neutral
unabhängig
gemeinnützig

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Institute for Underground Infrastructure

Forschungsbericht

Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau

Laboruntersuchungen und Versuche im Maßstab 1:1

Kurzfassung

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:

Ministerium für
Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes NRW

Bearbeitung:

Ruhr-Universität Bochum: Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik
Prof. Dr.-Ing. habil. Theodor Triantafyllidis
Universitätsstr. 150
44801 Bochum

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 Problemstellung 4
2 Zielstellung und Vorgehensweise 5
3 Voruntersuchungen 6
3.1 Problemstellung 6
3.2 Auswahl der Bettungsmittel für die Großversuche 8
4 Versuche im Maßstab 1:1 10
4.1 Versuchskonzept 10
4.2 Versuchsaufbau und -durchführung 11
4.2.1 Randbedingungen 11
4.2.2 Messtechnik 14
4.2.2.1 Allgemeines 14
4.2.2.2 Messstern 14
4.2.2.3 Dehnungsmessstreifen 16
4.2.2.4 Spannungsmessfolien 17
4.3 Versuchsergebnisse und -auswertung 17
4.3.1 Dehnungsmessungen in Umfangsrichtung 17
4.3.2 Bodenparameter 23
4.3.2.1 Densitometerversuche nach DIN 18125 24
4.3.2.2 Triaxialversuche nach DIN 18137 25
4.3.3 Folienmessungen 25
4.3.4 Messstern 28
4.3.4.1 Einbauzustand 29
4.3.4.2 Ziehen der Spunddielen 34
4.3.4.3 Statische und zyklische Belastung 38
4.3.4.4 Simulation von Grundwasserspiegelveränderungen 42
4.3.4.5 Simulation von Sackungen 44
4.3.4.6 Zusammenfassende Bewertung der Materialien 47
5 Ansätze für Bemessung und Qualitätssicherung 49
5.1 Bemessung 49
5.2 Qualitätssicherung 49
6 Zusammenfassung und Ausblick 52
7 Literatur 53

1 Veranlassung und Problemstellung

Die Aufwendungen der Netzbetreiber für den Neubau und die Erneuerung von Abwasserleitungen und –kanälen sind zurzeit und auch zukünftig beachtlich.

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.

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.

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

Im Rahmen des Projektes sollten die aus Betreibersicht maßgeblichen Bettungsmittel im direkten Vergleich untersucht und entsprechende Bewertungsparameter und Messgrößen abgeleitet werden. 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.

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. Darüber hinaus wurden die aus dem bestehenden Normen- und Regelwerk bekannten Berechnungsmodelle analysiert und für den vorliegenden Anwendungsfall in Form von Bemessungskonzepten angepasst. Auf Basis der durchgeführten Großversuche wurden Hinweise zur Qualitätssicherung für die eingesetzten Verfüllmaterialien zusammengestellt. Schließlich wurden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftig noch zu lösende Fragestellungen gegeben.

3 Voruntersuchungen

3.1 Problemstellung

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 Eigenschaf-

ten 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 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.

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
- Einkorn 0-1 (SILIGRAN®), Westdeutsche Quarzwerke
- Schmelzkammergranulat 0-4 fein, Fa. Klösters, Essen
- Schmelzkammergranulat 0-4 grob, Fa. Steag Entsorgung
- Schmelzkammergranulat 0-8, Fa. Steag Entsorgung

II. bindige Schüttgüter

- Mineralgemisch 0-16, Fa. Heilit Umwelttechnik
- EKA-Bett 0-8, aufbereiteter Bodenaushub, Fa. Klösters, Essen

III. Fließfähige Verfüllmaterialien

- WBM 0-16, Recyclingmaterial mit Suspension aus Plastifikator und Stabilisator, FITR Weimar, Fa. Höhler, Dortmund
- RSS 0-32, Trockengemisch mit Wasser (schluffiges Aushubmaterial mit RSS®-Flüssigboden Compound u. Beschleuniger trocken vorgemischt), Größtkorn 40 mm lt. Herstellerangaben, PROV Leipzig, Fa. Klösters, Essen

- Dämmer, Spezialmörtel, Fertigmischung aus feinsten Bestandteilen und Wasser, Fa. Anneliese
- Füma, Spezialmörtel aus Sand 0-2, Zement, Wasser und Schaum, Fa. Readymix

3.2 Auswahl der Bettungsmittel für die Großversuche

Es wurden Versuche zur Bestimmung der Korngrößenverteilung, Proctorversuche sowie Kompressionsversuche durchgeführt. Zudem wurde die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit der fließfähigen Bettungsmittel betrachtet, sowie die Ermittlung der lockersten und dichtesten Lagerung der nichtbindigen Schüttgüter untersucht. Auf Basis der Versuchsergebnisse der Voruntersuchungen wurde die Bewertungsmatrix (Tabelle 1) 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 Grundbestandteil. 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 ausgeprägten 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	q_u	$q_u(t)$	E_{s1}	$E_{s1}(\sigma)$	E_{s2}	$E_{s2}(\sigma)$	$E_{s1}(t;\rho)$ $E_{s2}(t;\rho)$	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. Dichtevariation gering?	ist das Material spatenlösbar?	Wie hoch ist die einaxiale Druckfestigkeit?	Ist die Druckfestigkeit zeitunabhängig?	Ist der Steifemodul bei Erstbelastung hoch?	Ist 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 Einbaudichte gering?	Ist die Steifigkeit bei Wiederbelastung nicht signifikant höher als bei Erstbelastung?
"flüssige" BM	WBM				+	o	+	o	+	+	o	+	-
	RSS				+	o	o	o	+	+	o	o	-
	Dämmer				o	+	-	+	-	+	-	o	o
	Füma				+	o	o	-	+	+	-	o	-
"bindige" BM	Mineral gemisch 0-16	o	o		+			o	+	+	o	o	o
	EKA-Bett 0-8	o	o		+			o	+	o	o	+	+
"granulare" BM	Sand-Kies 0-8	+	+	o	+			o	o	+	+	+	o
	Einkorn 0-1	-	-	+	+			o	-	o	-	o	+
	Schmelz granulat 0-4f	+	+	o	+			o	o	+	-	o	o
	Schmelz granulat 0-4g	-	-	-	+			o	+	o	o	-	o
	Schmelz granulat 0-8	o	-	-	+			+	o	+	o	-	+

Tabelle 1 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.

4 Versuche im Maßstab 1:1

4.1 Versuchskonzept

Für den Einbau der unterschiedlichen Bettungsmittel wurde eine Aufteilung des Großversuchsstandes in 5 Kammern durchgeführt. Es wurden von einem Rechteckschacht ausgehend vier Versuchsrohre in jeder Kammer verlegt. 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.

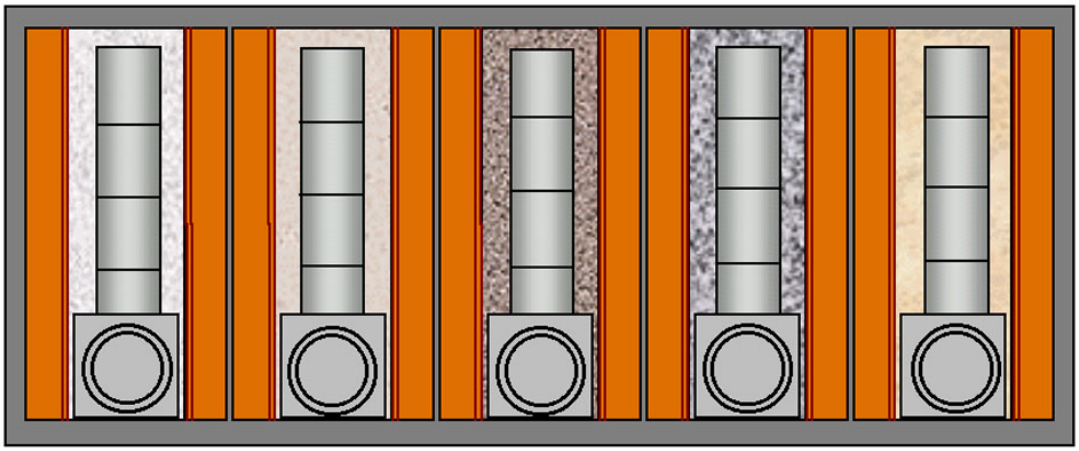
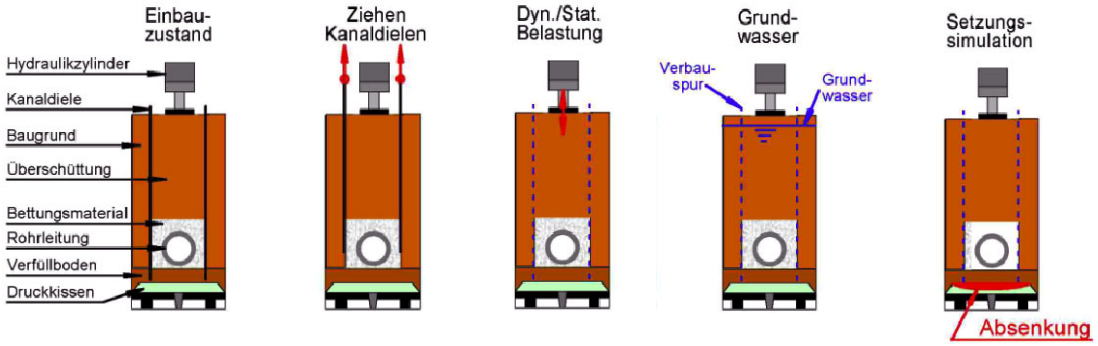


Bild 4.1 Geplantes Versuchskonzept – Draufsicht

Der Versuchsablauf gliederte sich in folgende Einzelphasen (vgl. Bild 4.2):



Phase 1 Phase 2 Phase 3 Phase 4 Phase 5

Bild 4.2 Schematische Darstellung der 5 Phasen des Versuchsablaufs

Phase 1: Einbauzustand

Phase 2: Ziehen der Kanaldielen

Phase 3: Zyklische/Statische Belastung

Phase 4: Simulation vom Grundwasseranstieg

Phase 5: Simulation von Sackungen

4.2 Versuchsaufbau und -durchführung

4.2.1 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 [1])
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 [2] 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 4.1 dargestellten Änderungen wurde ein Versuchsaufbau nach Bild 4.3 ausgeführt. Von einem rechteckigen Stahlbetonschacht DN 1200 aus wurden je Kammer 4 Versuchsrohre eingebaut. Als Rohrmaterial wurde duktiles Gusseisen nach DIN EN 598 [3] 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 Rohrma-

