

Heft 43: Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung

# EnEff:Wärme Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung

Herausgeber:

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V  
Stresemannallee 30, D-60596 Frankfurt am Main  
Telefon: +49 69 6304-200  
Telefax: +49 69 6304-391  
E-Mail: [h.huther@agfw.de](mailto:h.huther@agfw.de)  
Internet: [www.agfw.de](http://www.agfw.de)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) - Kennzeichen 03ET1063D - gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Verlag:

AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung,  
Information und Standardisierung mbH  
Stresemannallee 30, D-60596 Frankfurt am Main  
Telefon: +49 69 6304-416  
Telefax: +49 69 6304-391  
E-Mail: [info@agfw.de](mailto:info@agfw.de)  
Internet: [www.agfw.de](http://www.agfw.de)

Verkaufspreis:

EUR 15,00 zzgl. MwSt. für AGFW-Mitglieder  
EUR 33,00 ,00 zzgl. MwSt. für Nichtmitglieder  
Hochschulen und Lehre: Preis auf Anfrage

ISBN 3-89999-068-4

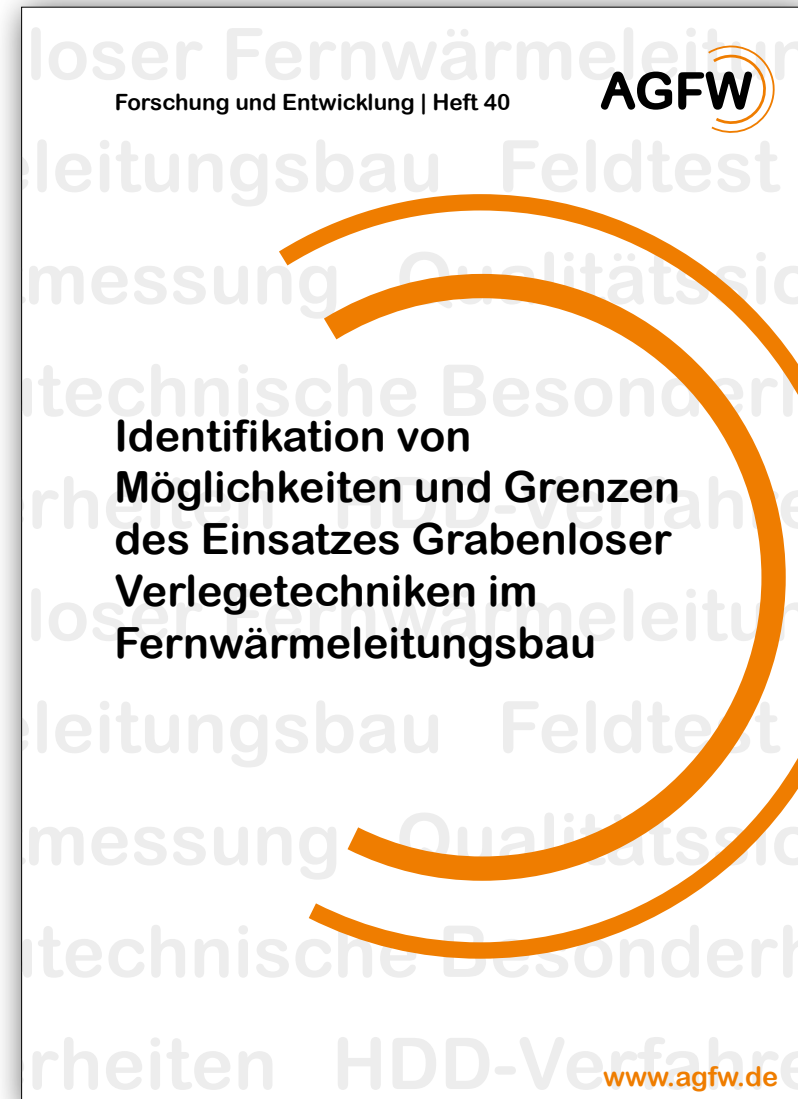
Hinweis:

Beim Inhalt der vorliegenden Publikation handelt es sich um den vom Projektträger freigegebenen Berichtstext der Zuwendungsempfänger. AGFW übernimmt keine Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung. Forschungsberichte stellen i.d.R. keine abgestimmte Branchenmeinung dar. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Trotzdem kann von den Autoren, den Herausgebern und dem Verlag keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der Herausgeber gestattet.

Juni 2017

© AGFW, Frankfurt am Main



**Bestellen Sie online  
unter [shop.agfw.de](http://shop.agfw.de)!**

**FE-Verbundvorhaben „EnEff:Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung - Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe zur KMR-Verlegung“**

# Schlussbericht

**EnEff:Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung - Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung in Gräben und Haubenkanälen (FKZ 03ET1063D)**

Projektkoordinator: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung,  
Information und Standardisierung mbH



Projektpartner: GEF Ingenieur AG



**EnEff:Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung - Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung, AP Bodenmechanik (FKZ 03ET1063B)**

Projektkoordinator: Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg  
- Fakultät Bauingenieurwesen -



**Laufzeit der Vorhaben: 01.06.2012 – 30.06.2016**

**Frankfurt 2017**

## **Vorwort des AGFW**

An der Schnittstelle zwischen Forschung und Fernwärmebranche übernimmt der **AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.** durch die Bereitstellung der Ergebnisse von öffentlich geförderten Forschungsprojekten Verantwortung. Im Rahmen der Veröffentlichungsreihe „Forschung und Entwicklung“ werden branchenrelevante Abschlussberichte bereitgestellt.

Im Rohrleitungsbau wird in regelmäßigen Abständen von den Vorzügen bei der Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterialien, kurz ZFSV berichtet. Dabei sprechen Argumente der Wirtschaftlichkeit, Bauzeit, Flexibilität und Verdichtung stark für deren Verwendung. Im Gegensatz dazu steht der Anwender vor der Problematik, unter einem vielfältigen Angebot auswählen zu müssen. Anwender fragen sich, welche Rezepturen und Verfahren langfristig tatsächlich die gewünschten Eigenschaften am Rohr und im Graben liefern. Hinsichtlich der erforderlichen Rohrstatik von Fernwärmeleitungen kommen noch Fragestellungen nach den Reibungskräften, Bettungsdrücken, Verfestigungszeiten und Langzeiteigenschaften hinzu, die bisher für Fernwärmeleitungen noch nicht wissenschaftlich untersucht wurden.

Diese Themen wurden durch das Verbundforschungsvorhaben „EnEff:Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung – Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe zur KMR-Verlegung“ mit dem Förderkennzeichen 03ET1063D, welches das Arbeitspaket Bodenmechanik (FKZ 03ET1063B) beinhaltet, in einem Verbund von AGFW, der Ostbayrischen Technischen Hochschule Regensburg (OTH.R), Fakultät Bauingenieurwesen und der GEF Ingenieur AG bearbeitet. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) hat das Projekt ebenso wie AGFW Mitgliedsunternehmen finanziell unterstützt.

Erstmalig konnten dank der großen Unterstützung der Mainova AG in Frankfurt eine reine Forschungsbypassleitung mit ZFSV realisiert werden, die auch nach dem Projektende weiter betrieben wird. Neben der Prüfung grundlegender Materialeigenschaften wurden in diesem Projekt auch kleinmaßstäbliche und größere Laborversuche sowie ein Feldversuch durchgeführt. Daraus konnten Beanspruchungen der KMR abgeleitet werden, die bei der Auslegung von Fernwärmetrassen von Bedeutung sind.

Die umfangreich erfassten realen Messwerte (z.B. Temperaturen, Verschiebungen, Drücke, Feuchte) der in ZFSV gebetteten Kunststoffmantelrohre (KMR) werden einer, unter ansonsten gleichen Bedingungen, konventionell in Sand gebetteten Rohrleitung gegenübergestellt. Diese Forschungsleitung wird über das Forschungsvorhaben hinaus vom AGFW betrieben und bietet jetzt und auch zukünftig das Potential, weitere anwendungsrelevante Fragestellungen zu untersuchen.

Durch einen ausgearbeiteten Vorschlag für ein Muster-Leistungsverzeichnis und einer erklärenden Zusammenstellung der wichtigsten weiterführenden Informationen zum Thema ZFSV in der Fernwärme, inklusive detaillierter Erläuterungen zu notwendigen Qualitätssicherungsmaßnahmen, wurde ein wichtiger Schritt zur Etablierung des Verfahrens angestoßen.

