ist. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass die Erddruckgeber Last auf sich ziehen und Werte anzeigen, die nicht unbedingt mit den Spannungen in dem umgebenden Medium übereinstimmen.

Bild 5.147 zeigt den Verlauf der Erddrücke vor, während und unmittelbar nach dem Ziehen der Leichtprofile. Der Anfangswert bei t = 0 entspricht dem Erddruck nach Abschluss des Einbaus (Phase 1). Nach dem Ziehen der Leichtprofile (Phase 2) war in allen Kammern, insbesondere bei KSG und EKB, ein deutlicher Anstieg des Erddrucks festzustellen.



Bild 5.147 Mittelwerte der Eddruckgeber über dem Rohr in den fünf Kammern [mbar] (Phase 2: Dielenziehen)

Bild 5.148 zeigt die Spannungsverläufe während der zyklischen und statischen Belastungen in Phase 3. Grundsätzlich sinkt der Erddruck nach Abschluss dieser Belastungen wieder auf das Ursprungsniveau ab. Lediglich bei EKB zeigt sich eine weitergehen-





de Entlastung der Bodenspannungen im Messhorizont, so dass schließlich geringere Spannungen als vor der Belastungsphase zu verzeichnen sind.



Bild 5.148 Mittelwerte der Eddruckgeber über dem Rohr in den fünf Kammern [mbar] (Phase 3: Zyklische und statische Belastung)



Bild 5.149 Mittelwerte der Eddruckgeber über dem Rohr in den fünf Kammern [mbar] (Phase 5: Absenkung)

Im Rahmen der Grundwassersimulation zeigten sich in allen Kammern nur geringfügige Spannungsänderungen, so dass hier auf eine Darstellung verzichtet wird. Infolge der Absenkung der Druckkissen (Phase 5) konnten in allen Kammern, insbesondere bei MGM und KSG, deutliche Spannungsrückgänge festgestellt werden (Bild 5.149). Man




kann aus diesen Messungen qualitative Schlussfolgerungen ableiten, wobei festzuhalten ist, dass MGM und KSG relativ empfindlicher reagieren auf Geländesenkungen als die anderen Materialien.

5.3.6 Lageabweichungen

Zur Messung der vertikalen Lageabweichungen wurde im Zuge des veränderten Versuchskonzepts (vgl. Abschnitt 5.1) auf eine Messbrücke mit Wegaufnehmern seitens des IKT verzichtet und eine Druckdifferenzmessung zur Höhenbestimmung eingesetzt. Hierzu wurde ein Druckschlauch in der Rohrsohle fixiert, mit Wasser gefüllt und anschließend ein Druckgeber zur Messwertaufnahme hindurchgezogen. Die so gewonnenen Messdaten zeigten allerdings erhebliche Schwankungen, so dass das Messverfahren im vorliegenden Anwendungsfall keine ausreichende Genauigkeit erzielte. Auf eine weitergehende Auswertung und Interpretation wurde daher verzichtet.

5.3.7 Folienmessungen

Um Informationen über die Verteilung der Kontaktspannungen im Zwickelbereich der Versuchrohre zu erhalten, wurde in jeder Kammer ein Rohr im Sohlbereich (\pm 45°) mit Druckmessfolien bestückt (Bild 5.27). Im Ergebnis lagen Spannungsverteilungen vor, welche das grundsätzliche Verhalten der unterschiedlichen Bettungsmaterialien in bzw. nach Abschluss der jeweiligen Versuchsphase charakterisieren. Da die Folien nach dem Einbau nicht kalibriert werden konnten, sind die Ergebnisse nur qualitativ zu verstehen. Diese Betrachtungsweise reicht allerdings für den Zweck der Untersuchung aus.

Bild 5.150 zeigt die nach Abschluss der Phase 1 (Einbau) aufgenommenen Spannungsverteilungen im Auflagerbereich der Versuchsrohre. Bei den Schüttgütern (KSG, MGM, EKB) waren deutliche Spannungskonzentrationen zu erkennen, mit Einzelwerten über 0.5 N/mm². Bei Lagerung in RSS und WBM zeigte sich eine gleichmäßige Verteilung ohne bedeutsame Spannungsspitzen. Infolge des Ziehens der Leichtprofile waren bei den Schüttgütern wiederum deutliche Spannungskonzentrationen bzw. erhöhungen im Auflagerbereich festzustellen (Bild 5.151). Besonders ausgeprägt war dieses Verhalten bei EKB. Bei RSS und WBM kam es nur zu vergleichsweise geringen Kontaktspannungserhöhungen. Nach Abschluss der zyklischen und statischen Belastungen (Phase 3, vgl. Bild 5.152) zeigten sich kaum Veränderungen in den Auflagerspannungen. Durch Absenkung der Druckkissen in der Phase 5 fielen in allen Kammern die Kontaktspannungen nahezu vollständig ab (Bild 5.153). Hinsichtlich der gleichmäßigen Spannungsverteilung am Rohrumfang für alle Belastungssituationen zeichneten sich RSS und WBM aus. Danach zeigten KSG und MGM ein verhältnismäßig gleichmäßiges Bettungsverhalten. Sehr ungleichmäßige Spannungsverteilungen wurden beim EKB festgestellt. Im Gesamtblick bestätigten auch die Druckfolienmessungen das unterschiedliche Verhalten von Schüttgütern und fließfähigen Verfüllmaterialien in den Belastungssituationen des Großversuchs.







Bild 5.150 Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase I (Einbau)



Bild 5.151 Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase 2 (Dielenziehen)







Zwickel LinksRohrsohleZwickel RechtsBild 5.152Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase 3 (Belastung)



Bild 5.153 Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase 5 (Senkung); vertikale Streifen (WBM, RSS) aus fehlerhaften Signalen des Messsystems



6 Versuchsauswertung und Bewertung der Bettungsmaterialien

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche im Maßstab 1:1 vergleichend gegenübergestellt, um die Bettung der Rohre zu beurteilen. Hierbei werden insbesondere die Ergebnisse der Versuche mit dem neuartigen Messstern und die Dehnungsmessungen direkt am Rohr berücksichtigt.

6.1 Einbauzustand

KSG

Während des Einbaus des Bettungsmittels wurden Densitometerversuche in der oberen Bettungsschicht, in den Kämpfern sowie in der Abdeckung der Leitungszone durchgeführt. Im Mittel wurde eine Proctordichte von 100% festgestellt. Somit kann von einer gleichmäßigen Verdichtung in diesen Bereichen ausgegangen werden.

Die Versuchsergebnisse des Einbauzustandes (Phase1) lassen jedoch auf eine ungleichmäßige Bettung des Rohrstrangs schließen. So wurden anhand der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus ungleichmäßige Verformungs- und Bettungsmoduln am Rohrumfang ermittelt. Die ermittelten Verformungsmoduln waren im Scheitel mit 65 MN/m² am größten, in den Kämpfern wurden beidseitig ca. 40 MN/m² ermittelt. In den aus der Praxis bekannten Problembereichen, den Zwickeln eines Rohres, war die Bettung mangelhaft. So wurden an den Messstellen beiderseits des Rohres unterschiedliche Moduln festgestellt, rechts (Z3) 13 MN/m² und links (Z4) nur 7 MN/m².



Bild 6.1 Rohrverformung in Umfangsrichtung KSG im Einbauzustand

Die Dehnungsmessungen (Bild 6.1) bestätigen dieses Bild. Die Dehnungen am Rohrumfang sind ungleichförmig, so werden in der Außenrandfaser des Kämpfers mit





135 μ m/m die größten Dehnungen gemessen, während in der Sohle 71 μ m/m aufgezeichnet wurden (Ovalisierung). In den Zwickeln werden ebenfalls unterschiedliche Dehnungen gemessen. Im Zwickel rechts (Z3) werden an der Innenrandfaser des Rohres mit 90 μ m/m dreimal so hohe Dehnungen ermittelt, wie im gegenüberliegenden Zwickel mit 30 μ m/m.

Auch die Folienmessungen (Bild 5.150) deuten auf eine ungleichmäßige Bettung hin, so sind Spannungskonzentrationen in der Rohrsohle zu erkennen. Die ungleichmäßige Bettung in den Zwickeln, kann hier ebenfalls tendenziell nachvollzogen werden. Sowohl die absoluten Kontaktspannungen als auch die geometrische Ausdehnung sind im rechten Zwickel größer.

RSS

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus, 7 Tage nach Verfüllung der Leitungszone, lassen auf eine gleichmäßige Bettung des Rohres schließen. Bis auf einen Messwert im Zwickel links (Z4) beträgt der mittlere Verformungsmodul an allen Messstellen 50 MN/m². Nach 28 Tagen bestätigt sich die gleichmäßige Bettung des Rohres, die Anfangssteifgkeit liegt im Mittel bei 110 MN/m² an allen Messstellen, unter Beachtung des gesamten Belastungspfades wurde im Mittel der Verformungsmodul E_{v1} zu 55



Bild 6.2 Rohrverformung in Umfangsrichtung RSS im Einbauzustand

 MN/m^2 bestimmt. Die Dehnungsmessungen (Bild 6.2) bestätigen die gleichmäßige Bettung. Die Dehnungen im Scheitel, in den Zwickeln und in der Sohle liegen in der gleichen Größenordnung (im Mittel 100µm/m), ebenso ist die Stauchung in beiden Kämpfern des Rohres identisch.

Die Folienmessungen (Bild 5.150) deuten auf eine gleichmäßige Spannungsverteilung mit gleichmäßigen Kontaktspannungen in den Zwickeln hin.





EKB

Die Densitometerversuche während des Einbaus ergaben variierend Proctordichten zwischen 85 und 93%, da sich die Verdichtung des Materials als schwierig herausstellte.

Da das Bettungsmittel der Belastung der Lastplatten nur geringen Widerstand entgegen setzen konnte und die Belastungspfade dementsprechend sehr kurz sind, sollten die ermittelten Verformungsmoduln (Anfangssteifigkeit) vorsichtig bewertet werden. Jedoch ist ein Vergleich der Messstellen untereinander insbesondere in Kombination mit den Erkenntnissen der Dehnungsmessungen zulässig. Die ermittelten Verformungsmoduln streuen sehr stark zwischen 40 MN/m² im Scheitel (Z1) und 14 MN/m² im rechten Zwickel (Z3). In den Kämpfern wurden ebenso unterschiedliche Steifigkeiten E_{v1} ermittelt, rechts (Z2) 15 MN/m² und links (Z5) 28 MN/m². Im linken Zwickel (Z4) konnte an der Messstelle keinerlei Bettung festgestellt werden, hier war die Zwickelverdichtung offensichtlich mangelhaft. Aus diesen Ergebnissen wird eine ungleichmäßige Bettung des Rohres abgeleitet, die besonders im Zwickelbereich fehlerhaft ist.