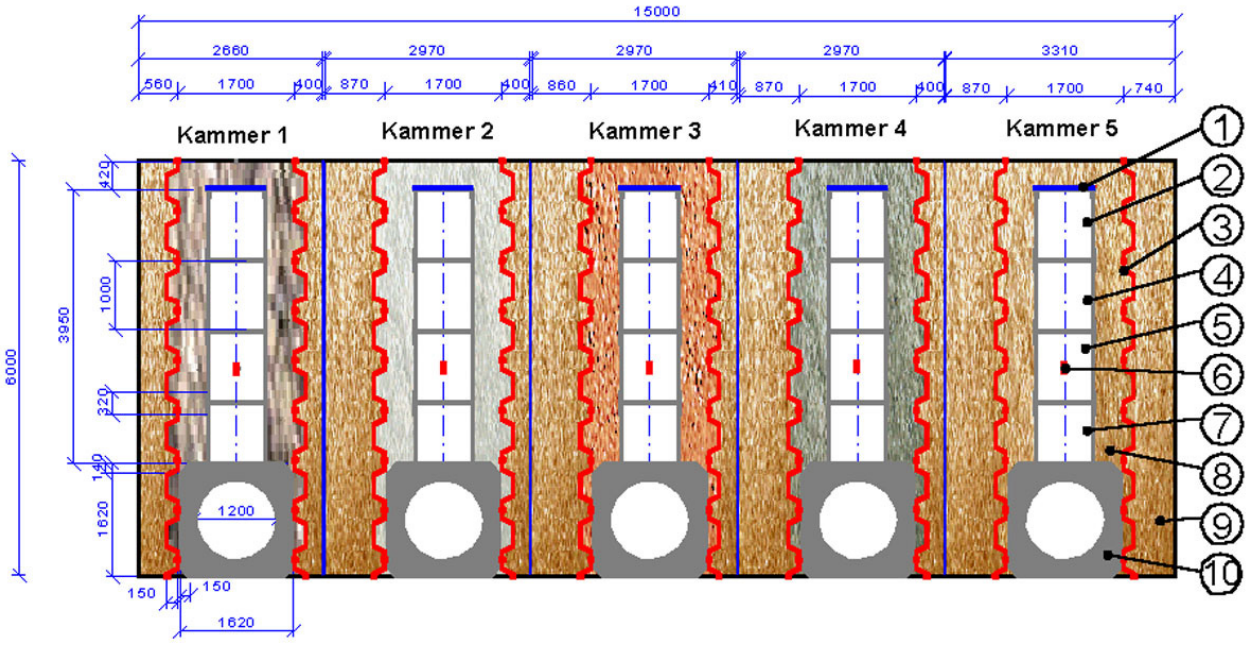
terials aus Stahl (St 37) hergestellt. Die Abmessungen der Gussrohre sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

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

Tabelle 2 Abmessungen der duktilen Gussrohre nach DIN EN 598 [3]

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 [1] mit 1,7 m gewählt.



1) Rohrverschluss	*4) Rohr mit Messstern*	*7) Rohr*	*10) Rechteck-Betonschacht*
2) DMS-Messrohr	*5) Druckfolien-Messrohr*	*8) Bettungsmittel*	
3) Leichtprofile	*6) Erddruckgeber*	*9) Seitenverfüllung*	

Bild 4.3 Aufbau der Kammern im Großversuchsstand – Draufsicht nach Verfüllen der Leitungszone, Beschriftung beispielhaft für Kammer 5 (Messtechnik vgl. Abschnitt 5.2.2)

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. [4]).

In den Kammern 1 bis 5 wurden folgende Bettungsmittel verwendet:

Kammer 1: Mineralgemisch (**MGM**)

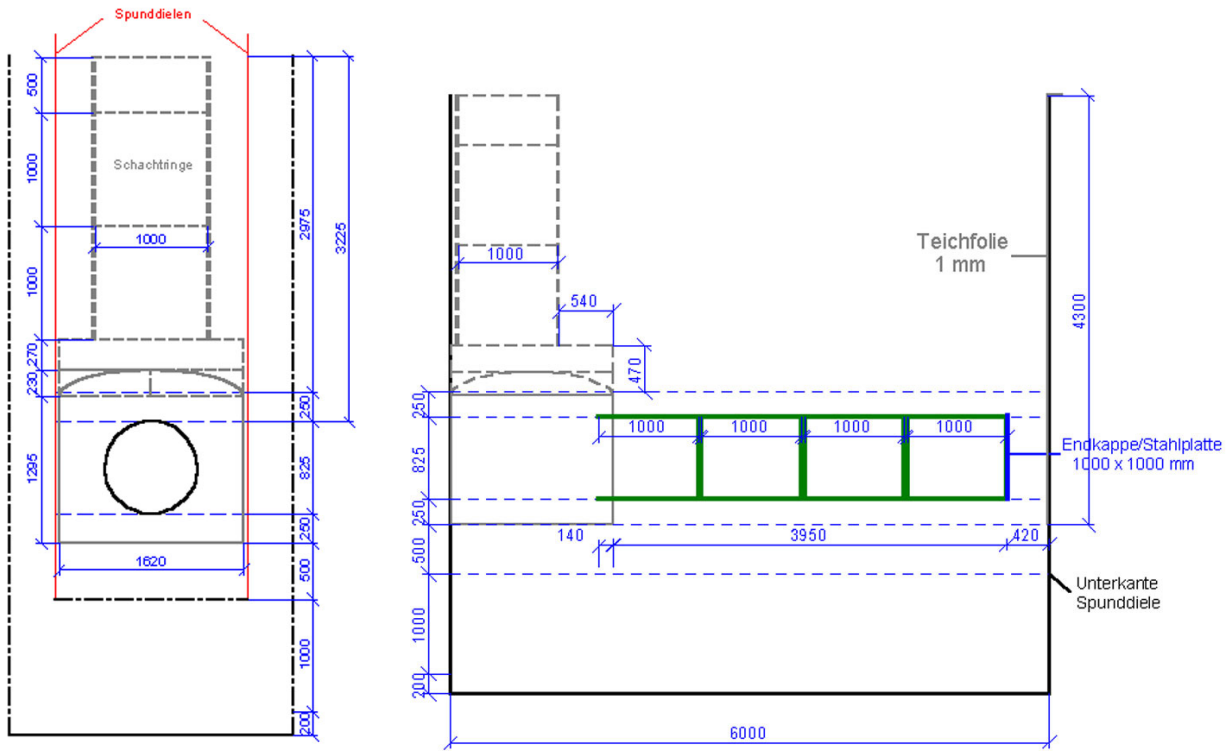
Kammer 2: Weimarer Boden-Mörtel® (**WBM**)

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 4.4 dargestellt.



a) Kammer – Querschnitt *b) Kammer - Längsschnitt*

Bild 4.4 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 Sackungen ein Druckkissen eingebaut.

4.2.2 Messtechnik

4.2.2.1 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 die wichtigsten Systeme detailliert beschrieben.

4.2.2.2 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 4.5 Messstern

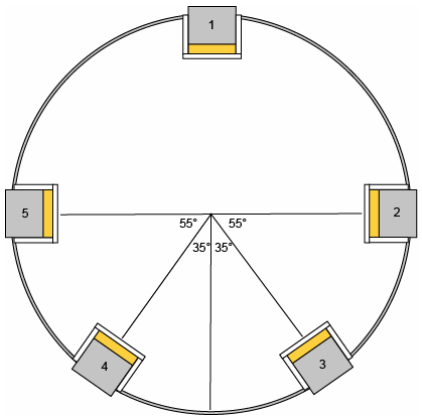


Bild 4.6 Anordnung der kleinen Lastplatten am Rohrumfang

Die Lastplatten wurden in den kennzeichnenden Punkten eines Rohres eingebaut, im Scheitel, Kämpfer und Zwickelbereich (Bild 4.6). 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 Feinstmanometer wurde ein Pneumatikzylinder mit Kolbendurchmesser d_{Pneu}=172,7 mm mit Druckluft beaufschlagt. Der Kolben des Pneumatikzylinders war starr mit dem Kolben eines Hyd-

raulikzylinders (im weiteren Umwandler genannt) mit Kolbendurchmesser d_{Hyd}=50 mm verbunden (Bild 4.7). Durch den kleineren Durchmesser des Hydraulikzylinders wird der Luftdruck in einen höheren Hydraulikdruck im Hydraulikzylinder übersetzt. 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 4.7). 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.

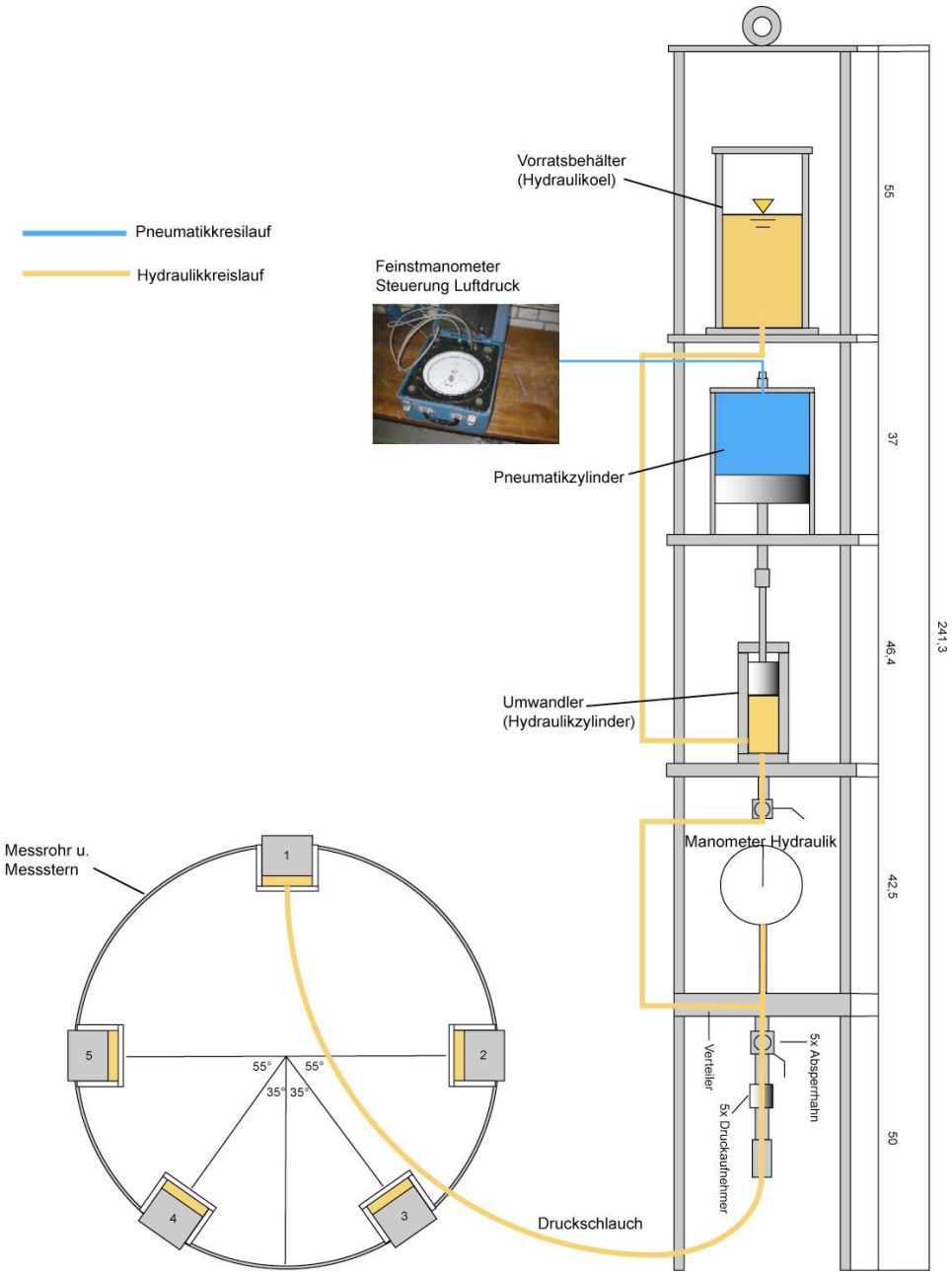


Bild 4.7 Prinzipskizze Messstern und Messturm

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 aufgezeichnet. 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.