Wir wünschen Ihnen eine interessante und anregende Lektüre auf den folgenden Seiten.

W. Lutsch

(Geschäftsführer AGFW e.V.)

Dr. H. Huther

(Forschung und Entwicklung)

# Inhalt

1	Einleitung.....	7
1.1	Ausgangssituation.....	7
1.2	Anforderungen .....	8
1.3	Auswirkungen durch den Einsatz von ZFSV.....	9
1.3.1	Bautechnische Auswirkungen .....	9
1.3.2	Sicherheitstechnische und gesundheitliche Aspekte .....	13
1.3.3	Ressourcenschonung.....	15
1.3.4	Emissionsverringerng.....	15
1.3.5	Immobilisierung belasteter Böden .....	16
1.4	Allgemeine Veranlassung.....	16
1.5	Einfluss von ZFSV auf die KMR-Rohrstatik .....	19
2	Vorarbeiten.....	20
2.1	Identifikation der fließfähigen Verfüllmaterialien mit höchster Relevanz für die FW 21	
2.2	Überblick zum Stand der Forschung und Technik in der Literatur.....	23
2.3	Berechnungsnormen erdgebetteter warmgehender Rohrleitungen.....	25
3	Experimentelle Untersuchungen an ZFSV .....	28
3.1	Allgemeines.....	28
3.2	Kategorien ZFSV.....	28
3.3	Vorgehensweise.....	29
3.4	Bodenarten zur Herstellung von MOS-ZFSV .....	30
3.5	Anmischwasser .....	31
3.6	Voruntersuchungen.....	32
3.6.1	Beschreibung der vier ZFSV .....	32
3.6.2	Durchgeführte Voruntersuchungen.....	38
3.6.3	Ergebnisse der Voruntersuchung .....	42
3.6.4	Auswahl der ZFSV für die Hauptuntersuchungen.....	58
3.6.5	Lagerungsbedingungen für die Hauptuntersuchungen .....	59
3.7	Hauptuntersuchungen Produkt A und C – Last-Setzungs-Verhalten .....	59
3.7.1	Motivation und Versuch.....	59
3.7.2	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung.....	63
3.7.3	Versuchsergebnisse.....	64
3.7.4	Folgerungen.....	69
3.8	Hauptuntersuchungen Produkt A und C - Scherfestigkeit.....	69
3.8.1	Motivation.....	69
3.8.2	Versuchsablauf .....	71

3.8.3	Versuchsprogramm .....	74
3.8.4	Versuchsergebnisse.....	74
3.8.5	Folgerungen .....	77
3.9	Hauptuntersuchungen Produkt A und C – $K_0$ -Werte .....	78
3.9.1	Motivation und Versuch.....	78
3.9.2	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung.....	78
3.9.3	Versuchsergebnisse.....	79
3.9.4	Folgerungen.....	81
3.10	Hauptuntersuchungen Produkt A und C – Kontaktmechanik zu PEHD.....	82
3.10.1	Motivation.....	82
3.10.2	Laborversuch – Versuch und Versuchsdurchführung .....	83
3.10.3	Versuchsprogramm Laborversuche.....	86
3.10.4	Versuchsergebnisse Laborversuche .....	86
3.10.5	Folgerungen aus den Laborversuchen .....	94
3.10.6	Kontaktmechanik – Wirkmechanismen und KWAL von ZFSV .....	94
3.10.7	Technikumsversuch - Versuch und Versuchsdurchführung.....	96
3.10.8	Versuchsprogramm Technikumsversuche.....	101
3.10.9	Versuchsergebnisse Technikumsversuche .....	102
3.10.10	Folgerungen aus den Technikumsversuchen.....	115
4	Feldversuche mit Messreihen .....	116
4.1	Vorstellung der Versuchsstrecke .....	116
4.1.1	Ursprünglich geplante Versuchsstrecke „Tel-Aviv-Platz“ .....	116
4.1.2	Realisierte Versuchsstrecke „Römischer Ring“.....	119
4.2	Messkonzept.....	128
4.2.1	Messgrößen, Messtechnik allgemein .....	128
4.3	Betriebsphasen .....	133
4.4	Messergebnisse .....	135
4.5	Interpretation der Messergebnisse für die statische Auslegung von KMR .....	140
4.5.1	Nomenklatur.....	140
4.5.2	Versuchstemperaturen .....	140
4.5.3	Verschiebungsmessungen .....	140
4.5.4	Resultierende PUR-Scherspannung.....	142
4.5.5	Bezug zum GEF-Forschungsvorhaben "Qualitätssicherung zukünftiger Kunststoffmantelrohre" .....	143
4.5.6	Auswirkungen auf die KMR-Statik .....	145
4.6	Ableich mit den Ergebnissen aus Schmitt et al. a. ....	145
5	Vorgaben für die Ausführungstechnik .....	147

5.1	Erarbeitung der Vorgaben .....	147
5.1.1	Aus den Technikumsversuchen abgeleitete Vorgaben .....	147
5.1.2	Aus dem Feldversuch abgeleitete Vorgaben .....	147
5.2	Baustellenablauf .....	150
6	ZFSV – Qualität .....	153
6.1	Qualitätsanforderungen .....	153
6.2	Qualitätsmerkmale .....	154
6.3	Qualitätskontrollmaßnahmen .....	155
6.4	Darstellung zur möglichen Erfüllung der Anforderungen .....	156
7	Berechnungsverfahren und Berechnungsempfehlungen .....	160
7.1	Veränderte Berechnungsannahmen .....	160
7.2	Ober- und Untergrenzen der Dehnungsbehinderung .....	160
7.3	Empfehlungen für einen Regelwerksbaustein des AGFW .....	162
7.4	Vorschlag für weitere Forschungsaktivitäten .....	163
8	ZFSV – Auswirkungen allgemein und für die Fernwärme .....	165
8.1	Allgemeine Wahrnehmung/ Relevanz des Forschungsvorhabens .....	165
8.1.1	Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts .....	165
8.1.2	Vorträge im Rahmen des Projekts .....	165
8.2	Lösungsansätze zur Etablierung der ZFSV .....	167
8.2.1	Problematik einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtungsweise .....	167
8.2.2	Gesamtbewertung .....	167
8.2.3	Muster einer gewichteten Bewertungsmatrix als Entscheidungsgrundlage ....	169
9	Lessons Learned – Durchführungsfazit .....	170
10	Schlussfazit .....	172
	Formelverzeichnis .....	174
	Tabellenverzeichnis .....	175
	Abbildungsverzeichnis .....	176
	Literaturverzeichnis .....	179
	Anlagenverzeichnis .....	185





# 1 Einleitung

Rohrleitungsnetze gehören zu den wichtigsten Transportsystemen im Untergrund und sind als ein Teil der unterirdischen Infrastruktur auch ein Abbild unserer Zivilisation. Unterirdische Rohrnetze stellen einen erheblichen volkswirtschaftlichen Wert dar und deren Ausbau und Erhaltung sind in hohem Maße wünschenswert.

Bei der Verteilung von Wärme übernehmen Fernwärmeleitungsnetze den Transport der Wärme vom Erzeuger zum Verbraucher. Durch innovative Technologien, wie zum Beispiel der breite Einsatz von fließfähigen Verfüllmaterialien, können technische und wirtschaftliche Hindernisse überwunden werden.

Die Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen beschreibt in (H ZFSV 2012) zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) als Böden und Baustoffe mit Bindemitteln, die zur Verfüllung verwendet werden. Da sie ohne zusätzliche Verdichtungsenergie, allein durch die Schwerkraft einfließen und Hohl- als auch Zwischenräume vollständig ausfüllen, eignen Sie sich besonders für schwer zugängliche und schwer verdichtbare Stellen. Die mechanischen als auch physikalischen Eigenschaften der Verfüllbaustoffe stellen sich nach einem definierten Zeitraum ein und sind anschließend langfristig gewährleistet. Dies gilt im Besonderen auch für die Wiederaushubfähigkeit, die eine der wesentlichen Anforderungen im Kanal- und Leitungsbau darstellt (H ZFSV 2012). Der quantitative Einfluss auf die Dehnungsbehinderung von warmgehenden Fernwärmeleitungen ist aber weitgehend unbekannt.