Bild 6.3 Rohrverformung in Umfangsrichtung EKB im Einbauzustand

Die ungleichmäßige Bettung des Rohres wird durch die Dehnungsmessungen (Bild 6.3) bestätigt. In den Zwickeln liegt keine symmetrische Dehnung vor, im linken Zwickel sind die Dehnungen um den Faktor 2 größer. Die größten Dehnungen sind in der Rohrsohle zu verzeichnen. In den Kämpfern sind die Dehnungen ebenfalls nicht symmetrisch, die Stauchung im linken Kämpfer ist größer als im gegenüberliegenden. Dies bestätigt die Ergebnisse des Messsterns. Der unstetige Verlauf der Dehnungen über die Zeit lässt zudem auf Kriecheinflüsse oder Strukturveränderungen im Material schließen, da z.B. die Dehnung in der Rohrsohle im Verlauf der Messung zunimmt. Die Folienmessungen





(Bild 5.150) zeigen bei EKB tendenziell Spannungskonzentrationen in der Nähe der Rohrsohle auf und bestätigen die vorangegangenen Messdaten.

WBM

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus, 7 Tage nach Verfüllung der Leitungszone, ergeben Verformungsmoduln von i.M. 95 MN/m², die Messstelle im linken Kämpfer fällt mit 47 MN/m² aus der Reihe aus. Nach 28 Tagen sind die ermittelten Verformungsmoduln geringfügig größer, im Mittel ist E_{v1} =105 MN/m². Auch hier wird im linken Kämpfer mit 57MN/m² der kleinste Verformungsmodul ermittelt. Bei der Berechnung der Anfangssteifigkeit ist die Größenordnung an allen Messstellen mit i.M. 120 MN/m² vergleichbar. Diese Messergebnisse belegen eine gleichmäßige Bettung des Rohres. Der Bettungsmodul k_s beträgt im Schnitt 151 MN/m³.

Die DMS Messungen belegen die gleichmäßige Bettung des Rohres (Bild 6.4). Sowohl in den Kämpfern als auch in den Zwickeln ist eine symmetrische Verformung festzustellen. Die Verformungen im Scheitel und in der Rohrsohle haben die gleiche Größenordnung. Zudem sind die Dehnungen mit 50 μ m/m sehr gering.



Bild 6.4 Rohrverformung in Umfangsrichtung WBM im Einbauzustand

Die Folienmessungen zeigen keine Spannungskonzentrationen in den Zwickelbereichen auf, somit kann die Spannungsverteilung als gleichmäßig angesehen werden.

MGM

Während des Einbaus von MGM ergab die Kontrolle der Dichte des Bettungsmittels mit Densitometerversuchen durchgehend Proctordichten >100%. Die Last-Setzungs-Linien der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen eine ungleichmäßige Bettung des Rohres und sind vom Verlauf ähnlich mit den Last-Setzungs-Linien von KSG. Die Durchführung der Versuche gestaltete sich wie bei EKB schwierig, da bereits gerin-





ge Lasten zu großen Wegen der Lastplatte führten, das Material somit entgegen den Erwartungen sehr weich auf die Belastung durch die Zylinderkolben reagierte. Jedoch lassen die Messergebnisse auf eine ungleichmäßige Bettung des Rohres schließen. Die Anfangssteifigkeit hat im Scheitel mit 58 MN/m² ihr Maximum, in den Kämpfern werden 16 MN/m² und in den Zwickeln 2-7 MN/m² ermittelt. Der Bettungsmodul k_s variiert dementsprechend zwischen 100 MN/m³ im Scheitel, 28 MN/m³ in den Kämpfern und minimal 4 MN/m³ im linken Zwickel (Z4).



Bild 6.5 Rohrverformung in Umfangsrichtung MGM im Einbauzustand

Die DMS-Messung lässt ebenfalls die ungleichmäßige Bettung des Rohres erkennen (Bild 6.5). Im linken Zwickel wird mit 27 μ m/m eine um den Faktor 3 größere Dehnung aufgezeichnet als im gegenüberliegenden Zwickel, wo eine minimale Stauchung der inneren Rohrrandfaser zu erkennen ist. In den Kämpfern hingegen treten nahezu symmetrische Dehnungen auf. Die größten Dehnungen werden im Rohrscheitel verzeichnet. Die Folienmessung zeigt deutliche Spannungskonzentrationen in der Rohrsohle, die zu den Zwickeln abnehmen und somit die schlechte Bettung in den Zwickelbereichen belegen.

Vergleichende Bewertung der Materialien im Einbauzustand

Die Messungen während des Einbauzustandes (Phase1) zeigen bereits deutliche Unterschiede im Bettungsverhalten der Materialien auf. So ist die Bettung der Rohre durch die fließfähigen Verfüllmaterialien sehr gleichmäßig, in den Zwickelbereichen sind keine Bettungsausfälle durch z.B. fehlerhafte Verdichtung aufgetreten. Der Unterschied zwischen WBM und RSS liegt hinsichtlich des Bettungsverhaltens primär in der Steifigkeit des Materials. Beachtet man die unterschiedlichen Zuschlagsstoffe, Recyclingmaterial bei WBM und aufbereiteter bindiger Boden bei RSS, die schon aufgrund ihrer Korn-



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



struktur und Matrix unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen, können die unterschiedlichen Steifigkeiten hiermit begründet werden. Der Einfluß der Zugabemenge des Stabilisators (Zement) auf die Steifigkeit des Endproduktes ist dabei noch nicht geklärt. Durch die höhere Bettungssteifigkeit von WBM treten hier auch die kleinsten Dehnungen und somit Rohrbeanspruchungen auf.

Das Bettungsverhalten der Schüttgüter war durchgehend ungleichförmig. Die aus der Praxis bekannten Probleme der Verdichtung der Zwickelbereiche, treten im Großversuchsstand ebenfalls auf. Bei allen Schüttgütern ergeben die Lastplattendruckversuche im Zwickel jeweils links und rechts unterschiedliche Verformungs- und Bettungsmoduln. Die betragsmäßig größten Dehnungen (Rohrbeanspruchungen) treten bei EKB auf, die geringsten bei MGM.

Betrachtet man die Maximalwerte der Rohrdehnungen bei allen Bettungsmitteln und berechnet daraus die Rohrspannungen, so zeigt sich allerdings, dass mit den Randbedingungen des Großversuchsstands, die Unterschiede in der tatsächlichen Rohrbeanspruchung während des Einbauzustands nicht signifikant groß sind.

In Tabelle 6.1 werden die untersuchten Bettungsmittel hinsichtlich der zentralen Fragestellung, ob sie im Versuch eine gleichmäßige Bettung des Rohrstrangs gewährleisten konnten, vergleichend gegenübergestellt. Dabei werden folgende Bewertungen angewendet:

- ++ gleichmäßige Bettung
- + gleichmäßige Bettung mit geringen Variationen
- o ungleichmäßige Bettung, kein Ausfall im Zwickel
- ungleichmäßige Bettung, Ausfall oder große Abweichung im Zwickel
- -- ungleichmäßige Bettung, Ausfall im Zwickel, starke Variation

Zusätzlich wird die Rohrbeanspruchung (Dehnungen) vergleichend bewertet:

- xx geringe Beanspruchung, Symmetrie
- x geringe Beanspruchung, asymmetrisch
- hohe Beanspruchung

Material	Einbauzustand (Phase 1)		
Material	Bettung	Rohrbeanspruchung	
KSG	-	Х	
RSS	++	XX	
EKB		Х	
WBM	++	XX	
MGM	-	Х	

Tabelle 6.1 Bewertung Bettungseigenschaften Phase 1





6.2 Ziehen der Spunddielen

KSG

Das Ziehen der Spunddielen bewirkt eine Auflockerung in der Leitungszone. In den Kämpfern tritt eine neue Erstbelastung auf (Bild 5.57), die Last-Setzungs-Linie folgt nicht dem Entlastungspfad der vorangegangenen Messung während des Einbauzustandes. Der neue Erstbelastungsmodul ist im Vergleich zur vorhergehenden Messung kleiner. Dabei wird im linken Kämpfer (Z5) die größere Reduktion verzeichnet, hier fällt der Erstbelastungsmodul um 60%, während an der Messstelle rechts (Z2) eine Reduktion von 36% ermittelt wird. Auch in den Zwickeln ändert sich die Bettung des Rohres, wobei die Auflockerung ebenfalls an der Messstelle links vom Rohr (Z4) größer ist. Die unterschiedliche Entfestigung rechts und links vom Rohr kann auf die Reihenfolge des Ziehens des Verbaus zurückgeführt werden, da hierbei zuerst die rechte Seite gezogen wurde. Die geringste Auflockerung tritt an der Messstelle im Scheitel des Rohres auf, die Belastung folgt größtenteils dem Wiederbelastungspfad.



Bild 6.6 Rohrverformung in Umfangsrichtung KSG nach Ziehen der Spunddielen

Der Bettungsverlust wird von den Dehnungsmessungen ebenfalls bestätigt. In Bild 6.6 ist ein Dehnungszuwachs von 280% an der Randinnenfaser der Rohrsohle (180°-I) zu erkennen, sowie eine Erhöhung der Rohrbelastung an allen übrigen Messstellen. Ein Zuwachs dieser Größenordnung wird durch einen Anstieg der Belastung der Rohrsohle verursacht. Der Abminderung der Bettung in den Kämpfern ist anhand der Dehnungsmessungen ebenfalls nachzuweisen. Hierbei fällt insbesondere die geringere Zunahme der Dehnung im linken Zwickel im Vergleich zum rechten Zwickel auf. Dies bestätigt erneut die während des Einbauzustandes festgestellte unsymmetrische Bettung des Rohres. Durch den größeren Dehnungszuwachs im rechten Zwickel kann in Verbindung





mit den Ergebnissen der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus davon ausgegangen werden, dass das Rohr auf der rechten Seite eine bessere Bettung erfährt.