4.2.2.3 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 4.8).

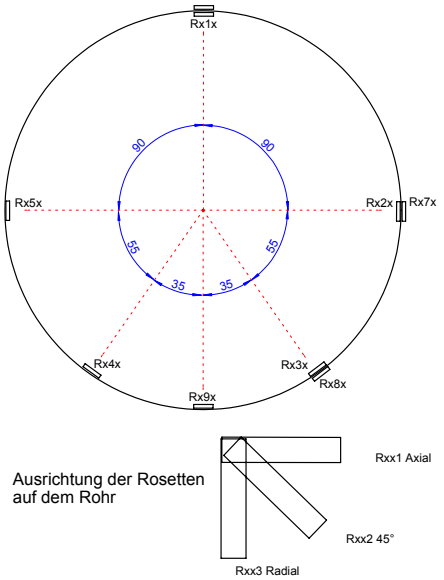


Bild 4.8 Lage der Dehnungsstreifen im Rohrquerschnitt

Die Messwerterfassung war auf eine Frequenz von 2 Hz eingestellt und lief während der gesamten Versuchsdauer.

4.2.2.4 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 [5].

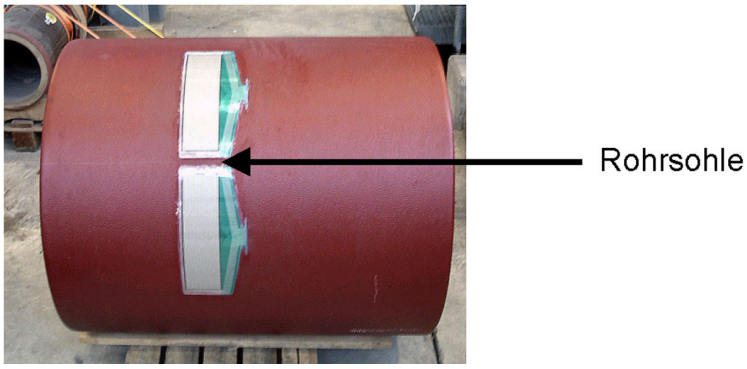


Bild 4.9 Anordnung der Spannungsmessfolien am Versuchsrohr

Die Folien wurden gemäß Bild 4.9 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).

4.3 Versuchsergebnisse und -auswertung

4.3.1 Dehnungsmessungen in 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 Werte aus der Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 [6]. Die Annahmen für die statische Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 [6] sind in Tabelle 3 zusammengefasst. 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 [6] 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.

Tabelle 3 Annahmen für die statische Berechnung nach ATV-DVWK-A 127 [6]

	Ausgangszustand	Zyklische Belastung	Statische Belastung	Grundwasser
Rohr	Duktiles Gusseisen, D_I = 821 mm, Wanddicke = 14 mm, E-Modul = 170.000 N/mm^2			
Überdeckungs-höhe	3,2 m			
Grabenbreite	1,7 m			
Auflagerwinkel	2 x α = 120°			
Grabenverbau	Leichtprofile mit 0,5 m Unterrammung			
Einbettungs-bedingung	B 3: Senkrechter Verbau innerhalb der Leitungszone mit Spundwänden und Verdichtung gegen den Verbau. Die Spundwände werden bis unter die Rohrsohle eingerammt.			
Überschüttungs-bedingung	A3: Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Spundwänden, Holzbohlen, Verbauplatten oder -geräte, die erst nach dem Verfüllen entfernt werden.			
Bodengruppe	G1: Kies-Sand-Gemisch in der Leitungszone und als anstehender Boden			
Verkehrslast	-	SLW 60	-	-
Flächenlast	-	-	50 kN/m^2	
Grundwasser	-	-	-	2 m über Rohrscheitel

Phase 1: Einbauzustand

Der Einbauzustand war mit Einbau der Überschüttung abgeschlossen. Hier konnten in Kämpfer, Scheitel und Sohle des Messrohres Randfaser-Dehnungen gemäß Tabelle 4 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 µm/m. Die fließfähigen Verfüllmaterialien (Kammer 2 und 4) verhielten sich beide ähnlich.

Phase 2: Dielenziehen

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 4.10 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.

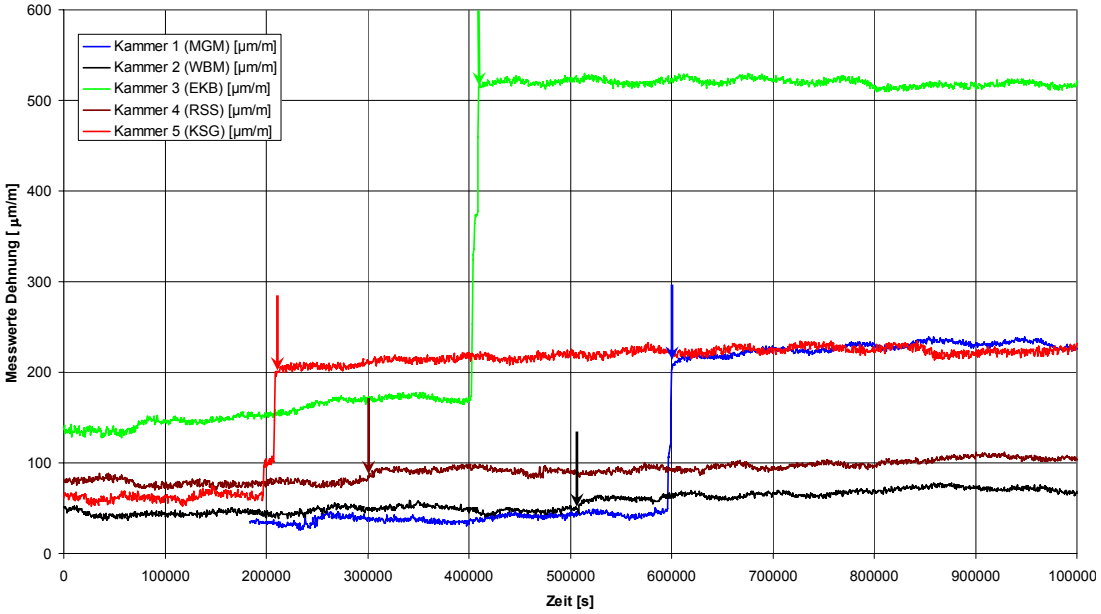


Bild 4.10 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m]
(Phase 2: Dielenziehen, DMS Sohle Innen)

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.

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.

<u>Phase 3: Zyklische und statische Belastung</u>

Im Bild 4.11 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/m^2 und bei der statischen Belastung etwa 50 kN/m^2.

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 Dehnungszu-

nahme. Bei den Schüttgütern stellte sich bereits bei der zyklischen Belastung eine Dehnungszunahme aus dem statischen Anteil der zyklischen Belastung ein. Nach der Entlastung ist kein Rückgang der Dehnungen festgestellt worden, d.h. die ermittelten Dehnungen sind bleibende Dehnungen.

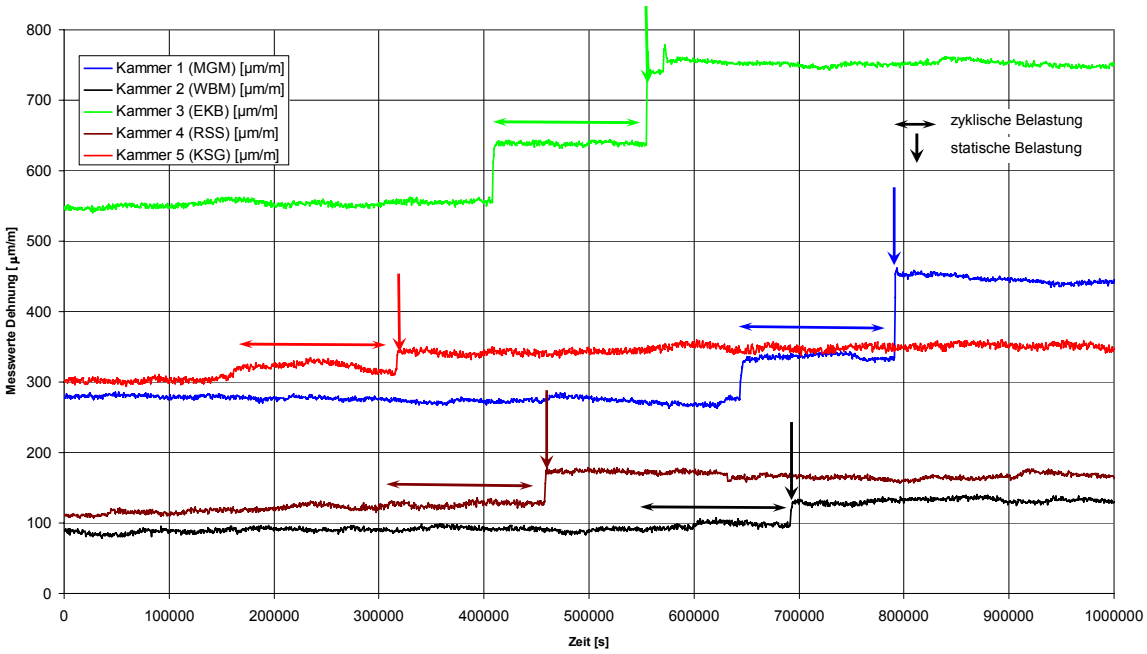


Bild 4.11 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m]
(Phase 3: Zyklische und statische Belastung, DMS Sohle Innen)

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.

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 4.12 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 Ab-

senkvorgangs. 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 %.