## 1.1 Ausgangssituation

Bei konventionell erdverlegten Rohrleitungen wird das Verfüllmaterial lagenweise eingebracht und verdichtet. Die geforderte Verdichtung im Graben kann dabei insbesondere bei beengten Verhältnissen und im Zwickelbereich der Rohrleitung nicht immer gewährleistet werden. Im herkömmlichen Rohrleitungsbau muss mitunter damit gerechnet werden, dass die Verdichtung am Rohr nicht an allen Stellen hinreichend genau bekannt ist. Da verschiedene Parameter für die statische Berechnung von Rohrleitungen, von der erreichten Verdichtung des Verfüllmaterials abhängen (Elastizitätsmodul, Kontaktscherfestigkeit) besteht bei klassisch verlegten Rohren unter Baustellenbedingungen eine Unsicherheit hinsichtlich der auftretenden Kräfte auf die Rohrleitung in situ.

Bereits seit den 1990er Jahren existiert eine Vielzahl an ZFSV, deren Einsatz im Fernwärmeleitungsbau zahlreiche Vorteile verspricht (Schmitt und Hoffmann 1999). Unsicherheiten bezüglich ihrer bodenmechanischen Eigenschaften, der Mangel an Erfahrungen und das Fehlen belastbarer Richtlinien sind Hemmnisse, die der breiten Anwendung dieser Technologie bislang im Wege standen. Darüber hinaus sind die spezifischen Kosten für das Material höher, als für die konventionellen Verfüllbaustoffe. Weil die zahlreichen Vorteile der ZFSV teilweise nur unter sehr großem Aufwand monetär bewertet werden können, bleiben das Potential, das die Anwendung im Fernwärmeleitungsbau mit sich bringt, häufig unerkannt. Die Qualität der Ausführung und die Nachhaltigkeit einer Baumaßnahme werden den Investitionskosten oft untergeordnet. Dabei wird schon durch die Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) eine Bewertung von Angeboten anhand weiterer Kriterien, wie Qualität, Betriebs- und Folgekosten, sowie der Umweltauswirkungen, gefordert. Es wird explizit betont, dass der niedrigste Angebotspreis

nicht allein entscheidend sein kann (Werner und Pastor 2013). Im folgenden Abschnitt werden deshalb die positiven und auch negativen Aspekte in Hinblick auf volkswirtschaftliche, bautechnische, emissionsverringende und sicherheitsrelevante Auswirkungen dargestellt und bewertet. Eventuell höhere Investitionen, Kosten für Material und Maschinenteknik sollen dadurch transparent gemacht werden.

## **1.2 Anforderungen**

In Abschnitt 1.3 werden Auswirkungen dargestellt, die sich durch den Einsatz von ZFSV ergeben können. Hierbei wird unterstellt, dass ZFSV gestellte Anforderungen erfüllen kann. Im Folgenden sind wichtige Anforderungen an ZFSV für den Einsatz im Fernwärmerohrleitungsbau aufgeführt.

### **Dehnungsbehinderung**

Zur Begrenzung der temperaturabhängigen Dehnungsbewegungen der KMR muss die Dehnungsbehinderung zwischen ZFSV und KMR mindestens der Reibkraft zwischen Sand und KMR entsprechen. Andererseits darf ein Maximalwert der Dehnungsbehinderung nicht überschritten werden. Eine zu hohe Dehnungsbehinderung verursacht eine Überschreitung der zulässigen Scherbelastbarkeit des PUR-Hartschaumstoffs und führt zum Abriss des kraftschlüssigen Verbundes zwischen PUR-Hartschaumstoff und Mediumrohr. (AGFW Arbeitsblatt FW 401 - Teil: 2)

### **Fließfähigkeit**

Aufgrund der temporären Fließfähigkeit im Anlieferungszustand können die ZFSV in den Rohrgraben geschüttet oder gepumpt werden. Ohne zusätzliche Verdichtungsenergie entsteht dabei eine vollständige und hohlraumfreie Verfüllung. Die Fließfähigkeit muss für den Einbauvorgang gegeben sein und darf nicht vor dem Ziehen von Verbau oder Auftriebssicherungen abgeschlossen sein.

### **Tragfähigkeit und Festigkeit**

Nach Einstellung der Verfestigung erreicht der ZFSV eine Festigkeit und Tragfähigkeit, die der Einwirkung äußerer Lasten langfristig entgegenwirkt. Verformungen und Schäden an der Oberfläche von Leitungen müssen, sowohl bei Weiterfüllung und Überdeckung, als auch bei langfristiger Einwirkung von Oberflächen- und Verkehrslasten verhindert werden.

### **Volumenstabilität**

Das verfestigte Endprodukt muss nach Abschluss der Grabenverfüllung und unter wechselnden Witterungsbedingungen dauerhaft volumenstabil sein. Es darf nur geringfügig schwinden/ schrumpfen noch quellen oder schwellen.

### **Wiederaushubfähigkeit**

Für zukünftige Baumaßnahmen, Wartungs- und Sanierungsarbeiten wird ein Verfüllbaustoff gefordert der „spatenlösbar“ oder „von Hand“ lösbar ist (H ZFSV 2012, S. 8).

### **Umwelteinflüsse**

Die Ausgangs- und Zuschlagsstoffe dürfen keinen negativen Einfluss auf die Umwelt haben, da sie vor allem mit den Schutzgütern Boden und Grundwasser in Verbindung treten. Gleiches gilt für mögliche Wechselwirkungen mit den Rohrleitungen oder sonstigen Einbauten (Wegener 2004, S. 473; H ZFSV 2012, S. 14).

## **1.3 Auswirkungen durch den Einsatz von ZFSV**

Der Einsatz von ZFSV als Verfüllmaterial hat Auswirkungen auf den gesamten Planungs- und Verarbeitungsablauf. Neben den bautechnischen Potentialen sind auch Verbesserungen bei Aspekten der Sicherheit, Gesundheit, Ressourcenschonung und Emissionen möglich, die im Folgenden erläutert werden.

### **1.3.1 Bautechnische Auswirkungen**

#### **1.3.1.1 Bautechnische Potentiale**

Die Technologie der flüssigen Grabenverfüllung verspricht einige bautechnische Potentiale, die zur Verbesserung der qualitativen Eigenschaften einer Rohrbaumaßnahme beitragen, die sowohl den Nutzungszeitraum der KMR mit beeinflussen, als auch zur Vermeidung von Schäden beitragen können.

Entsprechend (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 12) ist eine teilweise oder vollständige Verfüllung der Leitungs- und Verfüllzone des Rohrgrabens mit ZFSV zulässig. Auf die Überbauung mit ungebundenen (Frostschutz-, Schottertragschicht) und gebundenen (Asphalt, Beton etc.) Konstruktionsschichten kann dennoch aus Gründen der Frostsicherheit und des standardisierten Straßenoberbaus ohne weitergehende Betrachtungen nicht verzichtet werden. Sie erfolgt nach Einstellung der produkt-abhängigen Verfestigung des Verfüllbaustoffs (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 12).

#### **Fließfähigkeit**

Neben den, aus Erfahrung der Projektpartner, aktuell höheren Materialkosten gegenüber Natursand und anderen geeigneten Verfüllbaustoffen, bieten die ZFSV zahlreiche bautechnische Vorteile und Potentiale. Aufgrund ihrer temporären Fließfähigkeit gelangen sie in alle Bereiche des Rohrgrabens, wo sie sich selbstnivellierend und selbsttätig verdichten. Diese Eigenschaft ist vor allem dort von Bedeutung, wo eine ideale Verdichtung per Hand und Vibrationsstampfer als schwierig oder unmöglich angesehen wird. Das betrifft vor allem den Bereich der seitlichen Rohrzwickel und den Abstandsraum zwischen Vor- und Rücklauf, sowie Leitungsgräben mit eingeschränkten Platzverhältnissen oder Trassenführungen, bei denen der Zugang durch Fremdleitungen erschwert wird. Gleiches gilt für spezielle Situationen in denen Hindernisse unterquert oder die KMR übereinander verlegt werden. An Hochpunkten, an denen sich beim Verfüllen mit ZFSV Luftblasen bilden können, muss entlüftet werden. Die Fließfähigkeit ist zeitabhängig und muss für die jeweilige Baumaßnahme eingestellt werden.