Die Folienmessungen nach Ziehen der Spunddielen (Bild 5.151) zeigen eine deutliche Erhöhung der Kontaktspannungen in der Rohrsohle. Die Spannungen sind hier zudem auf der rechten Seite des Rohres über eine größere Fläche verteilt. Dies bestätigt die aus den o.g. Messungen abgeleitete unsymmetrische Lagerung des Rohres.

Eine weitere Folge des Ziehens der Spunddielen ist die Erhöhung des Erddrucks oberhalb des Rohres (Bild 5.147) von ca. 40 kN/m² vor dem Ziehen auf etwa 60 KN/m². Dabei entspricht die Erddruckbelastung vorher in etwa der Belastung aus der Überlagerung. Dieser Anstieg kann nur durch die Weckung des passiven Erddrucks entstehen. Dabei kann die Überdeckung der Leitungszone infolge des Ziehens des Verbaus seitlich des Rohres absacken, das Rohr umfließen, während in der Mitte der Leitungszone der Rohrstrang ein Absacken verhindert und sich somit passiver Erddruck oberhalb der Rohrlängsachse einstellt.

RSS

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen, dass das Ziehen der Spunddielen keine Auswirkung auf die Bettung des Rohres hat. Alle Last-Setzungs-Linien befinden sich auf dem Wiederbelastungsast. Lediglich im Scheitel des Rohres wird eine leichte Erhöhung des Drucks im Hydraulikzylinder festgestellt. Die Dehnungsmessungen bestätigen die Ergebnisse der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus. Es sind kaum Änderungen der Dehnungen aufgetreten. Die Folienmessungen lassen auf eine weiterhin gleichmäßige Kontaktspannung in den Zwickeln schließen. Auch der Anstieg des Erddrucks oberhalb der Leitungszone fällt im Vergleich zu KSG eindeutig geringer aus (Bild 5.151), da die Überdeckung nicht in gleichem Maße seitlich des Rohres absacken konnte.

Insgesamt ist die Auswirkung des Ziehens der Spunddielen auf das Bettungsverhalten als sehr gering einzustufen, RSS ist in dieser Hinsicht positiv zu bewerten.

EKB

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus lassen auf eine Auflockerung in der Leitungszone schließen. Insbesondere im linken Kämpfer (Z5) und im Zwickel rechts (Z3) wird eine Reduktion des Verformungsmoduls festgestellt. Im rechten Kämpfer (Z2) folgt die Last-Setzungs-Linie zunächst dem Wiederbelastungsast, bevor das Material der Belastung keinen weiteren Widerstand entgegensetzt. Somit wird auch in diesem Kämpfer eine Auflockerung vermutet. Im Scheitel wird die Belastung auf dem Wiederbelastungsast durchgeführt, hier ist keine Änderung der Bettung aufgetreten. Nach Ziehen des Verbaus fällt der erhöhte Duck in den Hydraulikzylindern im Scheitel und im Zwickel vor Durchführung der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus auf.





Die Auflockerung und damit verbundene Änderung der Rohrbettung wird durch die Dehnungsmessungen (Bild 6.7) bestätigt. Der größte Dehnungszuwachs und auch die größte Dehnung treten in der der Rohrsohle auf. Dies lässt auf eine Bettung mit sehr geringem Auflagerwinkel schließen. Bei diesem Bettungsmittel treten auch die betragsmäßig größten Dehnungen auf. Auffällig ist, dass nun die Dehnungen in den Zwickeln links und rechts identisch sind.



Bild 6.7 Rohrverformung in Umfangsrichtung EKB nach Ziehen der Spunddielen

Die vor dem Ziehen der Spunddielen festgestellte unsymmetrische Lagerung ist durch die Auflockerung im zunächst besser verdichteten rechten Zwickel nicht mehr vorhanden. Auch die sehr kleinen Absolutwerte der Dehnung in den Zwickeln deuten auf die fehlende Bettung in diesen Bereichen. Die Stauchungen in den Kämpfern links und rechts sind gleich groß und nehmen infolge des Ziehens des Verbaus um das 1,5 fache zu. Die Lastkonzentration in der Rohrsohle lässt sich anhand der Folienmessung (Bild 5.151) ebenfalls nachweisen. Hier sind bei EKB deutliche Erhöhungen der Kontaktspannungen in Nähe der Rohrsohle aufgetreten. Der Erddruck oberhalb der Leitungszone steigt infolge des Ziehens der Spunddielen um ca. 70% an, der Zuwachs ist betragsmäßig etwa gleich groß wie bei dem Bettungsmittel KSG.

WBM

Wie bei RSS ist anhand der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus keine Veränderung der Bettung des Rohres nachzuweisen. Dies wird durch die Dehnungsmessungen bestätigt, hier sind kaum Änderungen der Dehnungen des Rohres zu erkennen. Auch die Folienmessungen lassen auf eine weiterhin gleichmäßige Bettung schließen. Der Anstieg des Erddrucks oberhalb der Leitungszone ist im Vergleich zu KSG und





EKB deutlich geringer, die Ursache ist wie bei RSS die Behinderung des Absackens der Überdeckung neben dem Rohr.

Insgesamt ist das Bettungsverhalten nach dieser Einbauphase als sehr gut zu bewerten.

MGM

Nur geringfügige Änderungen der ermittelten Steifigkeiten des Bettungsmittels und somit der Bettung treten im Scheitel und in den Zwickeln auf. Die Belastungen verlaufen größtenteils auf den Wiederbelastungspfaden. Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen an diesen Stellen nahezu die gleiche Bettung wie vor dem Ziehen der Spunddielen. Eine deutliche Veränderung der Bettung durch Auflockerung tritt in den Kämpfern der Leitungszone auf. Hier liegt eine neue Erstbelastung vor, die im Vergleich zur Messung während Phase 1 auch mit einem deutlich reduzierten Erstbelastungsmodul von 2 MN/m² einhergeht.



Bild 6.8 Rohrverformung in Umfangsrichtung MGM nach Ziehen der Spunddielen

Ein deutlicher Anstieg der Stauchungen in den Kämpfern des Rohres ist in Bild 6.8 zu erkennen und bestätigt somit die Versuche mit dem Messstern. Die größte Dehnung tritt in der Rohrsohle auf. Mit einem Zuwachs der Dehnung in der Rohrsohle um das 4fache reagiert MGM am deutlichsten auf das Ziehen der Spunddielen. Weiterhin ist die unsymmetrische Bettung des Rohres anhand der DMS-Messung zu belegen. Die Dehnungen im linken Zwickel sind um den Faktor 3 größer als die Dehnungen im gegenüberliegenden Zwickel des Rohres. Die hohe Dehnung in Rohrsohle ist wie bei den übrigen Schüttgütern auf die schlechte Bettung in den Zwickeln und auf die Auflockerung in den Kämpfern der Leitungszone zurückzuführen. Die Konzentration der Bettung des



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Rohres auf den Bereich der Rohrsohle wird anhand der Folienmessungen (Bild 5.151) bestätigt, hier zeigt sich die deutliche Erhöhung der Kontaktspannungen in der Rohrsohle. Der Anstieg des Erddrucks oberhalb der Leitungszone ist bei MGM vergleichbar mit dem Anstieg bei RSS, demnach deutlich geringer als bei den beiden anderen Schüttgütern.

Vergleichende Bewertung der Materialien nach Ziehen der SpW

Die bereits während Phase 1 festgestellten Unterschiede im Bettungsverhalten der Materialien setzen sich in Phase 2 fort. Die fließfähigen Bettungsmittel RSS und WBM fallen hierbei positiv auf. Es wird keine Änderung der Bettung festgestellt. Bei den Schüttgütern ist jedoch der Einfluss des Ziehens der Spunddielen sehr deutlich. In den Kämpfern der Leitungszone treten Auflockerungen mit einhergehender Reduktion der Steifigkeit ein. Auch in den Zwickelbereichen sind Auflockerungen aufgetreten. Dies resultiert dann in einer Konzentration der Bettung des Rohres vor allem im Bereich der Rohrsohle, womit sich ein kleiner Auflagerwinkel einstellt. Infolge des Ziehens der Spunddielen und der damit veränderten Bettung nehmen die Rohrbeanspruchungen sehr deutlich zu, wobei in der Rohrsohle der Zuwachs der Dehnungen im Mittel 200-300% beträgt.

In der Reaktion auf das Ziehen des Verbaus sind KSG und MGM vergleichbar. Die größten Rohrbeanspruchungen treten bei EKB auf.

Die Bewertung der Bettung nach Ziehen der Spunddielen kann nicht auf derselben Basis durchgeführt werden, wie die Bewertung des Einbauzustandes. Eine unzureichende Bettung wurde bereits in Phase 1 erfasst, dieser Mangel wirkt sich in den nachfolgenden Versuchsphasen weiterhin aus. In dieser und den nachfolgenden Phasen wird nur der Einfluss der veränderten Randbedingungen (hier Ziehen der Spunddielen) auf die Bettung der Rohre beurteilt. Dabei werden folgende Bewertungen angewendet:

- ++ gleichmäßige Bettung, kein Einfluss
- + gleichmäßige Bettung, geringer Einfluss
- o ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung im Kämpfer
- ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung in Kämpfer und Zwickel
- -- ungleichmäßige Bettung, Ausfall im Zwickel, starke Variation.

Zusätzlich wird die Rohrbeanspruchung (Dehnungen) vergleichend bewertet:

- xx kein/geringer Einfluss
- x Einfluss, mittlere Zunahme
- Einfluss, hohe Zunahme.



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik

Material	Ziehen Spunddielen (Phase 2)		
	Bettung	Rohrbeanspruchung	
KSG	-	-	
RSS	++	XX	
EKB	-	-	
WBM	++	XX	
MGM	0	-	

Tabelle 6.2 Bewertung der Bettungseigenschaften in Phase 2

6.3 Simulation des Ziehens der Verbauwände mit der FE-Methode

Die Simulation des Ziehens der Verbauwände, um den Einfluß der Verbauspur auf die Bettung zu berechnen, wurde mit Hilfe der FE-Methode realisiert. Diese Berechnungen simulieren die genauen Randbedingungen des Großversuchsstandes sowie die Reihenfolge des Ziehens der Verbauwände und basieren auf der Arbeit von Dr. Sherif El Shahid [43], welcher spezielle Kontaktbedingungen für den Vorgang des Ziehens von Verbauwänden simuliert hat. Die Ergebnisse dieser numerischen Untersuchungen, welche vom IKT ausgeführt wurden sind im Anhang A zum vorliegenden Forschungsbericht zusammengestellt.