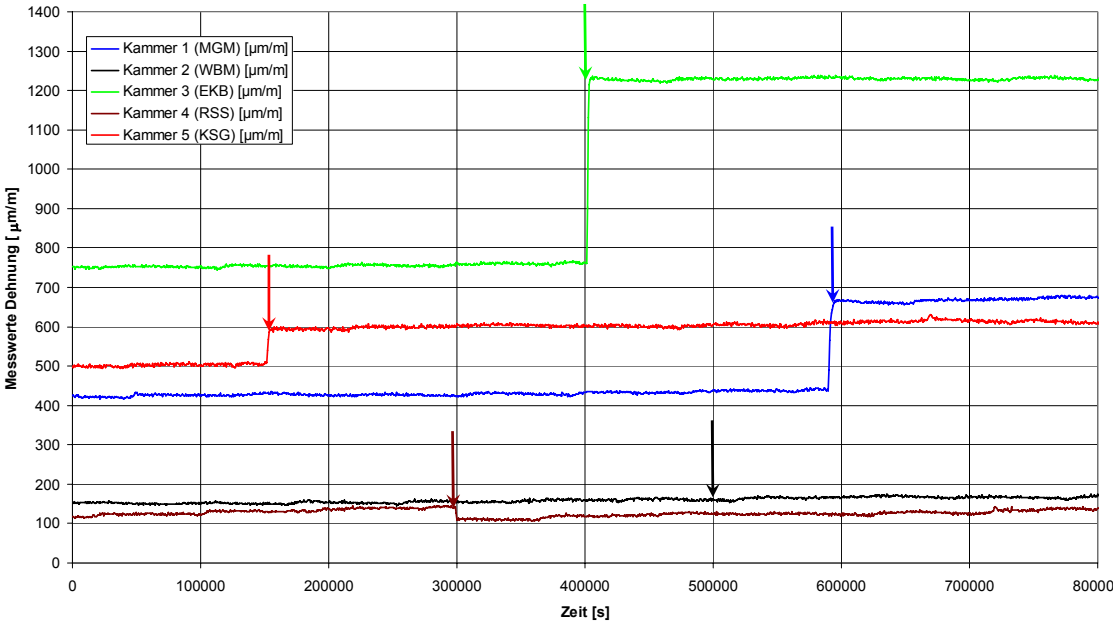


Bild 4.12 Messwerte der Dehnungen in den fünf Kammern [µm/m]
(Phase 5: Absenkung, DMS Sohle Innen)

Zusammenfassung

Um einen übersichtlichen Vergleich der gemessenen Dehnungen zu ermöglichen, wurden in Tabelle 4 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 [6] herangezogen. Für die Phasen 1 und 5 sieht das ATV-DVWK-A 127 keine Berechnungsmöglichkeiten vor. Daher sind hierfür auch keine Referenzwerte hinterlegt.

In der **Phase 1** ergaben sich Dehnungen zwischen 115 und 169 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.

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.

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 µm/m vergleichsweise gering aus. Bei KSG und MGM wurden Zuwächse von 150 bis 250 µm/m gemessen, während bei EKB der Messwert um etwa 450 µm/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.

Tabelle 4 Maximale Dehnungen des Messrohres in allen Phasen bezogen auf die Berechnungswerte

		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]	[%]
Phase 1 (Einbau)	Dehnung	115	-	60	-	169	-	107	-	137	-	-	-
	Ort	Scheitel (A)*		Scheitel (I)*		Sohle (I)		Scheitel (I)		Sohle (A)		-	
Phase 2 (Dielenziehen)	Dehnung	263	41	79	14	515	81	105	18	266	42	635	100
	Ort	Kämpfer (I)		Scheitel (I)		Sohle (I)		Scheitel (I)		Kämpfer (A)		Sohle (I)	
Phase 3.1 (Zyklik)	Dehnung	346	40	104	12	640	75	136	18	363	42	858	100
	Ort	Kämpfer (A)		Sohle (I)		Sohle (I)		Sohle (I)		Kämpfer (A)		Sohle (I)	
Phase 3.2 (Statik)	Dehnung	447	39	133	12	750	67	172	15	399	36	1127	100
	Ort	Sohle (I)		Sohle (I)		Sohle (I)		Sohle (I)		Kämpfer (A)		Sohle (I)	
Phase 4 (Grundwasser)	Dehnung	430	57	150	20	775	103	163	21	522	69	754	100
	Ort	Kämpfer (A)		Sohle (I)		Sohle (I)		Scheitel (I)		Kämpfer (A)		Sohle (I)	
Phase 5 (Absenkung)	Dehnung	669	-	193	-	1232	-	195	-	681	-	-	-
	Ort	Sohle (I)		Scheitel (I)		Sohle (I)		Scheitel (I)		Kämpfer (A)		-	

* (I) = Innen / (A) = Außen

4.3.2 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.

4.3.2.1 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.

Material	Dichteänderung [%]					
	seitliche Bettungsschicht		obere Bettungsschicht		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		-1,03		-2,3	
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
	8,65		7,40		6,39	
MGM	2,000	1,686	2,025	1,761	1,992	1,902
	-18,62		-14,99		-4,73	

Tabelle 5 Dichteänderung der Bettungsmittel

In Tabelle 5 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. 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.

4.3.2.2 Triaxialversuche nach DIN 18137

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 bewährte Verfahren, bei dem die Tangentensteifigkeit bei 50% der Bruchlast E_{T50} (max. σ_1-σ_3) angegeben wird, angewendet.

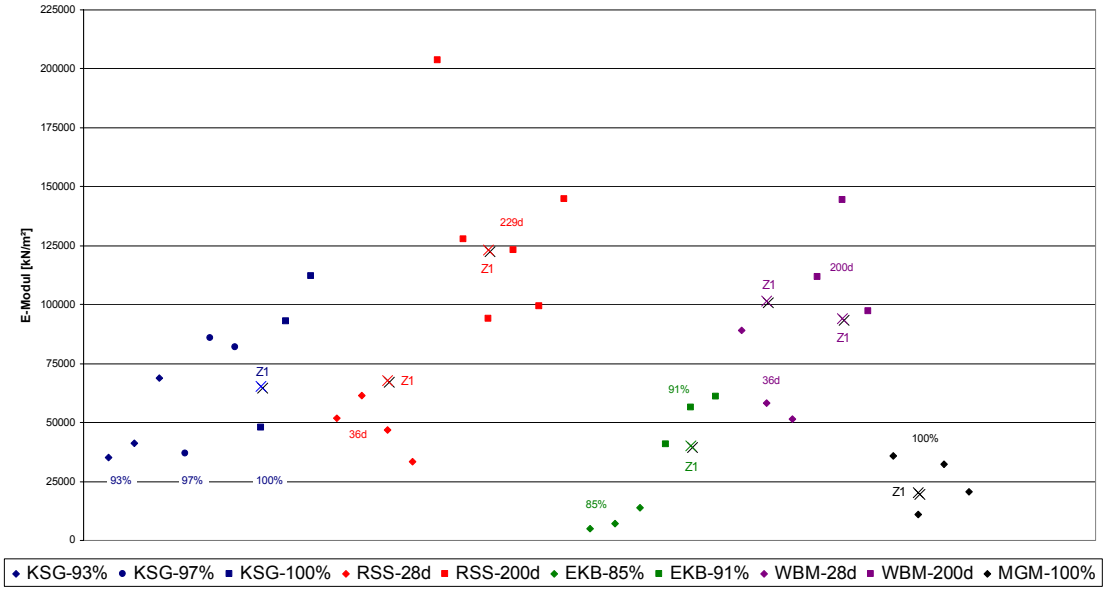


Bild 4.13 Verformungsmodul E_{T50} bei 50% der Bruchlast

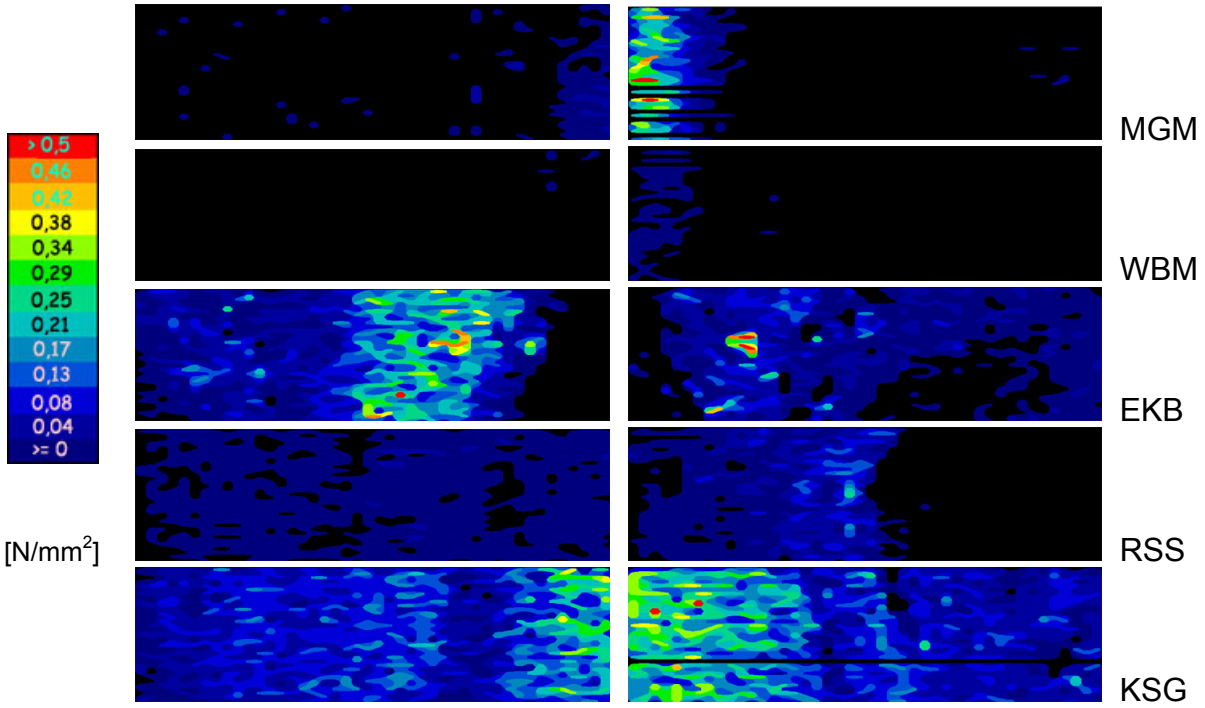
In Bild 4.13 sind die aus der Tangentensteifigkeit bei 50% der Bruchlast ermittelten Verformungsmoduln E_{T50} aller Böden dargestellt. Es fällt hier besonders die große Streuung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Einbaudichte oder des Probenalters auf. Das deutlich weichere Verhalten von MGM (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 Großversuch 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.

4.3.3 Folienmessungen

Um Informationen über die Verteilung der Kontaktspannungen im Zwickelbereich der Versuchrohre zu erhalten, wurde in jeder Kammer ein Rohr im Sohlbereich (± 45°) mit Druckmessfolien bestückt (Bild 4.9). 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.