#### **Bettungseigenschaften**

Die Qualität einer Leitungsbaumaßnahme und die Nutzungsdauer der Rohre hängen wesentlich von der Ausführung der Rohrbettung ab. Sie hat Einfluss auf die Dehnungsbehinderung und das Tragverhalten der Leitungen gegenüber äußeren Einwirkungen und deren Wechselwirkung zum angrenzenden Baugrund (I.Arsic & M. Liebscher 2009, S. 6). Bei der Verwendung von ZFSV kann, gegenüber den Schüttgütern bei denen sowohl in der Praxis als auch im Versuchsstand ungleichförmiges Bettungsverhalten auftritt, von sehr gleichmäßigen Bettungseigenschaften ausgegangen werden. Qualität und Dichte einer Sandbettung werden von der Korngrößenverteilung des angelieferten Materials, dem Wassergehalt beim Einbau und der eingebrachten Verdichtungsenergie bestimmt. Eine unzureichende Verdichtung stellt wegen der menschlichen Einflussnahme eine mögliche Fehlerquelle dar, die bei der Grabenverfüllung mit ZFSV ausgeschlossen werden kann. Sowohl im Einbauzustand, als auch unter statischer und dynamischer Last, konnten erhebliche Qualitätsunterschiede nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit von den Wetterverhältnissen,

die unter Umständen ein Verdichten von Sand verhindern, ist bei ZFSV nicht gegeben. Im Rahmen der bei (I.Arsic & M. Liebscher 2009, S. 48) durchgeführten Untersuchungen wiesen bestimmte ZFSV gleichmäßig und punktlastfrei Bettungen auf, dadurch wird der Lasteintrag kaum beeinflusst und reduziert eine Beanspruchung der Rohre maßgeblich. Die Bettungseigenschaften in Sand hingegen sind ungleichmäßig und es kommt zu Spannungskonzentrationen an der Rohrsohle (I.Arsic & M. Liebscher 2009, S. 184 ff).

### **Grundwassereinfluss**

Im Gegensatz zur konventionellen Sandverfüllung erweisen sich ZFSV-gebettete Leitungen als unempfindlich gegenüber Grundwasserspiegeländerungen. Denn bei sehr feuchten Böden oder hohen Grundwasserständen kann es zum Ausschwemmen des sandigen Bettungsmaterials in der Leitungszone kommen. Daraus resultierende Schadensfälle sind bei fließfähigen Verfüllbaustoffen nicht zu erwarten (I.Arsic & M. Liebscher 2009, S. 199 ff; Ziegler und Becker 2013). ZFSV können grundsätzlich auch unterhalb des Grundwasserspiegels eingebaut werden, da der Baustoff den unerwünschten Wassereintrag verdrängt (Ziegler und Becker 2013).

Eine mit Sand verfüllte Leitungszone wirkt in einem bindigen Untergrund wie eine Drainage. Diese Drainagewirkung wird bei Verfüllung der Leitungszone mit ZFSV aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit mit Sicherheit vermieden. Falls eine Drainagewirkung dennoch gewünscht wird, kann diese mit konstruktiven Maßnahmen sichergestellt werden.

### **Trassenfindung**

Durch die Einbaueigenschaften des fließfähigen Verfüllmaterials ergeben sich diverse Vorteile in der Trassenfindung. Bei den fast immer vorherrschenden, knappen Platzverhältnissen stellt sich der Verzicht auf die Verdichtungsarbeit als großer Nutzen dar, der sich sowohl in Kosten, als auch in der nachhaltigen und effizienten Raumnutzung widerspiegeln kann. So stellt die Anwesenheit von Fremdleitungen und deren Querung in mehrfach genutzten Versorgungsgräben keine Schwierigkeit dar, während sich die konventionelle Verdichtung als äußerst schwierig, sehr zeitaufwendig oder gar unmöglich erweist. Gleiches gilt für spezielle Herausforderungen, wie beispielsweise Unterführungen, Verlegung in Kombi- oder Revisionsschächten, Übereinanderverlegung von Vor- und Rücklauf etc., bei denen eine einwandfreie Verdichtung als problematisch angesehen wird. Außerdem kann die Gefahr einer Schädigung anderer Leitungen, während des Einbaus, nahezu ausgeschlossen werden. Auch die Zugänglichkeit des Rohrgrabens ist hierbei von Bedeutung. Die Baustoffe werden für gewöhnlich mit einem Fahrmischer transportiert und eingefüllt; optional ist jedoch auch das Pumpen, in besonders beengten Situationen, denkbar.

### **Schutz sensibler Bausubstanz**

Die Vibrationen durch Verdichtungsarbeiten haben zum Teil schädigende Auswirkungen auf die sensible Bausubstanz, die sich in mehr oder weniger geringer Entfernung zum Leitungsgraben befindet. Vor allem in eng bebauten Innenstädten mit historischer und schützenswerter Bebauung ist dieses Problem häufig gegeben. Notwendige Sicherungsmaßnahmen oder Folgekosten können durch die Verfüllung mit ZFSV vermieden bzw. verringert werden. Aufgrund der im Leitungsbereich vollständig entfallenden Verdichtungsarbeit reduziert sich die in den Baugrund abgegebene Rüttelenergie (Schenk 2012).

### **Aushubvolumen**

Im Bereich des Grabens, der für Verlegearbeiten und Prüfungen betreten werden muss, gelten die geforderten Arbeitsraumbreiten entsprechend der (DIN 4124:2012-01). Werden die

Arbeiten, in denen der Graben betreten werden muss, auf Bereiche von Kopflöchern beschränkt, kann in den übrigen Grabenteilen, der seitliche Abstand zwischen Rohr und Wand bzw. Verbau, auf wenige Zentimeter reduziert werden. Durch die Grabenbreitenreduktion kann sowohl das Aushub- und Verfüllvolumen, als auch die Fläche an wiederherzustellendem Straßenoberbau verringert werden. Besteht die Möglichkeit einer Pipeline-Verlegung, bei der kein Verbau notwendig ist und der Graben nicht betreten werden muss, kann die Breite auf ein Minimum reduziert werden. Weiteres Potential zur Reduzierung der Breite besteht in Kombination mit der Technologie der Übereinanderverlegung von Vor- und Rücklauf. Durch den Verzicht auf ein ausreichend hohes Sandbett kann zudem die Tiefe um einige Zentimeter verringert werden. Die genauen Maße der Grabenbreite und -tiefe ergeben sich in Abhängigkeit zur Rohrdimension, der Tiefenlage oder der erforderlichen Arbeitsraumbreite (GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH 1995, S. 19–20; Ziegler und Becker 2013).

### **Entfall des Rückschnitts**

Eine weitere Kosteneinsparung könnte sich durch den Entfall des Rückschnitts bei Verfüllung bis zur bituminösen Tragschicht ergeben. Dieser ist bei konventioneller Verfüllung notwendig, um eingebrochene Hohlräume unter der Straßenbefestigung mit Material zu füllen und zu befestigen (GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH 1995, S. 17–18).

### **Homogenität zum anstehenden Boden**

Im Bereich seit Jahren abgeschlossener Grabenbaustellen kommt es, meist in Zusammenhang mit tiefen Temperaturen, häufig zu Schäden in Fahrbahndecken. Sie äußern sich häufig in Form oberflächlicher Risse und ziehen enorme Folgekosten für Straßenbauämter und Verkehrsteilnehmer nach sich. Viele der Schäden im Straßenbereich sind auf Inhomogenitäten im Straßenunterbau zurückzuführen, wie sie durch konventionelle Verfüllung der Leitungsgräben entstehen. Das führt, insbesondere bei bindigen Böden, zu Hebungen und Senkungen der Oberfläche, da sie entsprechend des Wassergehalts quellen und schrumpfen. Aufgrund der schwierigen und feuchteabhängigen Verdichtbarkeit wird bindiger Boden meist gegen gut verdichtbaren rolligen Boden ausgetauscht. Letzterer ist auch bei schwankendem Wassergehalt annähernd volumenkonstant, während Ersterer sich im Winter hebt; im Sommer und im Herbst jedoch wieder absinkt. Zur Vermeidung solcher Dauerschäden sollten Gräben in bindiger Umgebung mit gleichartigem Boden wiederverfüllt werden. Diese Homogenität des Verfüllmaterials zum anstehenden Boden lässt sich mit ZFSV, bei denen das lokale Aushubmaterial wieder eingebracht wird, besser beziehungsweise gezielter erreichen. Das beste Ergebnis kann mit einer vollständigen Verfüllung bis zu den Deckschichten erzielt werden (Kottmann 1987).