6.4 Statische und zyklische Belastung

KSG

Nach zyklischer und statischer Belastung an der GOK wird anhand der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus eine erneute Auflockerung im Kämpfer der Leitungszone nachgewiesen, wobei die Last-Setzungslinien im Scheitel und in den Zwickeln dem Wiederbelastungspfad folgen. An diesen Messstellen ist somit keine Veränderung der Bettung des Rohres eingetreten. In den Kämpfern wird ein im Vergleich zur Messung in Phase 2 um 50% reduzierter Erstbelastungsmodul festgestellt.

Die Dehnungsmessungen (Bild 6.9) zeigen einen Zuwachs der Rohrbeanspruchungen, an allen Messstellen nehmen die Dehnungen bleibend zu, d.h. nach Entfernen der Belastung nehmen die Rohrdehnungen nicht wieder ab. Dies deutet auf plastische Deformationen im Bettungsbereich hin. Dabei tritt mit ca. 35% der größte Dehnungszuwachs in den Kämpfern und im Scheitel des Rohres auf. Die Dehnungen in den Zwickelbereichen des Rohres fallen geringer aus. Weiterhin sind die Dehnungen in den Zwickeln und damit die Bettung des Rohres nicht symmetrisch. Die Folienmessung (Bild 5.152) zeigt eine geringe Erhöhung der Kontaktspannungen in Nähe der Rohrsohle an.







Bild 6.9 Rohrverformung in Umfangsrichtung KSG nach zyklischer u. statischer Belastung

RSS

Obwohl aufgrund der zyklischen und statischen Belastung ein Abfall des Hydraulikdrucks und damit der Belastung in allen Hydraulikzylindern auftritt, wird mit den Lastplattendruckversuchen aus dem Rohr heraus keine Veränderung des Verformungsmoduls im Vergleich zur Messung in Phase 1 festgestellt. Anhand dieser Versuche kann keine Änderung der Rohrbettung nach Belastung an der GOK nachgewiesen werden.

Die Dehnungsmessungen zeigen einen geringen, bleibenden Zuwachs der Dehnungen in den Kämpfern und in Rohrsohle, hierbei ist der Zuwachs in der Rohrsohle mit 30% am größten. Die Dehnungen in den Zwickeln sind nahezu symmetrisch. Die Folienmessung weist dagegen auf keine Änderung der Kontaktspannungen im Sohl- und Zwickelbereich hin.

Insgesamt ist der Einfluss der simulierten Verkehrslasten auf die Bettung und Beanspruchung des Rohres sehr klein, das Material wird in dieser Versuchsphase hinsichtlich des Einflusses von Verkehrslasten positiv bewertet.

EKB

Die Ergebnisse der Lastplattendruckversuche deuten auf eine Auflockerung im linken Kämpfer der Leitungszone hin. Hier tritt während des Versuchs eine neue Erstbelastung ein. An den übrigen Messstellen liegt, soweit die Messergebnisse diesen Schluss zulassen, eine Wiederbelastung vor. An diesen Stellen scheint sich keine Änderung der Rohrbettung infolge der Belastung an der GOK einzustellen.

Die DMS-Messungen belegen einen ca. 40% igen bleibenden Zuwachs der Dehnungen in den Kämpfern, der Sohle und im Scheitel des Rohres. Dabei ist in Bild 6.10 bereits





das Aufbringen des statischen Anteils der zyklischen Belastung zu erkennen. In den Zwickelbereichen des Rohres kann keine nennenswerte Dehnungsänderung erkannt werden. Die Dehnungen sind in den Kämpfern symmetrisch. In den Zwickeln sind die Dehnungen links und rechts vor Aufbringen der statischen Belastung symmetrisch, danach divergieren die Dehnungslinien etwas. Die Folienmessung zeigt keine Veränderung der Kontaktspannungen im Zwickelbereich an.

Anhand der DMS- und Folienmessungen (Bild 6.10; Bild 5.152) können die Ergebnisse der Lastplattendruckversuche weder eindeutig bestätigt, noch widerlegt werden. Der Dehnungszuwachs in den Kämpfern ist als Reaktion auf die Zusatzlast im Rohrscheitel und einer Auflockerung in der Seitenverfüllung zu interpretieren. Auffallend ist, dass bei EKB mit fast 800 μ m/m die größte Dehnung aller Bettungsmittel auftritt. Im Zusammenspiel mit den im Vergleich dazu geringen Dehnungen in den Zwickeln kann hier von einer konzentrierten Lagerung in der Rohrsohle ausgegangen werden.



Bild 6.10 Rohrverformung in Umfangsrichtung EKB nach zyklischer u. statischer Belastung

WBM

Wie RSS reagiert WBM auf das Aufbringen der statischen Belastung mit einer Reduktion des Drucks in den Hydraulikzylindern. Auch hier hat dies aber keinen mit dem Messstern erfassbaren Einfluss auf den Verformungsmodul der Bettung. Die Last-Setzungs-Linien folgen dem Wiederbelastungspfad.

Die Dehnungsmessungen zeigen auch hier eine Dehnungszunahme von ca. 30% in der Rohrsohle, während in den Kämpfern und Zwickeln kaum Änderungen auftreten. Die Folienmessungen zeigen ebenso keine Veränderung der Kontaktspannungen an.





Der Einfluss der simulierten Verkehrslasten auf die Bettung des Rohres ist somit sehr gering, das Bettungsmittel wird für diese Versuchsphase positiv bewertet.

MGM

Bei MGM bewirkt die Simulation der Verkehrslasten am eindeutigsten einen Anstieg des Drucks in den Hydraulikzylindern. Die rechnerische Zusatzlast aus der statischen Belastung von 50 KN/m² in Rohrscheitelebene wird in gleicher Größenordnung in den Hydraulikzylindern im Scheitel und in den Zwickeln des Rohres nachgewiesen. Somit überträgt MGM die Verkehrslasten direkt auf das Rohr, eine Übernahme des Großteils dieser Wirkung vom Bettungsmittel liegt nicht vor.

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen eine Auflockerung in den Kämpfern der Leitungszone, hier liegt eine neue Erstbelastung vor. In den Zwickeln und im Scheitel wird keine signifikante Veränderung der Verformungsmoduln festgestellt, im linken Zwickel (Z4) ist lediglich eine leichte Zunahme des Verformungsmoduls zu erkennen. Die Bettung des Rohres hat sich an diesen Messstellen wenig geändert.



Bild 6.11 Rohrverformung in Umfangsrichtung MGM nach zyklischer u. statischer Belastung

Die DMS-Messungen zeigen bei MGM mit 70% den größten Dehnungszuwachs an (Bild 6.11). Die Messungen bestätigen zudem die Ergebnisse der Versuche aus dem Rohr heraus. Der Dehnungszuwachs von 70% in den Kämpfern kann als Reaktion auf die Auflockerung der Seitenverfüllung verstanden werden. Auffällig ist, dass im linken Zwickel die Dehnung um 60% zunimmt, während sie im rechten Zwickel konstant bleibt. Dies korreliert mit den Versuchsergebnissen des Messstern, die im Zwickel links eine leichte Verdichtung nahe legen. Dieser Bereich der oberen Bettungsschicht kann nach Verdichtung dem Rohr ein besseres Auflager bieten.





Die Folienmessungen (Bild 5.152) zeigen auch bei MGM keine Änderung der Kontaktspannungen im Zwickelbereich an.

Vergleichende Bewertung der Materialien bei Verkehrslasten

Die Bewertung des Einflusses der zyklischen, statischen Belastung auf die Bettungsmaterialien ist in Tabelle 6.3 angegeben. Die Bewertung der Bettung nach der Simulation von Verkehrslasten kann nicht auf derselben Basis durchgeführt werden, wie die Bewertung des Einbauzustandes. In dieser Phase wird nur der Einfluss der simulierten Verkehrslasten auf die Bettung der Rohre beurteilt. Dabei werden folgende Bewertungen angewendet:

- ++ gleichmäßige Bettung, kein Einfluss
- + gleichmäßige Bettung, geringer Einfluss
- o ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung im Kämpfer
- ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung in Kämpfer und Zwickel
- -- ungleichmäßige Bettung, Ausfall im Zwickel, starke Variation.

Zusätzlich wird die Rohrbeanspruchung (Dehnungen) vergleichend bewertet:

- xx kein/geringer Einfluss
- x Einfluss, mittlere Zunahme
- Einfluss, hohe Zunahme.

Material	zyk./stat. Belastung (Phase 3)		
material	Bettung	Rohrbeanspruchung	
KSG	0	Х	
RSS	+	Х	
EKB	0	Х	
WBM	+	X	
MGM	0	-	

Tabelle 6.3 Bewertung der Bettungseigenschaften in Phase 3

6.5 Simulation von Grundwasserspiegelveränderung

KSG

Die Simulation von Grundwasserstandveränderungen wurde durch kurzzeitiges Anheben des Wasserspiegels in der Versuchsgrube auf 2m über Rohrscheitel und ein nach-





folgendes Absenken des Wasserspiegels realisiert. Für diesen Fall zeigen die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus eine erneute Auflockerung der Leitungszone im Kämpferbereich. Die Auswertung der Messsternversuche ergibt eine neue Erstbelastung in den Kämpfern, der Erstbelastungsmodul beträgt, wie schon nach Phase 3, E_{v1} = 12 MN/m². Im Scheitel und in den Zwickeln folgen die Last-Setzungs-Linien dem Wiederbelastungspfad, die Wiederbelastungsmoduln betragen i.M. E_{v2} =100 MN/m². An diesen Messstellen konnte keine Änderung der Bettung des Rohres nachgewiesen werden.

Die DMS-Messungen während der Grundwasserspiegeländerung (Bild 6.12) zeigen eine bleibende Zunahme der Dehnungen vor allem im Scheitel, der Sohle und in den Kämpfern des Rohres. Im Zwickelbereich treten nur geringe Änderung der Dehnung auf. In Rohrsohle und im Scheitel nehmen die Dehnungen um 60% zu, in den Kämpfern um 30%. Diese Ergebnisse bestätigen die durch die Messsternversuche ermittelte Auflockerung der Bettung im Kämpferbereich.