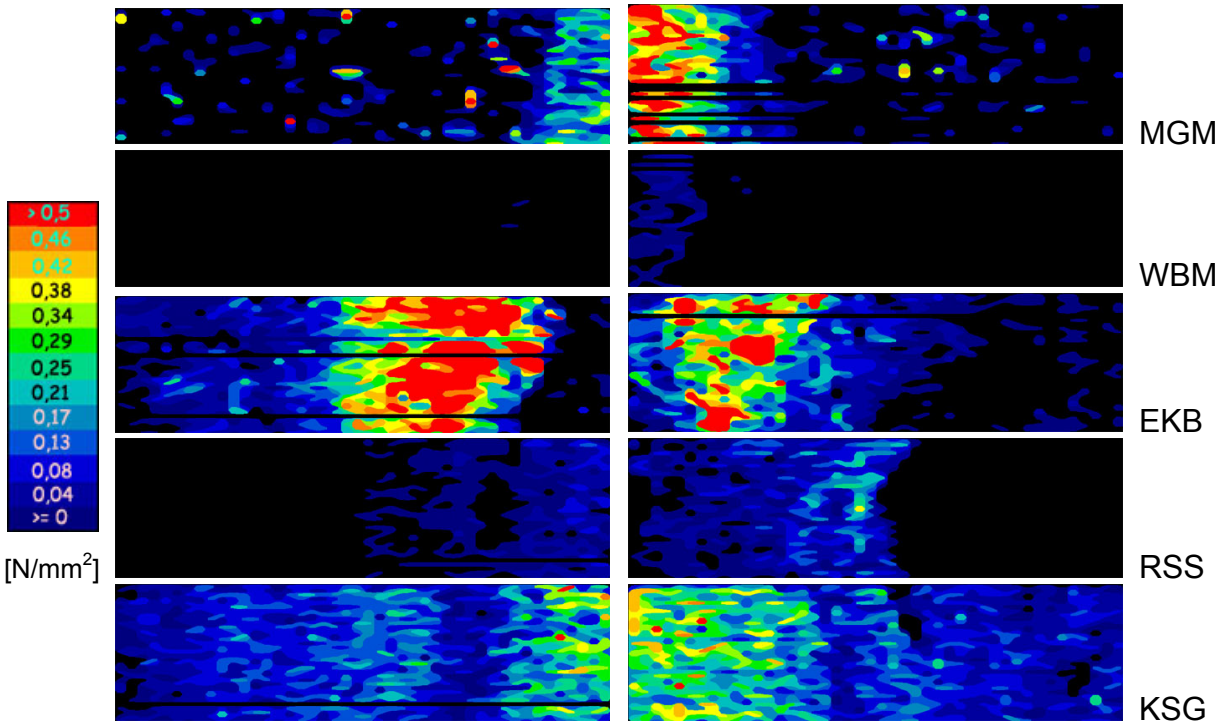
Bild 4.14 zeigt die nach Abschluss der Phase 1 (Einbau) aufgenommenen Spannungsverteilungen im Auflagerbereich der Versuchsrohre.



Zwickel Links *Rohrsohle* *Zwickel Rechts*

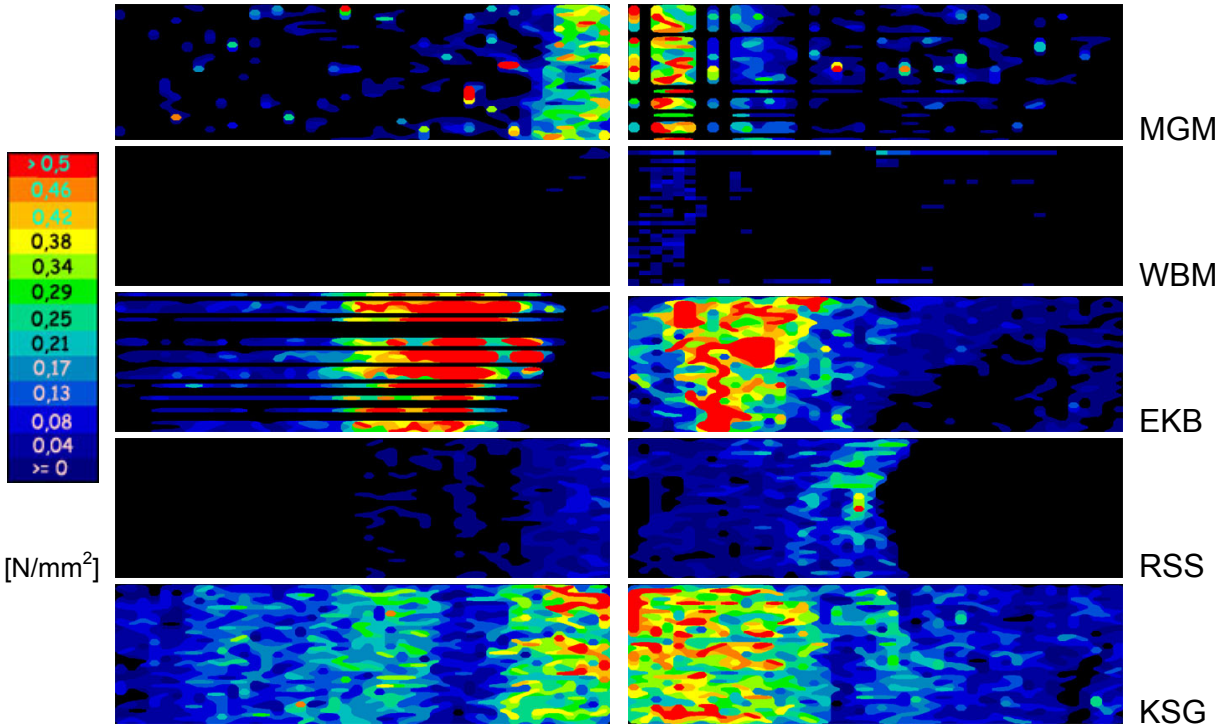
Bild 4.14 Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase I (Einbau)

Bei den Schüttgütern (KSG, MGM, EKB) waren deutliche Spannungskonzentrationen zu erkennen, mit Einzelwerten über 0,5 N/mm^2. 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 4.15). 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 4.16) zeigten sich kaum Veränderungen in den Auflagerspannungen. Durch Absenkung der Druckkissen in der Phase 5 fielen in allen Kammern die Kontaktspannungen nahezu vollständig ab. 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.



Zwickel Links *Rohrsohle* *Zwickel Rechts*

Bild 4.15 Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase 2 (Dielenziehen)



Zwickel Links *Rohrsohle* *Zwickel Rechts*

Bild 4.16 Foliendruckmessungen nach Abschluss der Phase 3 (Belastung)

4.3.4 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 4.17.

Um subjektive Einflüsse bei der Auswertung der Verformungsmoduln zu vermeiden werden die Druck-Setzungs-Linien in Anlehnung an [7] durch Polynome 2. Grades ausgeglichen:

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2$$

mit

σ_0	mittlere Normalspannung unter Lastplatte in MN/m²
s	Setzung der Lastplatte in mm
a_0, a_1, a_2	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

$$\begin{aligned}
a_0 \cdot n \quad &+ a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i} + a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^2 = \sum_{i=1}^{n} s_i \\
a_0 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i} &+ a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^2 + a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^3 = \sum_{i=1}^{n} s_i \cdot \sigma_{0i} \\
a_0 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^2 &+ a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^3 + a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i}^4 = \sum_{i=1}^{n} s_i \cdot \sigma_{0i}^2
\end{aligned}$$

nach der Methode der Minimierung der Fehlerquadrate berechnet.

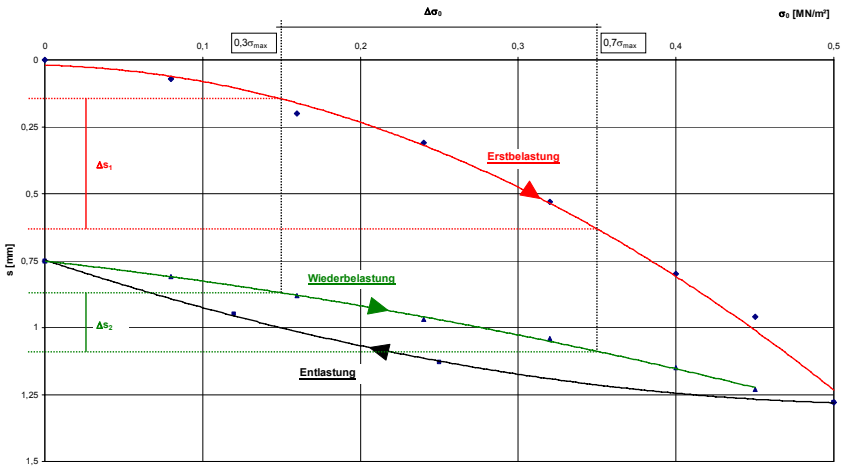


Bild 4.17 Ergebnis eines Plattendruckversuchs

Der Verformungsmodul errechnet sich dann aus der Neigung der Sekante zwischen den Punkten $0{,}3\sigma_{max}$ und $0{,}7\sigma_{max}$ nach:

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

mit

d	Plattendurchmesser [mm]
σ_{0max}	maximale Spannung [MN/m²]
a_1, a_2	Parameter des Polynoms 2. Grades

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.

4.3.4.1 Einbauzustand

KSG

Die Versuchsergebnisse der Messungen während des Einbauzustandes (Phase1) lassen 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.

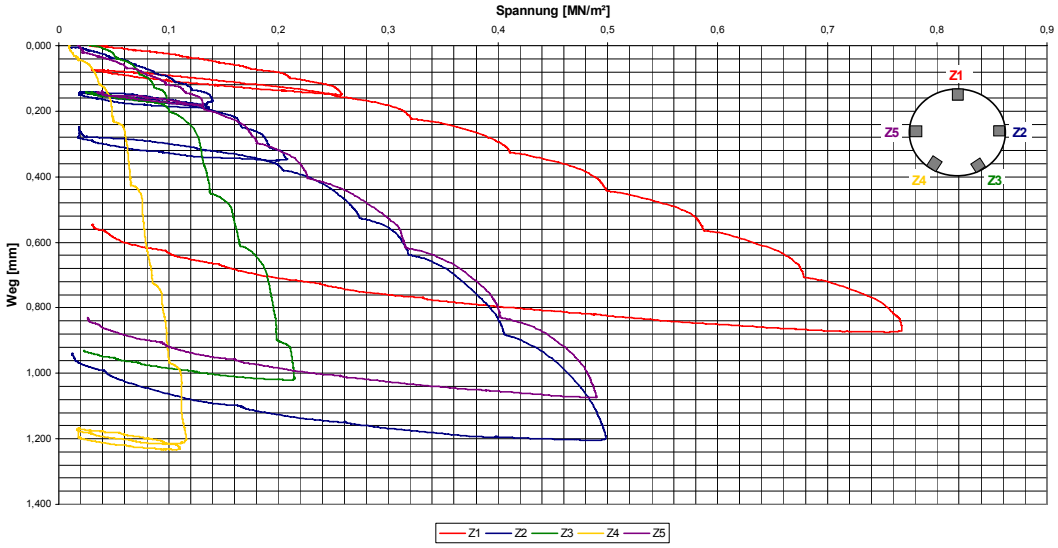


Bild 4.18 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand KSG

Die Dehnungsmessungen bestätigen dieses Bild. Die Dehnungen am Rohrumfang sind ungleichförmig, so werden in der Außenrandfaser des Kämpfers mit 135 µm/m die

größten Dehnungen gemessen, während in der Sohle 71 µm/m aufgezeichnet wurden (Ovalisierung). In den Zwickeln werden ebenfalls unterschiedliche Dehnungen gemessen. Im Zwickel rechts (Z3) werden an der Innenrandfaser des Rohres mit 90 µm/m dreimal so hohe Dehnungen ermittelt, wie im gegenüberliegenden Zwickel mit 30 µm/m. Auch die Folienmessungen (Bild 4.14) 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 MN/m² bestimmt.