### **Schutz vor Wurzeleinwuchs**

Bei sandverfüllten Leitungszonen kann es, durch nachweisbar vermehrten Wurzeleinwuchs, zur Störung der Rohrbettung kommen. Durch den Einsatz von ZFSV, aus lokalem Aushub bzw. mit Eigenschaften, die denen bindigerer natürlicher Böden ähneln, kann diese Gefahr deutlich reduziert werden. Bezüglich Trassenfindung und Genehmigung, bei Querung des Nahbereichs von Baumstandorten, ist die Anwendung der Technologie weniger problematisch und schädigend, als die konventionellen Tiefbaumaßnahmen (Honds 2012).

### **Bauzeitverkürzung**

Bauzeitverkürzungen können je nach Rahmenbedingungen erreicht werden, da auf einzelne Arbeiten verzichtet werden kann und andere sich in einem kürzeren Zeitfenster verrichten lassen. Entfallen kann die Herstellung eines Planums auf der Grabensohle und, die

Anfertigung der Sandbettung. Hierbei ist zu beachten, dass dafür andere Maßnahmen erforderlich sind. Die Bettungsvorbereitung erfolgt durch Auflagerung auf Haltungs­bänken aus ZFSV-Material festerer Konsistenz oder der Aufhängung an der Konstruktion zur Auftriebssicherung. Weiterhin kann die zeitintensive Verdichtungsarbeit teilweise oder vollständig entfallen. Bei Vollverfüllung mit ZFSV wird auch der Rückschnitt bis zur bituminösen Tragschicht überflüssig. In Folge guter Planung und Organisation kann, durch geschickte Taktung der Anlieferungstermine und Überbrückung der Freiräume während des Verfestigungszeitraums, mit reduzierter Arbeitskraft mehr erreicht werden. Die Bauzeit kann in Abhängigkeit zu den Randbedingungen verkürzt werden, woraus sich Kosteneinsparungen ergeben, die sich z. B. aus der Verkehrsumlenkung oder der eingeschränkten Geschäftstätigkeit in Innenstädten ergeben.

### **Wiederaushubfähigkeit**

Die Wiederaushubfähigkeit ist produktabhängig und muss auch langfristig gewährleistet sein. Entsprechend der Anforderungen der H-ZFSV reicht sie von leicht (von Hand) bis schwer (nur mit Geräteeinsatz) (H-ZFSV 2012, S. 22). Der Wiederaushub der Verfüllbaustoffe ist aufwendiger als der von Natursand-Bettungen, kann aber mit entsprechender Rezeptur im Bereich der Spatenlöslichkeit liegen (I. Arsic & M. Liebscher 2009, S. 214).

### **Verfüllung von KMR in vorhandenen Haubenkanälen**

Weiteres Potential ergibt sich aus der Möglichkeit, ZFSV im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen, zur Verfüllung von KMR in vorhandenen Haubenkanälen, einzusetzen. Hier kann schnell und unter geringem Aufwand eine hohlraumfreie Verfüllung realisiert werden, ohne dass die Oberfläche geöffnet werden muss. Zudem ergibt sich die Möglichkeit die Fließfähigkeit durch Anpassung der Rezeptur der ZFSV zu vergrößern, ohne dadurch die Dehnungsbehinderung und Wiederaushubfähigkeit nennenswert zu verändern (Büchau et al. 2004). Auch hier muss an Hochpunkten, an denen sich beim Verfüllen mit ZFSV Luftblasen bilden können, entlüftet werden.

#### **1.3.1.2 Besonderheiten**

Bei der Anwendung der Technologie müssen gewisse Besonderheiten beachtet und in der Planung und Organisation der Baumaßnahme berücksichtigt werden.

Grundsätzlich müssen, bei Wiederverwendung des Aushubs, Voruntersuchungen zur Eignung des Bodens und zur Erstellung der geeigneten Rezepturen durchgeführt werden. Im weiteren Vorgehen sind die Qualitätskontrollen entsprechend Abschnitt 6.3 einzuhalten.

Das Ziehen der Verbauelemente muss zu einem Zeitpunkt erfolgen, an dem die Konsistenz des Verfüllbaustoffs noch flüssig ist. So ist gewährleistet, dass eine hohlraumfreie Verfüllung erfolgt, da der ZFSV noch in die entstehenden Spalte fließen kann. Nach diesem Arbeitsschritt muss das fehlende Volumen an der Oberfläche ausgeglichen werden (Feickert 2008, S. 36). Wird der Verbau zu spät gezogen, entstehen Spalte und Hohlräume, die durch bautechnische Maßnahmen kompensiert werden müssen.

Um eine Entmischung des verflüssigten Materials während des Schüttvorgangs zu verhindern, sollte die Fallhöhe nicht mehr als 60 cm betragen, was jedoch produktspezifisch zu überprüfen ist. Bevorzugt sind ZFSV direkt auf die KMR zu gießen, um ein seitliches Verschieben/Verdrängen der KMR und die Entmischung des ZFSV zu verhindern.

Auch die Einhaltung der produktspezifischen maximalen Aufenthaltszeit im Fahrmischer, die auf keinen Fall überschritten werden darf, ist zu beachten, da sie die Eigenschaften der ZFSV

negativ verändern können. Die Distanz zur Aufbereitungsanlage und die vorherrschenden Verkehrsverhältnisse sind hier maßgeblich (Ziegler und Becker 2013).

Da die ZFSV Suspensionen sind, weisen sie gegenüber Festkörpern eine entsprechende Auftriebskraft auf, deren Kenntnis, für Leitungsbaumaßnahmen benötigt wird. Entsprechend der Berechnungsergebnisse muss eine Auftriebssicherung erfolgen. Hierzu existieren verschiedene Möglichkeiten, die sich in der Praxis bewährt haben (Pecher et al. 2010). Es gibt spezielle Vorrichtungen, bei denen der Zeitpunkt des Auftriebskraftverlusts durch ausreichende Verfestigung genau festgestellt werden kann, um ideale Bettungsverhältnisse zu schaffen. Andere Möglichkeiten bieten die Verwendung sandgefüllter Big Packs oder, als Sonderlösung für kleine Nennweiten, in die Grabensohle geschlagene Stahlbügel über Sandsäcken. Auf keinen Fall darf die Auftriebssicherung über dem Verbau erfolgen, da sonst ein Ziehen des Verbaus, im flüssigen Zustand des ZFSV, nicht mehr möglich ist.

Eine wesentliche Besonderheit bei der Grabenverfüllung mit flüssigen Verfüllbaustoffen ist der Wegfall bestimmter Arbeitsschritte. Im Bereich der Leitungszone, in dem Sand lagenweise eingebracht und konventionell mit kleinen und leichten Geräten, wie Hand- oder Vibrationsstampfern verdichtet werden muss, können diese Schritte beim Einsatz von ZFSV entfallen. Der zeitliche Aufwand dafür kann mit  $0,23 \text{ h/m}^2$  für das Stampfen in der Leitungszone angenommen werden. Wird das Verfahren auch in der Verfüllzone angewandt, kann auch hier auf die Verdichtungsarbeit mit mittlerem bis schwerem Gerät verzichtet werden. Der zeitliche Aufwand hierfür ist in der Verfüllzone mit  $0,17$  bis  $0,22 \text{ h/m}^2$  anzunehmen (Honds 2012). Gleiches gilt für die Kontrolle der Verdichtung nach ZTVE-StB. Weiterhin kann auf die Herstellung eines nivellierten Planums auf der Grabensohle verzichtet werden. Ebenso ist die Verdichtung der nachträglichen Seitenverfüllung, die bei konventioneller Verfüllung aus der Verbauspur resultiert, nicht erforderlich.

Der Wassergehalt und die Wasserdurchlässigkeit des jeweiligen Materials müssen in jedem Fall beachtet werden, da sie Einfluss auf das Abbindeverhalten haben (I.Arsic & M. Liebscher 2009, S. 213).