Anhand der Folienmessung kann kein Einfluss der Grundwasserspiegeländerung auf die Kontaktspannungen im Zwickelbereich festgestellt werden.



Bild 6.12 Rohrverformung in Umfangsrichtung KSG während GW-Spiegeländerung (Phase 4)

RSS

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus ergeben, dass die Bettung des Rohres sich infolge der GW-Spiegeländerung nicht verändert hat. An allen Messpunkten folgen die Last-Setzungs-Linien dem Wiederbelastungspfad.

Die Dehnungsmessungen zeigen dagegen leichte Änderungen der Rohrbeanspruchung auf. In der Rohsohle nimmt die Dehnung um ca. 40% ab, während an den übrigen Messstellen keine Dehnungsänderungen festgestellt werden. Weiterhin sind die Rohrbeanspruchungen im Vergleich zu den Schüttgütern gering.





Bild 6.13 Rohrverformung in Umfangsrichtung RSS während GW-Spiegeländerung (Phase 4)

EKB

Da das EKB-Material bereits bei geringer Belastung den Lastplatten keinen weiteren Widerstand entgegensetzen kann und durch die GW-Simulation an allen Messstellen die Ausgangsspannung auf die Lastplatten angestiegen ist, kann keine zuverlässige Ermittlung der Verformungsmoduln durchgeführt werden.



Bild 6.14 Rohrverformung in Umfangsrichtung EKB während GW-Simulation

Die DMS-Messungen (Bild 6.14) ergeben mit 40% den größten Dehnungszuwachs im Rohrscheitel. In den Kämpfern und Zwickeln sind kaum Veränderungen festzustellen, auffällig ist jedoch, dass sich während der Simulation die Dehnungen in den Zwickeln,





die vorher nicht symmetrisch waren, angeglichen haben und nun identisch sind. Die Dehnungen in der Rohrsohle sind unverändert hoch.

WBM

Wie bei RSS folgen alle Last-Setzungs-Linien dem Wiederbelastungspfad, somit kann keine Änderung der Rohrbettung nachgewiesen werden. Die Dehnungsmessungen belegen diesen Befund. Die Rohrbeanspruchungen verändern sich nicht. Dieses Verhalten des Materials wird als positiv bewertet.

MGM

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus lassen eine erneute Änderung der Rohrbettung im Kämpferbereich vermuten. Wie bei KSG beobachtet, liegt an den Messstellen eine neue Erstbelastung mit nochmals deutlich reduziertem Verformungsmodul vor (Bild 5.91), während im Scheitel und in den Zwickeln der Wiederbelastungspfad beschritten wird. An diesen Stellen liegt keine Änderung der Bettung des Rohres vor. Die Dehnungsmessungen zeigen dagegen keine signifikanten Veränderungen in den Rohrdehnungen auf. Die von den Messsternversuchen festgestellte Auflockerung des Materials kann mit Hilfe dieser Messungen am Rohr nicht bestätigt werden.

Vergleichende Bewertung der Materialien bei Grundwasserspiegeländerung

Während des schichtweisen Abtrags der Bettungs- und Verfüllmaterialien konnte die Dichtwirkung der Bettungsmittel, d.h. das Vermögen, die Rohrleitung auch bei nachträglichem Ziehen des Verbaus abzukapseln, überprüft werden. Zum einen geben die während der Densitometerversuche ermittelten Wassergehalte Aufschluss über die Durchfeuchtung der Materialien (Abschnitt 5.3.4.1). Eine anschaulichere Möglichkeit ergibt sich bei Betrachtung der Messrohre, in denen der Messstern montiert war. In Bild 6.15 -Bild 6.21 sind die Messsternrohre und die obere Bettungsschicht der Materialien dargestellt.



Bild 6.15 Rohrstrang KSG



Bild 6.16 obere Bettungsschicht KSG





Bild 6.17 Messsternrohr RSS



Bild 6.19 Messsternrohr EKB



Bild 6.18 Messsternrohr WBM



Bild 6.20 Messsternrohr MGM



Bild 6.21 obere Bettungsschicht MGM

Ein starker Rostbefall konnte am Messsternrohr von KSG infolge der hohen Durchlässigkeit des Materials beobachtet werden (Bild 6.15; Bild 6.16). Eine sehr gute Dichtwirkung wurde bei den fließfähigen Bettungsmitteln RSS und WBM festgestellt (Bild 6.17; Bild 6.18), an den Messrohren wurde kein Rost beobachtet. Beim Bettungsmaterial EKB wurde lokaler Rostbefall des Messrohres im Kämpfer- und Zwickelbereich festgestellt (Bild 6.19). Der Rostbefall des Messrohres, das beim Bettungsmittel MGM eingesetzt





wurde, trat ebenso in diesen Bereichen auf (Bild 6.20; Bild 6.21). Die möglichen Gründe für den lokalen Rostbefall sind zum einen Randläufigkeiten am Rohrstrang, d.h. eine nicht optimale Abkapselung der Rohre. Ursächlich hierfür kann das nachträgliche Ziehen der Spunddielen sein. Auch die Tatsache, dass die Dichtfunktion des Materials primär auf dem Aufquellen des enthaltenen Bentonits beruht und eine Durchfeuchtung des Materials durchaus üblich ist, kommt als Ursache für den Rostbefall in Betracht.

Die Bewertung des Einflusses der Simulation vom Grundwasseranstieg auf die Bettungsmaterialien ist in Tabelle 6.4 angegeben. In dieser Phase wird nur der Einfluss der Grundwasserspiegeländerung auf die Bettung der Rohre beurteilt. Dabei werden folgende Bewertungen angewendet:

- ++ gleichmäßige Bettung, kein Einfluss
- + gleichmäßige Bettung, geringer Einfluss
- o ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung im Kämpfer
- ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung in Kämpfer und Zwickel
- -- ungleichmäßige Bettung, Ausfall im Zwickel, starke Variation.

Zusätzlich wird die Rohrbeanspruchung (Dehnungen) vergleichend bewertet:

- xx kein/geringer Einfluss
- x Einfluss, mittlere Zunahme
- Einfluss, hohe Zunahme.

Material	Simulation GW (Phase 4)		
	Bettung	Rohrbeanspruchung	
KSG	0	X	
RSS	++	XX	
EKB	0	XX	
WBM	++	XX	
MGM	0	XX	

Tabelle 6.4 Bewertung der Bettungseigenschaften für Phase 4

6.6 Simulation von Sackungen

KSG

Nach simulierter Senkung durch Ablassen der Druckkissen im Großversuchsstand kann keine Bettung des Rohres im Bereich der oberen Bettungsschicht mehr festgestellt werden. An den Messstellen im Zwickelbereich ist der Druck in den Zylindern vollkom-





men abgefallen. Eine neuerliche Belastung der Zylinder war nicht möglich, da aufgrund der fehlenden Bettung kein Hydraulikdruck in den Zylindern aufgebaut werden kann. Das Ablassen der Druckkissen hat ebenfalls Auswirkungen auf das Bettungsmaterial im Scheitelbereich und in den Kämpfern des Rohres. Im Scheitel wird ein um 50% reduzierter Verformungsmodul ermittelt, in den Kämpfern tritt eine neue Erstbelastung infolge Auflockerung ein.

Die Dehnungen des Rohres nehmen infolge der Absenkung um maximal 40% zu (Bild 6.22). Durch die fehlende Bettung in der Mitte des Rohrstrangs werden die Lasten aus der Überdeckung teilweise auf das Endrohr mit den applizierten DMS-Rosetten umgelagert, dies bewirkt den Anstieg der Dehnungen und damit der Rohrbeanspruchung. Die Folienmessung (Bild 5.153) zeigt nunmehr nahezu keine Kontaktspannungen zwischen Rohr und oberer Bettungsschicht an und verifiziert somit die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus.



Bild 6.22 Rohrverformung in Umfangsrichtung KSG nach Absenkung des Druckkissens (Phase 5)

Die Auswirkung der Absenkung sind in Bild 5.92 sichtbar. Zwischen Rohrsohle und oberer Bettungsschicht ist ein etwa handbreiter Spalt zu erkennen, in diesem Bereich wird das Rohr nicht mehr gebettet.

RSS

Die Simulation der Setzung hat auch bei RSS Auswirkungen auf das Bettungsverhalten. Vor Beginn der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus wird ein deutlich erhöhter Druck im Scheitel des Rohres festgestellt, dagegen wird in den Kämpfern und im Zwickel links (Z4) ein vollständiger Abfall des Hydraulikdrucks beobachtet. Die weitere Versuchsdurchführung zeigt, dass die Zylinderkolben keinen Kontakt zum Bettungsmittel hatten, erst nach Aufbringen der ersten Belastungsstufe wird der Kontakt wieder





hergestellt. Dabei legt der Zylinder im linken Zwickel mit ca. 1mm den größten Weg zurück. Im rechten Zwickel wird nur ein erhöhter Druck im Zylinder festgestellt, der Kontakt zwischen Bettungsmittel und Lastplatte ist noch vorhanden. Jedoch bewirkt die Absenkung keine Änderung der Steifigkeit des Bettungsmittels. An allen Messstellen wird der Wiederbelastungsmodul der vorangegangenen Messungen erreicht. Abschließend wird jeweils im Scheitel, in einem Zwickel und in einem Kämpfer die maximale Vorlast der vorherigen Messungen überschritten und nahezu verdoppelt. Die so ca. 200 Tage nach Verfüllung der Leitungszone ermittelten Erstbelastungsmoduln liegen in derselben Größenordnung wie diejenigen nach der 28 Tage-Messung. Im Kämpfer und Zwickel beträgt E_{v1} 56 MN/m², im Scheitel 120 MN/m². Eine Verfestigung kann nicht nachgewiesen werden.

Die Auswirkungen der Absenkung sind auch in den Dehnungsmessungen (Bild 6.23) sichtbar. Im Zwickel links und in der Sohle des Rohres gehen die Dehnungen infolge des nur geringen Absackens der Bettungsschicht leicht zurück. An den übrigen Messstellen kann keine signifikante Dehnungsänderung festgestellt werden. Das Bettungsmittel verhält sich in dieser Versuchsphase immer noch relativ gutmütig.