Die Dehnungsmessungen 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 4.14) deuten auf eine gleichmäßige Spannungsverteilung mit gleichmäßigen Kontaktspannungen in den Zwickeln hin.

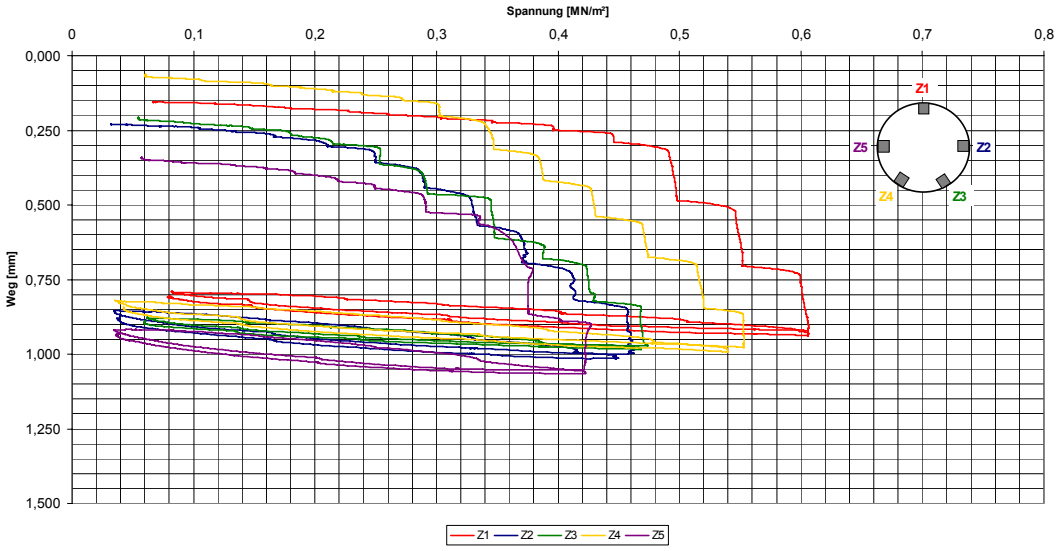


Bild 4.19 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand RSS nach 28d

EKB

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.

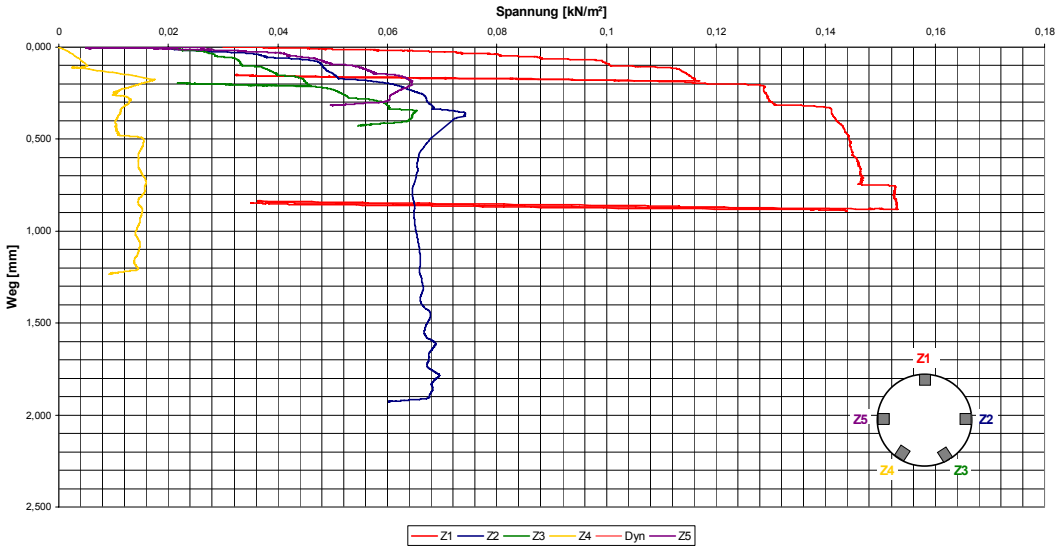


Bild 4.20 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand EKB

Die ungleichmäßige Bettung des Rohres wird durch die Dehnungsmessungen 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. Die Folienmessungen (Bild 4.14) 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.

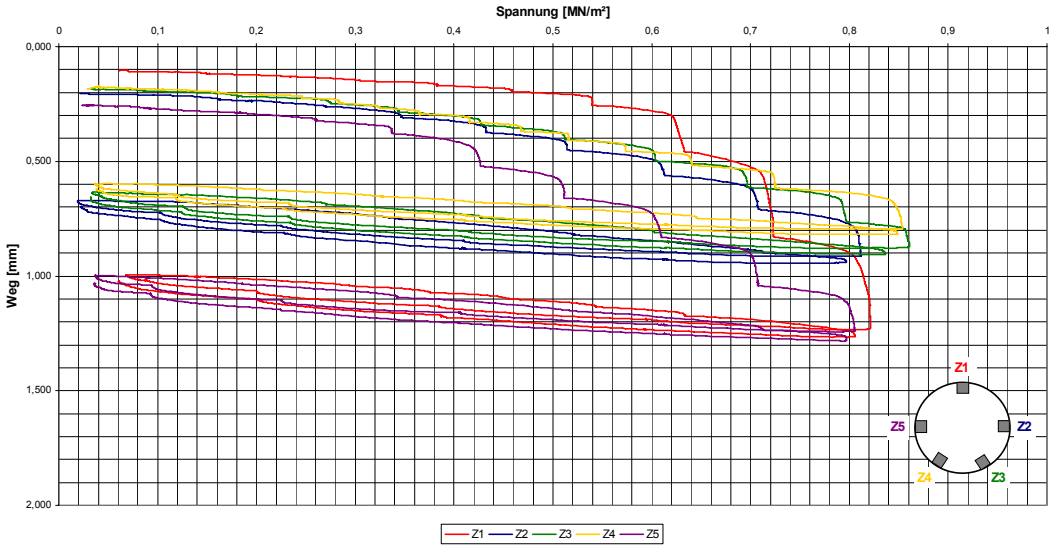


Bild 4.21 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand WBM nach 28d

Die DMS Messungen belegen die gleichmäßige Bettung des Rohres. 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 µm/m sehr gering. 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 geringe 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.

Die DMS-Messung lässt ebenfalls die ungleichmäßige Bettung des Rohres erkennen. Im linken Zwickel wird mit 27 µm/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.

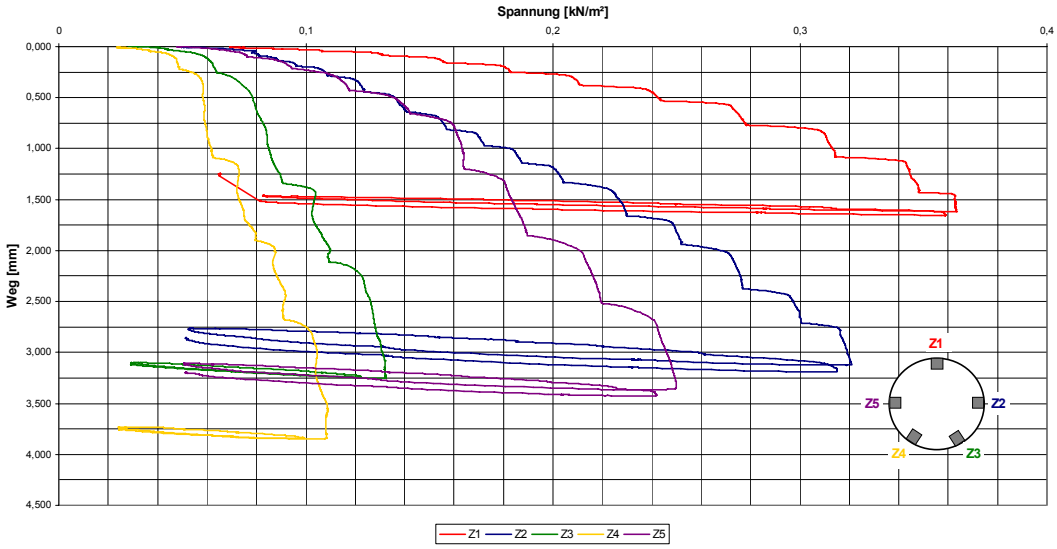


Bild 4.22 Last-Setzungsdiagramm Einbauzustand MGM

Vergleichende Bewertung der Materialien im Einbauzustand (Phase1)

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

- $0{,}85 < \frac{E_{vi}}{E_{vj}} < 1{,}18$ 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.

Material	Verhältnis $E_{v1\text{-}Z1} / E_{v1max}$	Verhältnis $E_{v1\text{-}Z2} / E_{v1max}$	Verhältnis $E_{v1\text{-}Z3} / E_{v1max}$	Verhältnis $E_{v1\text{-}Z4} / E_{v1max}$	Verhältnis $E_{v1\text{-}Z5} / E_{v1max}$	Mittel	Gesamtbewertung
KSG	1,00	0,63	0,21	0,00	0,60	0,49	stark streuend
RSS	1,00	0,83	0,95	0,97	1,00	0,95	sehr gut
EKB	0,62	0,24	0,21	0,00	0,43	0,30	stark streuend
WBM	0,94	0,96	0,99	1,00	0,54	0,89	sehr gut
MGM	1,00	0,27	0,12	0,04	0,28	0,34	stark streuend

Tabelle 6 Auswertung der Gleichmäßigkeit der Bettung

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

4.3.4.2 Ziehen der Spunddielen

KSG

Das Ziehen der Spunddielen bewirkt eine Auflockerung in der Leitungszone. In den Kämpfern tritt eine neue Erstbelastung auf (Bild 4.23), 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. Der Bettungsverlust wird von den Dehnungsmessungen ebenfalls bestätigt. An der Randinnenfaser der Rohrsohle (180°-I) ist ein Dehnungszuwachs von 280% 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 Einbauzu-

standes 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 4.15) 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.