Durch angepasste Rezepturen können ZFSV auch in Hanglagen eingebaut werden, ohne ausschließlich an die tiefste Stelle im Graben zu fließen. Riegel zur Abflusssicherung werden dabei überflüssig (Ziegler und Becker 2013).

### **1.3.1.3 Qualitätssicherung**

Die Definition der Qualitätsanforderungen ist in Abschnitt 6.4 beschrieben. Als Orientierung dienen den Auftraggebern verschiedene Zertifikate, Gütesiegel und Lizenzen, mit denen Bauunternehmen ausgestattet sind, die zum fachkundigen Einbau von ZFSV befähigt sind. Die Qualitätssicherung erfolgt entsprechend der jeweiligen Richtlinien. Zum einen sind das Maßnahmen zur Eigenkontrolle, durch geschulte Mitarbeiter vor Ort, wie etwa die Aufnahme des Ausbreitmaßes bei Anlieferung des Baustoffs. Zum anderen sind das verschiedene Methoden zur Fremdüberwachung, die von Mitarbeitern des jeweiligen Verbandes durchgeführt werden und die Herstellung von Rückstellproben für nachträgliche zeitabhängige Laborversuche. Die Ergebnisse dieser Laboruntersuchungen liegen demzufolge jedoch erst nach Abschluss der Baumaßnahme vor.

### **1.3.2 Sicherheitstechnische und gesundheitliche Aspekte**

Durch Verwendung von ZFSV zur Verfüllung der Leitungsgräben können Gefährdungen, wie sie Verdichtungsarbeiten bei konventioneller Verlegung mit sich bringen, ausgeschlossen

werden. Die Risiken durch den Umgang mit den entsprechenden Geräten werden im Folgenden in Anlehnung an (Fuhrmann 2013, S. 11 ff) genannt.

### **Schadstoffausstoß**

Aufgrund der uneingeschränkt flexiblen Einsatzmöglichkeiten werden bei Arbeiten in Rohrgräben beinahe ausschließlich Verdichtungsgeräte mit Verbrennungsmotoren verwendet. Dadurch bilden sich in Abhängigkeit von Motortyp, Leistung, Betriebszeit und anderen Rahmenbedingungen, wie Grabentiefe und Belüftung, Schadstoffkonzentrationen von gesundheitsgefährdender Wirkung. Diese können bei den Ausführenden Vergiftungen hervorrufen und ein erhöhtes Krebsrisiko nach sich ziehen. Die Abgase enthalten unter anderem Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxide, sowie Kohlenwasserstoffe und im Falle von Dieselmotoren auch Partikel.

### **Staubbelastung**

Entsprechend der Erdfeuchte sind Arbeitende zudem der Staubbelastung ausgesetzt, die sich innerhalb des Grabens ebenfalls erhöht auswirken.

### **Geräuschemissionen**

Die Geräuschemissionen der Maschinen betragen zwischen 90 und 98 dB(A), steigern sich aber durch Reflexionen an den Grabenwänden, zum Teil erheblich. Die Folge kann eine schleichende Beeinträchtigung des Gehörsinns für die an den Arbeiten Beteiligten sein.

### **Vibrationen**

Die vom Gerät ausgehenden Vibrationen führen bei den Bedienenden langfristig zu Knochen- und Gelenkschäden, Durchblutungsstörungen der Finger, sowie motorischen und neurologischen Funktionsstörungen an Händen und Armen.

### **Mechanische, thermische und psychische Faktoren**

Weiteres Gefährdungspotential entsteht durch mechanische Faktoren. Unter den beengten Platzverhältnissen kommt es beispielsweise zu Quetschungen oder zur Verschüttung von Personen.

Bei der Anwendung von Verbrennungsmotoren gibt es auch ein thermisch bedingtes Gefährdungspotential. So führt die Berührung heißer Oberflächen, in Nähe zum Motor oder der Abgasanlage, zu Verbrennungen.

Daneben sind psychische Belastungen zu berücksichtigen, die die Unfallgefahr zusätzlich erhöhen und die Ausfallzeiten verlängern. So führen vor allem lange Arbeitszeiten in den Sommermonaten, in Kombination mit zuvor genannten Belastungen (Lärm, Vibration, beengte Verhältnisse) zur Überarbeitung, aus der Müdigkeit, Konzentrationsprobleme und Nervosität resultieren können (Fuhrmann 2013, S. 11 ff).

### **Spritzschutz**

Beim Einbau der ZFSV sind keine besonderen Vorkehrungen zu treffen. Eventuell kann ein Spritzschutz zur Vermeidung von Verunreinigungen der Gebäudefassaden, parkender Fahrzeuge etc. errichtet werden. Gleiches gilt für die Person, die den Befüllvorgang ausführt. Hier empfiehlt sich das Tragen spritzgeschützter Kleidung und einer Schutzbrille. Der Haut- und Augenkontakt sollte vermieden werden, da die pH-Werte zum Teil leicht alkalisch sein können. Beim Abrutschen in den Rohrgraben besteht keine Gefahr des Versinkens, da die Auftriebskräfte der Verfüllbaustoffe sehr groß sind (Ziegler und Becker 2013).



### **1.3.3 Ressourcenschonung**

Hinsichtlich der möglichen Einsparung von Ressourcen, sind vor allem solche ZFSV von Bedeutung, bei denen der Ausgangsboden aufbereitet und wiederverwertet werden kann.

#### **Wiederverwendung des Aushubmaterials**

Das 2012 in Kraft getretene Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), fordert die Schonung der natürlichen Ressourcen und stellt den Schutz von Mensch und Umwelt, bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen, sicher. Entsprechend § 6 hat dabei die Vermeidung höchste Priorität vor der Vorbereitung zur Wiederverwendung und dem Recycling. Den Forderungen der Kreislaufwirtschaft wird, durch die Verwendung des lokalen Bodens als Ausgangsmaterial für ZFSV, entsprochen. Der vorhandene Boden kann, abzüglich des eingebauten Leitungsvolumens, komplett wieder eingebaut werden. Der Bedarf an Deponieraum verringert sich und die Beeinflussung des natürlichen Grundwasserhaushalts wird auf ein Minimum reduziert (Ziegler und Becker 2013; BmJV 2012).

#### **Allokation von Natursand**

Weiterhin von Bedeutung ist, dass durch den Einsatz der fließfähigen Verfüllbaustoffe die konventionell notwendige Ressource Natursand geschont wird. Zwar ist der Bedarf im Fernwärmeleitungsbau, im Vergleich zu anderen Baubranchen relativ gering; doch trägt auch hier der Abbau zu sozioökonomischen Langzeitfolgen bei. Gewonnen wird die Ressource in geeigneten Flussbetten oder Kiesgruben. Die daran gebundene Logistik führt regional oder lokal zur Zunahme des Schwerlasttransports, was Schäden an Versorgungsinfrastruktur oder empfindlicher Bausubstanz zur Folge haben kann.

Aus ökologischer Sicht bedeutet die Gewinnung von Natursand den Abbau eines endlichen Rohstoffs, der bislang in seinem Marktpreis unterbewertet wird. Seine Abtragung bedeutet einen irreversiblen Landschaftseingriff, mit dem die Erosion von Flüssen, die Abtragung fruchtbaren Bodens und die Zerstörung von Sandsteinhügeln oder Dünenlandschaften einhergehen. Sandvorkommen haben zudem Einfluss auf Flora und Fauna, da Sand Grundwasser filtert, Wasseradern führt und Lebensraum für diverse Lebewesen darstellt (Pereira 2014).

#### **Vermeidung von Grundwasserabsenkungen**

In Gräben, bei denen sich die Sohle unterhalb des Grundwasserspiegels befindet, besteht die Möglichkeit des ZFSV-Einsatzes ähnlich des Kontraktorverfahrens beim Einbau von Beton. So wird am Grund des Leitungsgrabens befindliches Grundwasser vom ZFSV verdrängt und kann abgepumpt werden. Wenn dadurch auf eine großflächige Grundwasserabsenkung verzichtet werden kann, ergeben sich aus dieser Möglichkeit beträchtliche Einsparungen von Grundwasser und Energie (Ziegler und Becker 2013).

#### **Wasserbedarf**

Für den Einbau ZFSV ist zu beachten, dass größere Mengen Wasser benötigt werden, das bestimmten Kriterien entsprechen muss. In der Regel wird deshalb Trinkwasser verwendet.