Bild 6.23 Rohrverformung in Umfangsrichtung RSS nach Absenkung des Druckkissens (Phase 5)

EKB

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus ergeben einen veränderten Verformungsmodul im Scheitel und im linken Kämpfer der Leitungszone. Hier hat sich die Bettung des Rohres verändert, eine Auflockerung des Bettungsmittels liegt vor. An diesen Messstellen tritt eine neue Erstbelastung auf. Dagegen folgen die Last-Setzungs-Linien im Kämpfer rechts (Z2) und im Zwickel rechts (Z3) dem Wiederbelastungspfad





und hiermit tritt kein Bettungsverlust auf. Der Verlauf der Setzungsmulde (Bild 5.101) zeigt außerdem, warum im rechten Kämpfer kein Verlust der Bettung nachgewiesen werden kann. Die Setzungsmulde verläuft nicht durch die Messstelle im Zwickel, sondern in einem Abstand von ca. 5cm umgeht die eingeprägte Störung die Messstelle.

Die DMS-Messungen (Bild 6.24) belegen, dass der Einfluss der Absenkung auf die Bettung des Rohrstrangs und damit auch auf die Rohrbeanspruchung viel größer ist, als es die Ergebnisse der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus vermuten lassen. Die Dehnungen in der Rohrsohle nehmen um ca. 65% auf 1230 μ m/m zu. Damit tritt beim EKB-Material im Vergleich zu den anderen Bettungsmitteln die betragsmäßig größte Rohrbeanspruchung auf. In den Kämpfern und im Scheitel des Rohres treten ebenfalls nicht unerhebliche Dehnungszuwächse auf. Die Dehnungen in den Zwickelbereichen zeigen ein anderes Verhalten. So ist im linken Zwickel keine Änderung der Beanspruchung nachzuweisen und im rechten Zwickel (Z3) kann ein leichter Dehnungszuwachs beobachtet werden. Die Vermutung aus der Messsternmessung, dass der Rohrstrang in den Zwickeln kaum oder gar nicht gebettet ist, wird hierdurch bestätigt.



Bild 6.24 Rohrverformung in Umfangsrichtung beim EKB nach Absenkung des Druckkissens (Phase 5)

WBM

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen keinerlei Veränderung der Rohrbettung auf. An allen Messstellen folgen die Last-Setzungs-Linien dem Wiederbelastungsast, dementsprechend ändern sich die Verformungsmoduln auch nicht. Wie bei RSS wurden an drei Messstellen die maximalen Vorlasten überschritten, um nach ca. 200 Tagen eine dritte Erstbelastung zu ermöglichen. Hier zeigt sich keine Veränderung der Steifigkeit des Bettungsmittels, wie z.B. eine Nacherhärtung. Die Erstbelastungsmoduln liegen mit 100 MN/m² in der gleichen Größenordnung wie 28 Tage nach Verfüllen der Leitungszone.





Das gute Bettungsverhalten des Materials bestätigt sich auch nach Auswertung der Dehnungsmessungen. Mit maximal 20% ist der Dehnungszuwachs bei WBM am niedrigsten. Die maximalen Rohrbeanspruchungen liegen nach Abschluss aller Versuchsphasen bei 200 μ m/m, dies entspricht einer mehr als 80% geringeren Rohrdehnung als bei EKB festgestellt.

MGM

Die Auswirkung der eingeprägten Störung auf die Bettung des Rohres ist bei MGM mit denen des Bettungsmittels KSG vergleichbar. Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen, dass das Rohr in den Zwickeln nicht mehr gebettet ist. In den Kämpfern ist das Material aufgelockert, hier liegt eine neue Erstbelastung vor. Im Scheitel folgt die Last-Setzungs-Linie dem Wiederbelastungspfad.



Bild 6.25 Rohrverformung in Umfangsrichtung beim MGM nach Absenkung des Druckkissens (Phase 5)

Die Dehnungsmessungen (Bild 6.25) bestätigen die Auflockerung in den Kämpfern. Dort ist der Dehnungszuwachs mit 70% am größten. Insgesamt steigen die Rohrbeanspruchungen am gesamten Rohrumfang. Die Größenordnung der maximalen Dehnungen ist mit der von KSG vergleichbar. Die Folienmessung (Bild 5.153) bestätigt die infolge Absenkung fehlende Bettung im Zwickelbereich, es werden keine Kontaktspannungen mehr angezeigt.

Vergleichende Bewertung der Materialien bei Sackungen

Die Bewertung des Einflusses der Absenkung auf die Bettungsmaterialien ist in Tabelle 6.5 angegeben. In dieser Phase wird nur der Einfluss der Sackung auf die Bettung der Rohre beurteilt. Dabei werden folgende Bewertungen angewendet:

|--|



- ++ gleichmäßige Bettung, kein Einfluss
- + gleichmäßige Bettung, geringer Einfluss
- o ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung im Kämpfer
- ungleichmäßige Bettung, Einfluss auf Bettung in Kämpfer und Zwickel
- -- ungleichmäßige Bettung, Ausfall im Zwickel, starke Variation.

Zusätzlich wird die Rohrbeanspruchung (Dehnungen) vergleichend bewertet:

- xx kein/geringer Einfluss
- x Einfluss, mittlere Zunahme
- Einfluss, hohe Zunahme.

Material	Simulation Sackung (Phase 5)		
	Bettung	Rohrbeanspruchung	
KSG		Х	
RSS	+	XX	
EKB	-	-	
WBM	++	XX	
MGM		Х	

 Tabelle 6.5 Bewertung der Bettungseigenschaften für Phase 5



7 Ansätze für Bemessung und Qualitätssicherung

7.1 Bemessung

Um Rohrleitungen auch bei Einsatz der untersuchten Bettungsmittel praxisnah entsprechend der Bemessungshinweise nach ATV-DVWK-A 127 berechnen zu können, bietet sich vor dem Hintergrund der beobachteten Einflussfaktoren und Messergebnisse vorrangig der Auflagerbereich als Ansatzpunkt an. Insbesondere die Ergebnisse der Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus und die Dehnungs- und Foliendruckmessungen zeigten deutliche Unterschiede in der Druckverteilung im Bereich des Auflagers bei gleichzeitiger Veränderung der Rohrbeanspruchung, so dass hier von einem maßgeblichen Zusammenhang auszugehen ist. In der Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 werden diese Einflüsse im Wesentlichen über den **Auflagerwinkel (2** α) widergespiegelt. Weitere Ansatzpunkte bieten ggf. die Ergebnisse der Laboruntersuchungen an den verschiedenen Materialien (vgl. Abschnitt 4) mit Blick auf eine Variation der Bodenparameter in der Leitungszone.

In Bild 7.1 sind mit dem Programmsystem RIB berechnete Rohrbeanspruchungen (Berechnung mit Ersatzwanddicke t=14 mm nach Abschnitt 5.2.4) in der Rohrsohle in Abhängigkeit des Auflagerwinkels und der Bodenart nach ATV-DVWK-A 127 (Bodengruppe G1/G2) dargestellt. Zum Vergleich sind die Niveaus der aus den Dehnungsmessungen berechneten Rohrspannungen in der Rohrsohle mit zugehörigem Sicherheitsbeiwert γ des Spannungsnachweises eingefügt. Die Berechnungswerte werden selbst bei Annahme eines optimalen Auflagerwinkels (2 α =180°) nicht überschritten, obwohl die Versuche im Großversuchsstand z.B. bei den Schüttgütern eindeutig kleinere Auflagerwinkel vermuten lassen. Die Berechnungen nach ATV-DVWK-A 127 liegen somit auf









der sicheren Seite, wenn auch die Berechnungen mit der Ersatzwanddicke zu überhöhten Rohrbeanspruchungen führen können. Der im Spannungsnachweis geforderte Sicherheitsbeiwert γ = 1,5 wird insbesondere bei WBM und RSS weit übertroffen. Daher liegt es im Falle der fließfähigen Bettungsmittel nahe, nicht nur den optimalen Auflagerwinkel bei der Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 anzusetzen, sondern auch die Bodenparameter der Leitungszone anzupassen. Problematisch ist, dass die Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 für die hier vorliegende Einbettungsbedingung B3 (Senkrechter Verbau innerhalb der Leitungszone mit Spundwänden oder Leichtspundprofilen und Verdichtung gegen den Verbau, der bis unter die Grabensohle reicht) und Überschüttungsbedingung A3 (Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Spundwänden, Leichtspundprofilen, die erst nach dem Verfüllen entfernt werden) keinen höheren Verformungsmodul innerhalb der Leitungszone (E_{20}) als in der Überschüttung (E_1) zulässt. Da die fließfähigen Bettungsmittel kaum Reaktionen auf das Ziehen der Spunddielen zeigen, stellt sich die Frage, ob das Ansetzten der Einbettungsbedingung B3 hier tatsächlich sinnvoll ist. Der Verformungsmodul der Leitungszone wird primär abgemindert, um Einflüsse aus Auflockerung durch Ziehen des Verbaus oder Schwierigkeiten beim Verdichten im schmalen Graben zu berücksichtigen. Da unter Beachtung der Versuche im Großversuchsstand im vorliegenden Fall diese Einflüsse allenfalls als gering einzustufen sind, entspräche es vielleicht mehr dem Verhalten der fließfähigen Bettungsmittel, wenn auch bei den hier vorliegenden Randbedingungen eine alternative Bettungsbedingung gewählt wird. Die Einbettungsbedingungen B4 (lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Einbettung, mit Nachweis des Verdichtungsgrades nach ZTVE-StB) und B1 (lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Einbettung, ohne Nachweis des Verdichtungsgrades) erscheinen an dieser Stelle am sinnvollsten. Dem widerspricht, dass bei Ansatz der Einbettungsbedingungen B1 und B4 keine Unterrammung angesetzt werden kann. Zudem sieht das ATV-DVWK-A 127 vor, dass bei der Einbettungsbedingung B4 der Verformungsmodul des gewachsenen Bodens (E₃) dem Verformungsmodul der Leitungszone (E₂) gleichgesetzt wird. Bei Ansatz der Einbettungsbedingung B1 gilt, dass innerhalb der Leitungszone kein höherer Verformungsmodul als in der Überschüttung angesetzt werden darf.