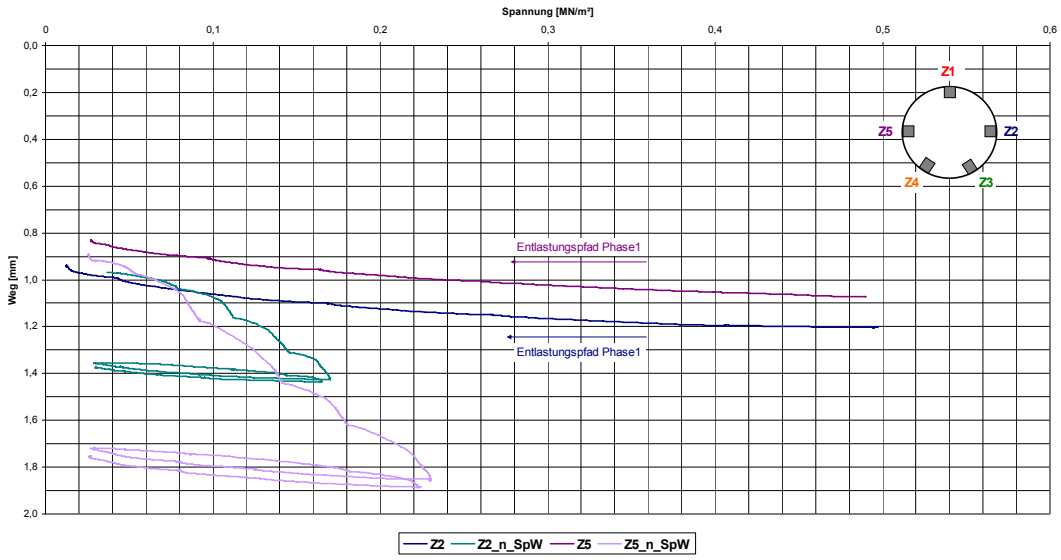


Bild 4.23 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Kämpfer KSG

RSS

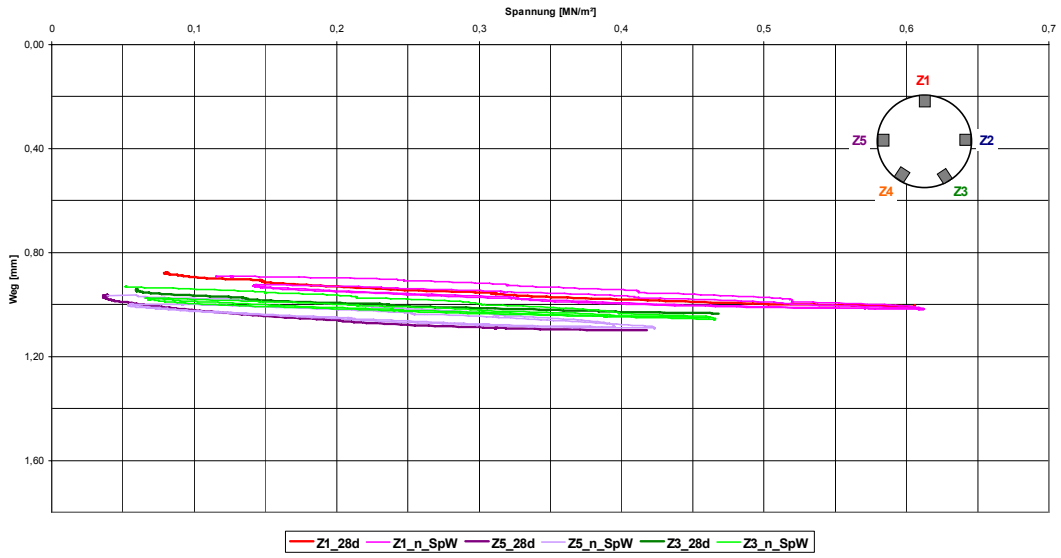


Bild 4.24 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel/Kämpfer/Zwickel RSS

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. 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. 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.

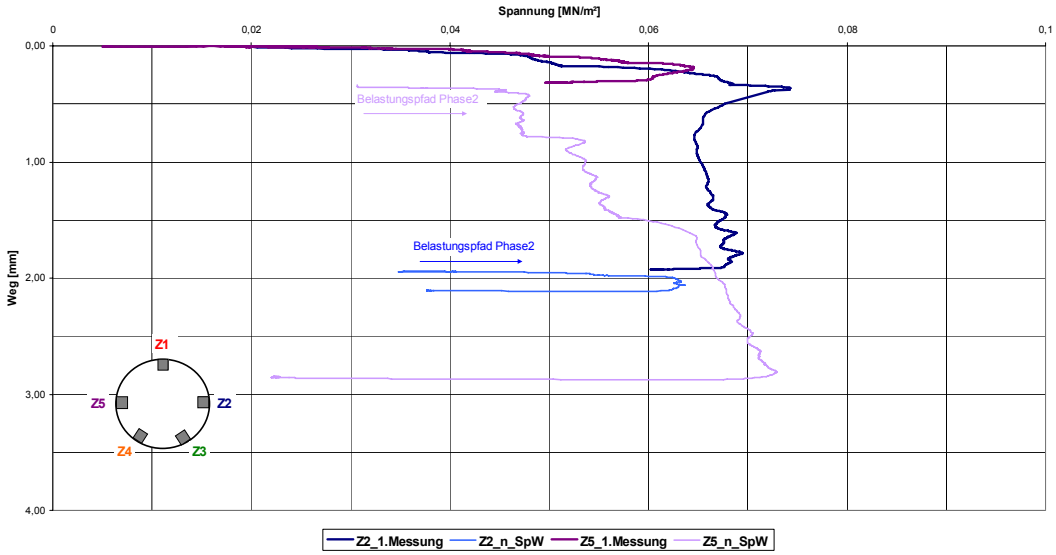


Bild 4.25 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Kämpfer

Die Auflockerung und damit verbundene Änderung der Rohrbettung wird durch die Dehnungsmessungen 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. 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 Ver-

baus um das 1,5 fache zu. Die Lastkonzentration in der Rohrsohle lässt sich anhand der Folienmessung (Bild 4.15) ebenfalls nachweisen. Hier sind bei EKB deutliche Erhöhungen der Kontaktspannungen in Nähe der Rohrsohle aufgetreten.

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. 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.

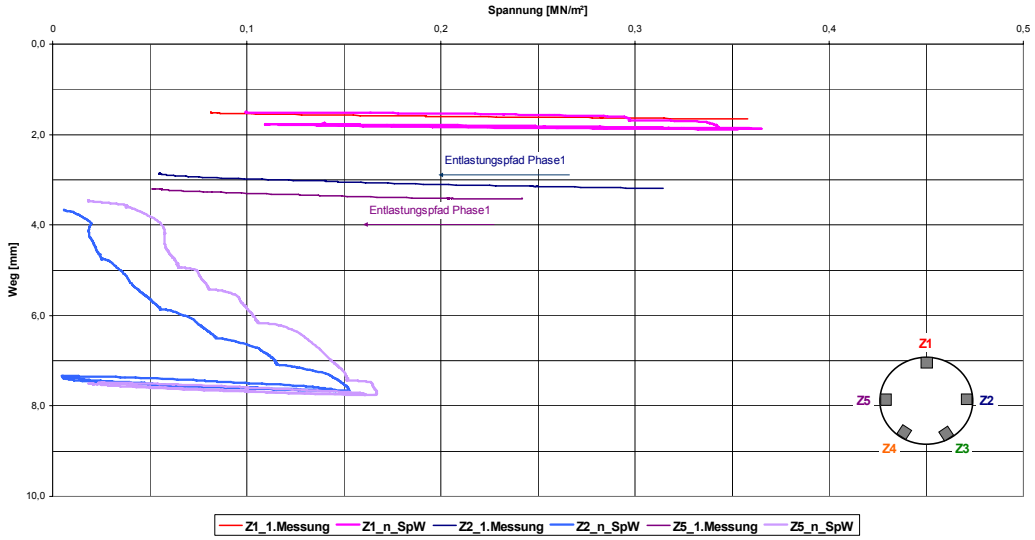


Bild 4.26 Last-Setzungsdiagramm nach Ziehen der Spundwand, Scheitel / Kämpfer MGM

Ein deutlicher Anstieg der Stauchungen in den Kämpfern des Rohres ist anhand der DMS-Messungen 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 Deh-

nungen 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 Rohres auf den Bereich der Rohrsohle wird anhand der Folienmessungen (Bild 4.15) bestätigt, hier zeigt sich die deutliche Erhöhung der Kontaktspannungen in der Rohrsohle.

Vergleichende Bewertung der Materialien nach Ziehen der SpW (Phase 2)

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.

In Tabelle 7 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 7 Bewertung des Einflusses des Ziehens der Spunddielen auf die Bettung der Rohre

4.3.4.3 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 Lei-

tungszone 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.

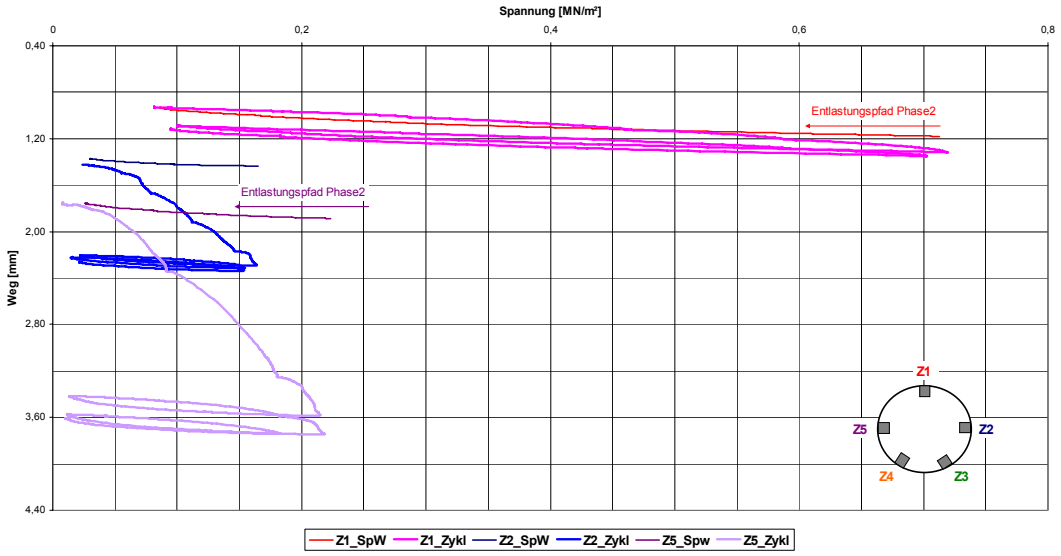


Bild 4.27 Last-Setzungsdiagramm nach zyklischer-statischer Belastung Scheitel / Kämpfer KSG

Die Dehnungsmessungen 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 4.16) zeigt eine geringe Erhöhung der Kontaktspannungen in Nähe der Rohrsohle an.

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.

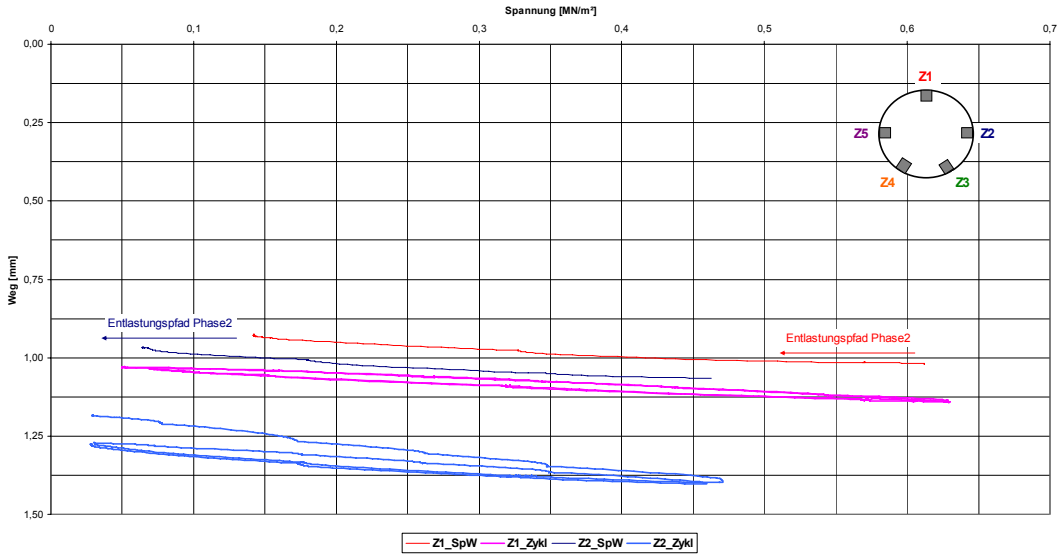


Bild 4.28 Last-Setzungsdiagramm nach zyklisch /statischer Belastung Scheitel / Kämpfer RSS

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. 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 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 µm/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.