### **1.3.4 Emissionsverringering**

#### **Schadstoff- und Treibhausgasemissionen**

Schadstoff- und Treibhausgasemissionen, die durch die Transporte von Material entstehen, können durch den Einsatz von ZFSV zum Teil verringert werden. Für den konkreten Fall hängt das jedoch von den Rahmenbedingungen der jeweiligen Baumaßnahme und den vor Ort gegebenen Distanzen zu Sandgruben, Großhändlern und Deponien ab. Im Falle einer Herstellung des ZFSV aus lokalem Aushub können, bei geeigneter Infrastruktur in

Baustellennähe, sehr kurze Wege mit dem Fahrmischer erreicht werden. Zudem kann, abgesehen vom verdrängten Rohrvolumen, auf die Transporte zur Deponie verzichtet werden.

Durch Verringerung der Verdichtungsarbeit entfallen weitere Emissionen, die durch die Verwendung handgeführter Maschinen mit Zwei- oder Vier-Takt-Otto- bzw. Dieselerbrennungsmotoren entstehen. Verwendet werden hauptsächlich Vibrationsstampfer in der Leitungszone und Rüttelplatten in der Verfüllzone. Typ, Leistung und Kraftstoffart hängen von ihrem Einsatzgebiet ab (Sonnenberg 2004).

### **Lärm, Staub und Vibration**

Von den Maschinen gehen weitere Emissionen aus, die das Umfeld, die Geschäftstätigkeit und die Anwohner in ihrem Alltag stark beeinträchtigen. Es sind vor allem Lärm, Staub und Vibrationen. Die Schallleistungspegel der Verdichtungsgeräte liegen im Bereich zwischen 107 und 112 dB(A); der des Transportbetonmischers bei etwa 102 dB(A). Konkrete Daten zur Quantifizierung derartiger indirekter Kosten oder statistische Erhebungen zum subjektiven Störungsempfinden von Betroffenen liegen für Leitungsbaumaßnahmen bislang nicht vor (Stein und Brauer 2004, S. 9; Hermann und Schweiger 2007; Krämer et al. 2004).

Die Deponierung nicht wiederverwendeten Aushubs erfolgt auf Boden und Bauschuttdeponien. Erwartungsgemäß kommt es dabei nicht zu nennenswerten biologischen Abbauprozessen, die zu einer Gasproduktion führen. Trotzdem können vereinzelt erhöhte Methan- und Kohlenstoffdioxidgehalte nachgewiesen werden, die aus der Ablagerung von Gartenabfällen und organischen Siedlungsabfällen resultieren. Zwar erfordern solche Bauschuttdeponien die vergleichsweise geringsten Folgekosten im Nachsorgezeitraum, stellen in ihrer Summe jedoch eine große finanzielle Belastung dar (Stegmann et al. 2006, S. 45 ff).

### **1.3.5 Immobilisierung belasteter Böden**

ZFSV, welche aus belasteten Bodenaushub hergestellt werden, sind u. a. aufgrund der zur Herstellung eingesetzten Mehrschichtmineralien (Benonite) und ihrer geringen bis sehr geringen Wasserdurchlässigkeit in der Lage, bestimmte Schadstoffe im ZFSV zu immobilisieren oder zumindest den Schadstoffaustrag zu verringern. Dabei sind u. a. die folgenden prinzipiellen Wirkmechanismen zur Verringerung des Schadstoffaustrages aus Bodenaushub in ZFSV gegeben:

- Sorption, Fällung, Komplexierung z. B. Schwermetalle, langkettige organische Verbindungen, organische Verbindungen mit hoher Polarität, Phosphat
- Verringerung der Wasserdurchlässigkeit mittels gezielter Verringerung der Wasserdurchlässigkeit z.B. für lipophile Stoffe, PAK, Ruß.
- Förderung des chemischen Abbaus organischer Verbindungen durch Katalysatorwirkung der Tonminerale (Bentonite).

ZFSV können die durch Grund- und Sickerwasser verursachte Freisetzung (Eluierbarkeit) bestimmter Schadstoffe erheblich reduzieren, jedoch die Schadstoffgesamtmenge (Feststoffgehalt) nicht beeinflussen. Grundsätzlich sind im Vorfeld schadstoffspezifische Untersuchungen zu machen, bei den angepasste Rezepturen entwickelt werden (Märtner 2013).

## **1.4 Allgemeine Veranlassung**

Grund für den, im Gegensatz zum konventionellen Rohrleitungsbau, seltenen Einsatz von ZFSV im Bereich der Fernwärme ist unter anderem das begrenzte Wissen bezüglich des

Kontaktverhaltens von ZFSV und Kunststoffmantelrohren (KMR). Auch wenn Produkthersteller teilweise Werksnormen (z.B. WN 06.02 RSS Flüssigboden 2007) zur Verfügung stellen, besteht zur statischen Auslegung von in ZFSV verlegten Rohrleitungen, im Hinblick auf Erd- und Verkehrslasten, derzeit noch kein allgemein anerkanntes Berechnungsverfahren. Einen ersten Ansatz durch einen praxisnahen modifizierten Berechnungsansatz auf Grundlage der (ATV-DVWK-A 127 2000) lieferte (Arsic 2009). Bezüglich des für KMR so wichtigen Langzeitreibkraftverhaltens gibt es noch keine gesicherten Erkenntnisse.

Bei der konventionellen Verlegung von Fernwärmeleitungen bettet man diese in Sand, dessen Eigenschaften als Baustoff ausreichend bekannt sind, um Standardparameter für die Berechnung von erdstatischen Problemstellungen zuzulassen. Bei Fernwärmeleitungen betrifft dies insbesondere die Abschätzung des Erddrucks und der nach COULOMB über den Reibwert  $\mu$  proportional wirkenden Reibungskräfte am Rohrumfang. Vereinfachend wird nach (AGFW Arbeitsblatt FW 401) für die Bestimmung des Erddrucks mit einer mittleren Spannungsverteilung über den Rohrumfang gerechnet, die von den Eingangsparametern  $\gamma$  Wichte des Bodens,  $D$  Durchmesser des Rohres,  $H$  der Überdeckung und  $K_0$  dem Erdruhedruckbeiwert abhängig sind (vgl. Abbildung 1). Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass der Erddruck dem Erdruhedruck  $K=K_0$  entspricht. Daher gilt nach (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10):

$$K_0 \approx 1 - \sin\varphi'$$

*Formel 1: Abschätzung des Ruhedruckbeiwerts:*

Unter Voraussetzung, dass diese Annahme stimmt, ist der Erdruhedruck auf das Rohr damit auch vom inneren Reibungswinkel  $\varphi'$  des Bodens im Sinne eines effektiven Scherparameters abhängig. Dieser vereinfachte Erddruckansatz gilt ausschließlich für nicht bindige Böden und wurde für ZFSV noch gar nicht untersucht.

Fließfähige Verfüllmaterialien (ZFSV) weichen im bodenmechanischen Verhalten sehr stark von grobkörnigen Materialien wie Sand ab. Es ist ein ausgeprägt kohäsives und adhäsives Verhalten zu beobachten, welches stark von der ZFSV-Rezeptur aber auch von der Zeit abhängig ist. Folglich ist zu untersuchen, ob die heute verfügbaren Berechnungsansätze für den Dehnungswiderstand an Fernwärmeleitungen, die ausschließlich auf Reibgesetzen beruhen, auch auf ZFSV-gebettete KMR angewendet oder übertragen werden können.