Auf Grundlage der ATV-DVWK-A 127 ist damit eine zutreffende Berechnung der Rohrbeanspruchungen bei Einbettung in fließfähige Bettungsmittel für die hier vorliegenden Randbedingungen im Großversuchsstand (Einbettungsbedingung B3, Überschüttungsbedingung A3) nicht möglich. Auf der sicheren Seite liegend kann jedoch mit einem optimalen Auflagerwinkel 2α =180° in der Leitungszone gerechnet werden. Bodenparameter und Steifigkeiten der flüssigen Bettungsmittel können aus Triaxialversuchen nach DIN 18137 oder Plattendruckversuchen nach DIN 18134 zum Zeitpunkt der Überschüttung ermittelt, und in der Berechnung angesetzt werden.

Die Erarbeitung eines neuen Bemessungskonzeptes für flüssige Bettungsmaterialien und deren Eingliederung in ATV-DVWK-A 127 erscheint sinnvoll. Dieses Konzept kann durchaus auf Grundlage der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens erarbeitet wer-





den, wobei evtl. zusätzliche Untersuchungen notwendig werden. Der vorliegende Stand der Technik und die vorliegenden Bemessungsgrundlagen sind allenfalls nicht ausreichend. Eine Grundlegende Bearbeitung der ATV Vorgaben wäre hier notwendig.

7.2 Qualitätssicherung

Die Versuche hatten zum Ziel, das Verhalten der untersuchten Bettungsmittel unter idealen und vergleichbaren Randbedingungen zu erfassen. Entsprechend wurde der Einbau in allen Fällen unter Berücksichtigung der geltenden Regelwerke bzw. der Herstellervorgaben ausgeführt. Im Ergebnis führte der Einsatz sämtlicher Materialien zu Beanspruchungszuständen in der Rohrleitung, die unter den nach ATV-DVWK-A 127 [27] anzusetzenden Beanspruchungen lagen bzw. mit diesen vergleichbar waren.

In der Praxis unterliegen Baumaßnahmen allerdings vielfältigen Zwängen und Randbedingungen, die eine ideale Ausführung erschweren oder sogar unmöglich machen. Hierzu gehören insbesondere:

- Platzverhältnisse auf der Baustelle (Erreichbarkeit, Lagerfläche)
- Wettereinfluss (Trockenheit, Regen, Hitze, Frost)
- Trassenverlauf, Bauabschnitte
- Positionierung der Rohre im Graben (Seitenlage, Höhenlage)
- Hindernisse im Leitungsgraben (Kreuzende Leitungen, sonstige Zwangspunkte)
- wechselnde Bodenverhältnisse
- Unregelmäßigkeiten im Verbau (Variierende Grabenbreiten)
- manueller Aushub ohne maschinelle Hilfe
- Verzögerung beim Rückbau der Grabensicherung
- kurze zulässige Bau- bzw. unzureichende Abbindezeiten
- Entmischung durch unzulässige Schütthöhe
- unzureichende Auftriebssicherung bei fließfähigen Materialien
- zu lange Transportzeiten (Verfestigung, Abminderung der Viskosität, Fließgrenze)
- Unsachgemäße Verfüllung (seitliche Verschiebung der Rohrleitung)

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit zu erwarten ist, dass die Materialien unter Praxisbedingungen empfindlich auf einen oder mehrere der o.a. Einflüsse reagieren und damit auch das Risiko einer übermäßigen Beanspruchung der Rohrleitung entstehen kann.

Tabelle 7.1 fasst die o.g. wesentlichen Einflussfaktoren und daraus möglicherweise resultierende Risiken zusammen.





Einflussfaktor	KSG	EKB	MGM	RSS	WBM	
Gewachsener Boden	Wechselwir	chselwirkung zur Grabensicherung Wassergehalte und durchlässigkeit können das Abbindeverhalten au		ehalte und – t können sich auf rhalten auswirken		
Hitze, Trockenheit, Regen	Kaum Ein- fluss	Veränderung gehalts kann schaften be	des Wasser- Materialeigen- eeinflussen	Veränderung des Wassergeha kann die Abbindeeigenschafte beeinflussen		
Frost	Schlecht o	der gar nicht ve	erarbeitbar	Kaum Einfluss beim Einbau durch Temperierbarkeit, ggfls. längere Abbindezeit		
Lagerfläche	Ausre auf der	ichende Lagerf Baustelle erfor	läche derlich	Kein Einfluss bei Anlieferung im Fahrmischer		
Zuwege für Fahr- zeuge	Kaum Einfluss oder mit Lk	, da Anlieferung (W und Einbau	g im Container mit Greifer	Anlieferung meist im Fahrmischer, daher Anfahrtswege erforderlich oder Pumpwagen		
Hindernisse im Leitungsgraben	Unzureichende Verdichtung der Leitungszo- ne durch eingeschränkte Zugänglichkeit			Kaum	Einfluss	
Exzentrische La- ge der Rohre im Graben	Unzureichende Verdichtung insbesondere im Zwickelbereich der Leitungszone durch eingeschränkte Zugänglichkeit			Kaum Einfluss		
Unterteilung in Bauabschnitte	Kaum Einfluss			Auf das Mater Abschottung d erfor	rial abgestimmte er Bauabschnitte ^r derlich	
Rohrwerkstoff und Nennweite	ggf. Zusatzmaßnahmen bei leichten Rohren während der Zwickelverdichtung			Auf Rohrwerkst abgestimmt zur Auftrie	off und Nennweite e Maßnahmen ebssicherung	
Anforderungen an Trasse und Gefäl- le	Ausbildung des Auflagerbereiches			Schaffen von punktuelle	geeigneten (ggf. en) Auflagern	
Nachträglicher Rückbau der Grabensicherung	Bei senkrechten Verbauelementen: Auflo- ckerungen in der Leitungszone und im an- stehenden Boden			Bei senkrechte ten: Auflockerur im anstehe	n Verbauelemen- ngen insbesondere enden Boden	
Rückbau der Grabensicherung parallel zur Gra- benverfüllung	Verdichtung gegen Umgebungsboden erfor- derlich			Wechselwirkun hendem Boden im flüssigen Z	g zwischen anste- und Verfüllmaterial ustand ungewiss	
aggressives GW oder Boden	kaum Ein- fluss	Bedenklich bei CO ₂ - haltigem Wasser	Bedenklich bei Sulfaten	nicht untersuch wei	t, HS-Zement ver- nden?	

Tabelle 7.1 Bettungsmittelspezifische Einflussfaktoren und Risiken

Letztendlich sind verlässliche Angaben zu möglichen Risiken nur auf Basis von in-situ-Untersuchungen möglich. So sollten während des Einbaus entnommene Rückstellproben entsprechenden Prüfungen unterzogen werden. Es hat sich gezeigt, dass zur Ermittlung der Steifigkeit der Materialien Triaxialversuche am geeignetsten sind.

Neben dem Messstern stehen zurzeit keine weiteren in-situ Prüfverfahren zur Verfügung, die eine direkte Bestimmung der Bettung in den Zwickelbereichen eines Rohres ermöglichen. In der seitlichen Bettungszone können Seitendrucksondierungen (Pressi-



RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



ometer) Aufschluss über den Steifemodul des Bodens geben, da für den Vergleich von Pressiometerergebnissen mit anderen Baugrunduntersuchungen jahrelange Erfahrungen vorliegen.

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurde auch festgestellt, dass der Rückbau der Bettungsmaterialien unterschiedlichen Arbeitseinsatz erfordern kann. Hierbei stellte sich die Frage, ob der in der Praxis oftmals verwendete Begriff der "Spatenlösbarkeit" über Hilfsparameter, wie beispielsweise Druckfestigkeit oder Rammsondierungen, ausreichend genau abgebildet wird oder die Entwicklung neuer Prüfmethoden sinnvoll erscheint. So wurde beispielsweise beim Ausbau der Materialien zur ergänzenden Abschätzung der Spatenfestigkeit auch eine mittelschwere Rammsonde (25 kg) eingesetzt (Bild 7.2a), deren konische Spitze durch ein Stahlblech in Spatenform ersetzt worden war (Bild 7.2b).





a) Gesamtansicht

b) Detail "Spatensonde" Bild 7.2 Einrichtung zur Ermittlung der "Spatenfestigkeit"

Für diese Versuche wurde die "Spatensonde" auf dem jeweiligen Bettungsmaterial aufgesetzt und die Schlagzahlen für das Eindringen für je 10 cm Eindringtiefe bis zu einem Maximum von 30 cm ermittelt. Die Ergebnisse sind Tabelle 7.2 zu entnehmen.

Eindringtiefe [cm]	KSG	EKB	MGM	RSS	WBM
0 bis 10	1	1	2	5	4
10 bis 20	1	2	4	10	10
20 bis 30	2	2	6	15	22

Tabelle 7.2: Schlagzahler	n der Spatensonde
---------------------------	-------------------

Deutlich sind die unterschiedlichen Schlagzahlen erkennbar. Unter welchen Randbedingungen zuverlässige Aussagen mit dieser Prüfmethode zu erwarten sind und inwiefern die Prüfungen auch für den Einsatz auf der Baustelle geeignet sind, ist allerdings noch offen und im Rahmen von entsprechenden Laborversuchen und in-situ-Maßnahmen zu klären.





Eine Erweiterung der QS-Maßnahmen zur Überprüfung der gelieferten Materialien, welche in flüssigem Zustand eingebaut werden scheint angebracht. Die Lieferanten haben zwar Ihre interne QS-Anforderung (z.B. Leistung der Mischanlage) aber das Material wird unter anderen Bedingungen eingebaut. Die bisherigen Untersuchungen beziehen sich auf die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit nach 7, 14 und 28 Tagen, Kontrolluntersuchungen am Grundmaterial (Sieb-/Schlämmuntersuchungen) und das Ausbreitmaß bei Lieferung. Die Ergebnisse der Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit sind zudem erst nach 28 Tagen zu erhalten. Zu diesem Zeitpunkt sind jedoch die meisten Baumaßnahmen bereits abgeschlossen.