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 Ver-

änderung 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. Die DMS-Messungen zeigen bei MGM mit 70% den größten Dehnungszuwachs an. 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 4.16) zeigen auch bei MGM keine Änderung der Kontaktspannungen im Zwickelbereich an.

<u>Vergleichende Bewertung der Materialien bei Verkehrslasten</u>

Material	Verhältnis $E_{v\ zykl}$/ $E_{v2\ SpW}$				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 8 Bewertung des Einflusses der zyklischen/statischen Belastung auf die Bettung der Rohre

In Tabelle 8 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.

4.3.4.4 Simulation von Grundwasserspiegelveränderungen

KSG

Die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus zeigen eine erneute Auflockerung der Leitungszone im Kämpferbereich nach Veränderung des Grundwasserspiegels. 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 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.

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 Rohrsohle 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.

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. Die DMS-Messungen 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 4.29), 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.

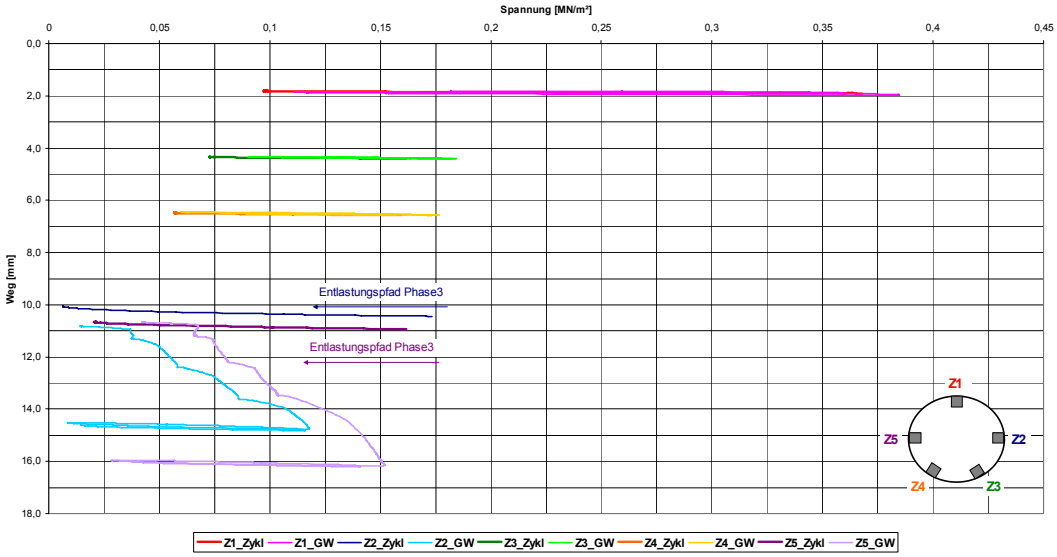


Bild 4.29 Last-Setzungsdiagramm nach GW MGM

Vergleichende Bewertung der Materialien bei GW-Spiegeländerung

In Tabelle 9 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. Für EKB können keine zuverlässigen Aussagen über evtl. Änderungen der Bettung getroffen werden.

Material	Verhältnis $E_{v\,GW}$/ $E_{v2\,zykl}$				Bewertung
	Z2	Z3	Z4	Z5	
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 9 Bewertung des Einflusses der Grundwasserspiegel Veränderung auf die Bettung der Rohre

4.3.4.5 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 vollkommen 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. 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 zeigt nunmehr nahezu keine Kontaktspannungen zwischen Rohr und oberer Bettungsschicht an und verifiziert somit die Lastplattendruckversuche aus dem Rohr heraus.

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 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.

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.

Die DMS-Messungen 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 μm/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.

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 µm/m, dies entspricht einer mehr als 80% geringeren Rohrdehnung als z.B. 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. Die Dehnungsmessungen 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 bestätigt die infolge Absenkung fehlende Bettung im Zwickelbereich, es werden keine Kontaktspannungen mehr angezeigt.

Vergleichende Bewertung der Materialien bei Sackungen

In Tabelle 10 sind die Quotienten der Verformungsmoduln nach Absenkung der Druckkissen in Relation zum Verformungsmodul vor der Absenkung aufgeführt.

Material	Verhältnis $E_{v\,Kissen}$ / $E_{v2\,GW}$				Bewertung
	Z2	Z3	Z4	Z5	
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 10 Beurteilung der Bettung nach Ablassen der Druckkissen

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. Bei Betrachtung der Halbschale nach Ausbau des Rohrstrangs ist jedoch deutlich eine Sackung 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.

4.3.4.6 Zusammenfassende Bewertung der Materialien

In Tabelle 11 werden die untersuchten Bettungsmittel hinsichtlich der zentralen Fragestellung, ob sie im Versuch eine gleichmäßige Bettung des Rohrstrangs während des Einbauzustandes 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)	
	Bettung	Rohrbeanspruchung
KSG	-	x
RSS	++	xx
EKB	--	x
WBM	++	xx
MGM	-	x

Tabelle 11 Bewertung Bettungseigenschaften in Phase 1

Die gleichmäßigste Bettung der Rohrstränge wurde bei den fließfähigen Bettungsmitteln festgestellt, hier traten infolge der guten Bettung auch die geringsten Rohrbeanspruchungen auf. Bei allen Schüttgütern wurde eine ungleichmäßige Bettung mit Ausfällen in den Zwickeln beobachtet. In folge der unzureichenden Bettung wurde zudem eine asymmetrische Rohrbeanspruchungen festgestellt.

Die Bewertung der Bettung nach Ziehen der Spunddielen und in den folgenden Versuchsphasen 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 Randbedingun-

gen 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	Ziehen Spunddielen (Phase 2)		zykl./stat. Belastung (Phase 3)		Simulation GW (Phase 4)		Simulation Sackung (Phase 5)	
	Bettung	Rohrbean-spruchung	Bettung	Rohrbean-spruchung	Bettung	Rohrbean-spruchung	Bettung	Rohrbean-spruchung
KSG	-	-	o	x	o	x	--	x
RSS	++	xx	+	x	++	xx	+	xx
EKB	-	-	o	x	o	xx	-	-
WBM	++	xx	+	x	++	xx	++	xx
MGM	o	-	o	-	o	xx	--	x

Tabelle 12 Bewertung der Bettungseigenschaften in Phasen 2-5

Das vorteilhafte Bettungsverhalten der fließfähigen Bettungsmittel gegenüber den Schüttgütern konnte in allen Versuchsphasen nachgewiesen werden. Insbesondere nach dem Ziehen der Spunddielen und nach Simulation von Sackungen ist das Bettungsvermögen der fließfähigen Materialien eindeutig positiv zu bewerten.

5 Ansätze für Bemessung und Qualitätssicherung

5.1 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 (2α)** widergespiegelt.

Auf Grundlage der ATV-DVWK-A 127 ist 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 $2\alpha=180°$ 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 werden, 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.

5.2 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 [1] 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. 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 reagie-

ren und damit auch das Risiko einer übermäßigen Beanspruchung der Rohrleitung entstehen kann.

Tabelle 13 fasst die wesentlichen Einflussfaktoren und daraus möglicherweise resultierende Risiken zusammen.

Einflussfaktor	KSG	EKB	MGM	RSS	WBM
Gewachsener Boden	Wechselwirkung zur Grabensicherung			Wassergehalte und –durchlässigkeit können sich auf das Abbindeverhalten auswirken	
Hitze, Trockenheit, Regen	Kaum Einfluss	Veränderung des Wassergehalts kann Materialeigenschaften beeinflussen		Veränderung des Wassergehalts kann die Abbindeeigenschaften beeinflussen	
Frost	Schlecht oder gar nicht verarbeitbar			Kaum Einfluss beim Einbau durch Temperierbarkeit, ggfls. längere Abbindezeit	
Lagerfläche	Ausreichende Lagerfläche auf der Baustelle erforderlich			Kein Einfluss bei Anlieferung im Fahrmischer	
Zuwege für Fahrzeuge	Kaum Einfluss, da Anlieferung im Container oder mit LKW und Einbau mit Greifer			Anlieferung meist im Fahrmischer, daher Anfahrtswege erforderlich oder Pumpwagen	
Hindernisse im Leitungsgraben	Unzureichende Verdichtung der Leitungszone durch eingeschränkte Zugänglichkeit			Kaum Einfluss	
Exzentrische Lage der Rohre im Graben	Unzureichende Verdichtung insbesondere im Zwickelbereich der Leitungszone durch eingeschränkte Zugänglichkeit			Kaum Einfluss	
Unterteilung in Bauabschnitte	Kaum Einfluss			Auf das Material abgestimmte Abschottung der Bauabschnitte erforderlich	
Rohrwerkstoff und Nennweite	ggf. Zusatzmaßnahmen bei leichten Rohren während der Zwickelverdichtung			Auf Rohrwerkstoff und Nennweite abgestimmte Maßnahmen zur Auftriebssicherung	
Anforderungen an Trasse und Gefälle	Ausbildung des Auflagerbereiches			Schaffen von geeigneten (ggf. punktuellen) Auflagern	
Nachträglicher Rückbau der Grabensicherung	Bei senkrechten Verbauelementen: Auflockerungen in der Leitungszone und im anstehenden Boden			Bei senkrechten Verbauelementen: Auflockerungen insbesondere im anstehenden Boden	
Rückbau der Grabensicherung parallel zur Grabenverfüllung	Verdichtung gegen Umgebungsboden erforderlich			Wechselwirkung zwischen anstehendem Boden und Verfüllmaterial im flüssigen Zustand ungewiss	
aggressives GW oder Boden	kaum Einfluss	Bedenklich bei CO_2-haltigem Wasser	Bedenklich bei Sulfaten	nicht untersucht, HS-Zement verwenden?	

Tabelle 13 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 Rückstellpro-

ben 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 (Pressiometer) 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.

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.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurden die aus Betreibersicht maßgeblichen Bettungsmittel im direkten Vergleich untersucht und entsprechende Bewertungsparameter und Messgrößen abgeleitet werden.

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 Bau-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.

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.

7 Literatur

[1] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. 10/1997.

[2] Sicherheitsregeln für Bauarbeiten unter Tage. Ausgabe 4/1977. Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Bonn.

[3] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gußeisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren. 1994.

[4] 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.

[5] Tekscan: Pressure Measurement System. User´s Manual. 11/1999.

[6] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen. 3. Auflage, 8/2000.

[7] DIN 18134, Plattendruckversuch. 1990.