Maßnahmen und Prüfungen bei Lieferung hinsichtlich

- a) Verarbeitbarkeit, Konsistenz, Ausbreitmaß und Viskosität,
- b) Erosionsstabilität,
- c) Fließgrenze und Festigkeit, wobei das Material von der flüssigen bis zur festen Phase zeitnah in seiner Entwicklung überprüft werden sollte,

sind hier im Sinne einer optimalen QS zu nennen. Eine Zusammenstellung der erforderlichen Prüfungen mit erforderlichen Geräten und Überprüfungsintervallen sollte auch in die ATV-Richtlinien aufgenommen werden. Solide Prüfverfahren liegen teilweise bereits vor (z.B. Vicat Gerät) und eine systematische Vorgehensweise bei der QS auf den Baustellen, welche in den Empfehlungen aufgenommen wäre, ist für die Betreiber und Lieferanten von diesen neuen Materialien eine unverzichtbare Hilfe, zumal objektive Kriterien für die Leistungsbeschreibung und die Vergabe von Bauleistungen unbedingt benötigt werden.



8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurden die aus Betreibersicht maßgeblichen Bettungsmittel im direkten Vergleich untersucht und entsprechende Bewertungsparameter und Messgrößen abgeleitet werden. Dies geschah insbesondere vor dem Hintergrund eines wirtschaftlichen Kanalbaus bei geringer Grabenbreite, einfachem Einbau und sicherer Zwickelverfüllung unter besonderer Berücksichtigung der Ausführung von Kanälen im Grundwasser und in Gebieten mit hohen Setzungen und Verschiebungen, z.B. Bergsenkungsgebieten.

Dabei konnte mit Hilfe der neuartigen Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus erstmals die Bettung direkt in der Leitungszone am gesamten Rohrumfang quantitativ überprüft werden.

Deutliche Qualitätsunterschiede bei der Bettung der Rohre ergaben sich zwischen den fließfähigen Materialien RSS-Flüssigboden und Weimarer Boden-Mörtel einerseits und den Schüttgütern Sand-Kies-Gemisch, EKA-Bett und Dywidag Mineralgemisch. Bei den fließfähigen Materialien konnte in jeder Versuchsphase eine nahezu ungestörte Bettung der Rohre nachgewiesen werden. Bei den Schüttgütern wurden selbst unter den optimalen Rahmenbedingungen im Großversuchsstand die aus der Praxis hinlänglich bekannten Probleme bei der Verdichtung und folglich Rohrbettung im Zwickelbereich beobachtet. Die Schüttgüter reagierten durchweg ähnlich in den unterschiedlichen Versuchsphasen, mit Verlust der Bettung vor allem im Kämpferbereich und nach der Simulation der Absenkung auch im Sohlbereich der Rohre.

Als Folge des unterschiedlichen Bettungsverhaltens der Materialien wurden auch deutliche Unterschiede in den Rohrbeanspruchungen festgestellt. Bei den fließfähigen Materialien wurden geringe Beanspruchungen des Rohres festgestellt. Bei den Schüttgütern wurde in nahezu jeder Versuchsphase eine deutlich Zunahme der Rohrbeanspruchungen infolge der unzureichenden Bettung beobachtet. Hier traten beim Material EKA-Bett die größten Rohrbeanspruchungen auf. Das Sand-Kies Gemisch und das Dywidag Mineralgemisch wiesen vergleichbare Rohrbeanspruchungen auf.

Die gemessenen Rohrbeanspruchungen lagen, außer im Falle des Materials EKA-Bett, jedoch immer unterhalb der nach ATV-DVWK-A 127 berechnet Rohrbeanspruchungen. Besonders bei den fließfähigen Materialien wurden im Großversuchsstand nur geringe Rohrbeanspruchungen beobachtet, so dass eine Berechnung der Rohrstatik nach ATV-DVWK-A 127 ökonomisch nicht sinnvoll scheint, jedoch deutlich auf der sicheren Seite liegt. Für diese Materialien wird die Erarbeitung eines neuen Bemessungskonzeptes und dessen Eingliederung in den Rahmen des ATV-DVWK-A 127 vorgeschlagen.

Zur Realisierung dieses Konzeptes sind im Bereich der QS einige Anforderungen aufzustellen, welche auf weitergehende Untersuchungen der flüssigen Materialien basieren. Der bislang vorliegende Kenntnisstand ist hierfür nicht ausreichend.


RUB-Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik



Im Hinblick auf einen wirtschaftlich sinnvollen Leitungsbau muss die bei den fließfähigen Betungsmitteln vorliegende Möglichkeit der Reduktion der Grabenbreite (kleinste zulässige Breite) näher untersucht werden. Im Sinne der Qualitätssicherung scheint eine Weiterentwicklung der Lastplattenversuche aus dem Rohr heraus und der in-situ Prüfmethoden (z.B. Pressiometer) sinnvoll.



9 Literatur

- [1] Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V., "Die Entwicklung der Marktnachfrage nach Abwasserentsorgungsdienstleistungen in Deutschland", 1997.
- [2] Dudey, J.; Pecher, R.; ATV- Umfrage Abwassergebühren, Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis, Heft 34, GFA, Hennef, 1994.
- [3] Stein, D.; Instandhaltung von Kanalisationen. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 1999.
- [4] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. 10/1997.
- [5] ZTVE StB 94: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Fassung 1997.
- [6] Köhler, R.: Tiefbauarbeiten f
 ür Rohrleitungen. 6. Aufl., Verlagsgesellschaft Rolf M
 üller, 1997.
- [7] Stecha, H.: Bettung der Rohre, Verfüllung, Verdichtung. In Köhler, R. (Hrsg.); Tiefbaupraxis für Abwasserkanäle, Vulkan-Verlag Essen, 2000.
- [8] Stein, D.: Entwicklung neuartiger Konzeptionen für Rohre aus Beton. Schlussbericht, Bundesminister für Forschung und Technologie, 1992.
- [9] Büchner, U.: Berger, W.: Alternative Grabenverfüllmaterialien, FITR Weimar, Skript 01/2002, unveröffentlicht.
- [10] Bau- und Bohrbentonite, SC-Information Süd-Chemie AG München.
- [11] Krause, G.; Schaumbeton, statt Sand als Verfüllmaterial. Beton 1990 6 S. 251.
- [12] Kanalsanierung unter Wasser, Straßen und Tiefbau 1997 2 S. 18.
- [13] Porenleichtbeton als Schutzschichtbestandteil der Deponiebasisabdichtung einer Hausmülldeponie, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 1992 5 S. 364.
- [14] Dämmer[®] und Blitzdämmer[®], Produktinfomation ANNELIESE Baustoffe für Umwelt und Tiefbau GmbH & Co. Ennigerloh.
- [15] füllmix[®], Produktinformation BauMix Baustoffe GmbH Herten.



- [16] Readymix-füma[®] Das fließende Füllmaterial, Produktinformation Readymix Beton AG Ratingen.
- [17] Readymix-füma[®]-Boden, Produktinformation.
- [18] Doroflow[®], Produktinformation Rudolf Rohrbach Zement KG Dotternhausen.
- [19] Österreichisches Patent: AT Nr. 374163: Gießfähige Mischungen, vorzugsweise zum Verfüllen von Künetten, Gräben und dgl. vom 15.08.1984.
- [20] RSS[®]-Flüssigboden, Produktinformation RSS[®]-System, Leipzig.
- [21] DIN 18300: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Erdarbeiten. 12/2002.
- [22] DYWIDAG-Mineralgemisch das flexibel einsetzbare Abdichtungsmaterial auf mineralischer Basis, Produktinformation DYWIDAG Umweltschutztechnik GmbH, München.
- [23] Entwicklung eines selbstdichtenden Bettungssystems f
 ür Abwasserkan
 äle, Entwurf des Endberichtes vom 04.10.1995 f
 ür das KfK/BMFT-Forschungsvorhaben 02-WK 9176/2.
- [24] SILIGRAN[®] Quarzkörnungen, EUROQUARZ GmbH, Dorsten.
- [25] IKT: Prüfprotokolle zum Forschungsvorhaben "Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für mittels des Berstverfahrens verlegter Abwasserkanäle und Leitungen", 2001, unveröffentlicht.
- [26] Einsatzgrenzen von EPS-Bettungskissen in der offenen Bauweise. Forschungsantrag an das Umweltministerium NRW. IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur 12/2004. Unveröffentlicht.
- [27] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen.3. Auflage, 8/2000.
- [28] DIN 1998: Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung. 5/1978.
- [29] Giesler, N.: Ist die DIN 4033 Entwässerungskanäle und –leitungen (Richtlinie für die Ausführung) noch zeitgemäß? Korrespondenz Abwasser (KA) 39. 1992.
- [30] Giesler, N.: Kanalbau in offenen Gräben auf neuen Wegen? Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau (TIS) Heft 5. 1992.





- [31] Triaxialversuche an einem Rhein-Sand 0/8 ; Ergebnisbericht mit Ermittlung von weiterführenden Kennwerten. DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH;11/1996.
- [32] Sicherheitsregeln für Bauarbeiten unter Tage. Ausgabe 4/1977. Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Bonn.
- [33] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gußeisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren. 1994.
- [34] Falk, C.; Liebscher, M.: Endbericht zum Forschungsvorhaben "Auswirkungen unterschiedlicher Verbauarten auf die Belastung erdverlegter Abwasserkanäle und – leitungen, – Kanaldielenverbau". IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen; Im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV); 10/1996.
- [35] Tekscan: Pressure Measurement System. User's Manual. 11/1999.
- [36] DIN 18134, Plattendruckversuch. 1990.
- [37] E DIN 18135; Eindimensionaler Kompressionsversuch. Juni 1999.
- [38] DIN18137 Teil 2; Abschnitt 6.4.2: Durchführung D-Versuch. Dezember 1990.
- [39] Sugai, M., Tatsuoka, F. und Uchimura, T. : Effects of ageing and viscosity on the stress-strain behaviour of a cement-mixed soft clay.
- [40] TP BF-StB, Teil 8.3.
- [41] ZTVT-StB 95; Ausgabe 1995.
- [42] Prospekt DYWIDAG-Mineralgemisch ; Mineralische Kapselung von Abwasserkanälen, Qualitätssicherung.
- [43] Sherif El Shahid: Zur Belastung erdverlegter Rohrleitungen nach dem Ziehen von Verbauprofilen. Institut f
 ür Kanalisationstechnik an der Ruhr-Universit
 ät Bochum. Technisch-wissenschaftliche Berichte. Bericht 97/5.