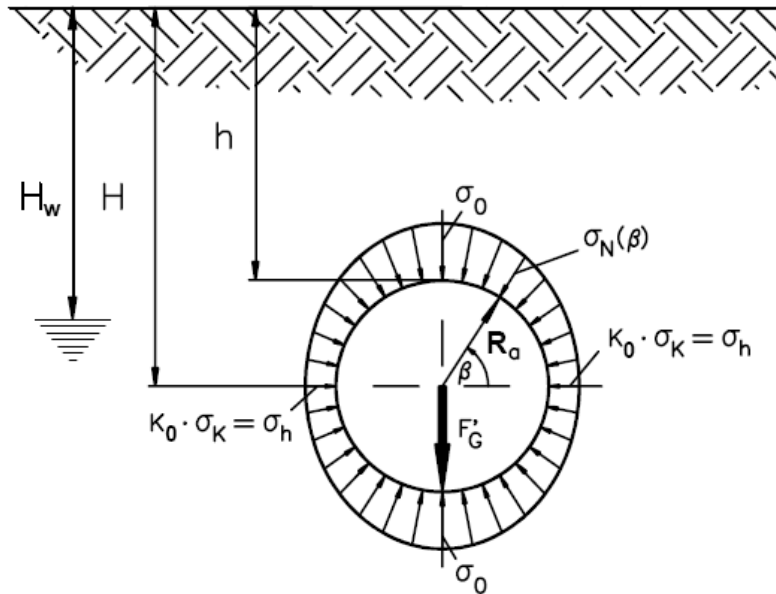


Abbildung 1: Angenommene Spannungsverteilung am Rohr nach AGFW FW 401

In diesem Zusammenhang sind folgende Punkte zu untersuchen:

- Durch das Abbinden entsteht ein weitgehend homogener monolithischer Körper, der u. U. eine eigene Tragwirkung haben könnte, die ggf. aufgrund Gewölbewirkung den Kontaktdruck auf das KMR reduziert. Deswegen ist nicht klar, ob der Kontaktdruck  $\sigma_N(\beta)$  eines in ZFSV gebetteten Rohrs wie bei grobkörnigen Materialien (Sand) proportional zur Überdeckungshöhe  $H$ , der Wichte des Bodenkörpers  $\gamma$  und dem Winkel der inneren Reibung  $\varphi'$  ist.
- Das Schergesetz für die Kontaktfuge KMR/ ZFSV bzw. HDPE-Mantel/ZFSV muss zumindest um einen bisher nicht bekannten, adhäsiven Teil  $a$  erweitert werden:

$$\tau = a + \sigma'_N \cdot \tan \delta_K = a + \sigma'_N \cdot \mu$$

Formel 2: Schergesetz für die Kontaktfuge

$\tau$	Scherspannung in Kontaktfuge	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\delta_K$	Kontakt/Wand-Reibungswinkel	[°]
$\sigma'_N$	Normal zur Oberfläche wirkende, effektive Kontaktspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]

- Die Adhäsion  $a$  ist in ZFSV u. a. abhängig vom Verschiebungsweg  $u$ , der Zeit  $t$  und der effektiven Normalspannung  $\sigma'_N$ , weshalb diese Abhängigkeiten zu ermitteln sind.
- Weiterhin ist zu überprüfen, in wie weit auch der Kontakt/Wand-Reibungswinkel  $\delta_K$  abhängig von Verschiebungsweg  $u$  und der Zeit  $t$  ist.
- Für ZFSV fehlen Kenntnisse über die Entwicklung der Scherspannungen  $\tau(n)$  bei zyklischer Beanspruchung in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl  $n$ .

Nach Ermittlung aller notwendigen Parameter und geeigneter ZFSV-Rezepturen müssen Qualitätssicherungsmaßnahmen und -verfahren u. a. aus labortechnischen Untersuchungen abgeleitet werden die auch in der Baupraxis anwendbar sind.

Aufgrund der Neuartigkeit des Einsatzes von ZFSV als Verfüllmaterial im Fernwärmebereich ergeben sich - neben den zuvor aufgeführten, eher technischen Fragestellungen – erwartungsgemäß auch eine Vielzahl an vergabe- bzw. bauvertragsrechtlichen Fragen. Daher führen neben den fehlenden Kenntnissen zum Widerstandshalten an der Kontaktfläche KMR/ZFSV

u. a. auch Probleme beim Nachweis technischer Gleichwertigkeit im Vergabeverfahren oder bei Gewährleistungsregelungen, infolge mangelnder Langzeiterfahrung, zum zögerlichen Einsatz von ZFSV (Wagner et al. 2013, S. 54).

Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens war es deshalb, auch diese Barrieren anzugehen. Die Relevanz des Themas für die Fernwärmebranche wird zusätzlich durch vorausgegangene Untersuchungen gestützt, die in Abschnitt 2 vorgestellt werden.

## 1.5 Einfluss von ZFSV auf die KMR-Rohrstatik

Beim Betrieb erdverlegter KMR stellt sich ein Gleichgewicht

$$\text{actio} = \text{reactio}$$

ein. Actio steht für die Bestrebungen des Stahlrohres, sich z. B. bei einer Temperatur- und Drückerhöhung auszudehnen. Reactio steht für alle im Erdreich wirkenden Dehnungsbehinderungen, im Wesentlichen die Reibung zwischen Erdreich und Mantelrohr, sowie in untergeordneter Bedeutung Querpressungen aus dem Erdreich oder Dehnpolstern auf Bögen und T-Stücke sowie die (inneren) Verstellkräfte von Kompensationssystemen (L-, Z- oder U-Bögen).

Bei jeder Temperatur- und Druckänderung verschiebt sich infolge von Dehnungen das erdverlegte KMR solange, bis die Dehnungsbehinderungen in Summe wieder das Gleichgewicht

$$\text{actio} = \text{reactio}$$

herstellen.

Die Dehnungsbehinderung durch den Verfüllstoff in der Leitungszone hat also einen entscheidenden Einfluss auf den Dehnungs- und Spannungszustand und somit auf das Funktionieren des erdverlegten KMR. Die Dehnungsbehinderung, die entsteht, wenn man Sand in der Leitungszone verwendet, ist nach annähernd 40 Jahren Erfahrung hinreichend bekannt und seit vielen Jahren in den einschlägigen Berechnungsvorschriften (AGFW Arbeitsblatt FW 401; DIN EN 13941:2010-12) definiert.

Für die Berücksichtigung der Dehnungsbehinderung durch ZFSV in der Rohrstatik fehlen aber geeignete Berechnungsgrundlagen. Ein Teilziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Ermittlung belastbarer Erkenntnisse über die langzeitige Dehnungsbehinderung durch ZFSV.

## 2 Vorarbeiten

Netzbetreiber verfolgen schon seit vielen Jahren das Ziel, mit quasi verflüssigtem Verfüllmaterial eine automatische Verdichtung beim Leitungsbau zu erreichen weshalb zahlreiche Möglichkeiten in Betracht gezogen wurden. Eine naheliegende Option, das Einbetonieren von Leitungen, hat sich dabei als problematisch herausgestellt, da im Reparaturfall die Leitungen nicht mehr zerstörungsfrei freigelegt werden können. Auch das Einschlämmen von Sand ist, besonders im Straßenbereich, problematisch, denn das eingebrachte Wasser, welches im Boden nicht versickern kann, weicht die Straße auf, weshalb dieses Verfahren unzulässig ist.

Eine Möglichkeit diese Probleme zu lösen boten die in den 1990er Jahren aufkommenden hydraulisch gebundene (so genannte "stabilisierte") Sandmischungen oder Bodenmörtel. Diese wurden allerdings auch, abhängig von der natürlichen Bodenfeuchte, entweder betonhart oder verfestigten sich überhaupt nicht. Dank intensiver Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten konnten die Probleme der Verfestigung in den Griff bekommen werden und es stehen heute Materialien zur Verfügung, die in anderen Sparten, insbesondere beim Bau von Kanalisationsleitungen, schon etabliert sind und dort teilweise in das einschlägige Regelwerk eingegangen sind.

Bei den direkt eingerdeten, warmgehenden Fernwärmeleitungen dient das umgebende Erdreich allerdings nicht nur als Einbettungsmaterial, sondern ist in erster Linie für die Dehnungsbehinderung von unmittelbarer Bedeutung, als Garant für die Funktion des Leitungssystems. KMR dehnen sich bei Erwärmung nicht nur in axialer, sondern auch in Umfangsrichtung aus, so dass das Einbettungsmaterial ausreichende Elastizität aufweisen muss, damit bei allen Zuständen eine definierte Reibkraft wirkt. Bei betonähnlicher Einbettung zieht sich das KMR im kalten Zustand in Umfangsrichtung zusammen und bewegt sich dann, in axialer Richtung weitestgehend nicht mehr durch Reibung gebremst, wie in einem Tunnel. Im Forschungsvorhaben der MVV Energie AG, Mannheim „EnEff:Wärme – Kostengünstiger Fernwärmetransport für den effektiven Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ hat man mit den damals zur Verfügung stehenden stabilisierten Sandmischungen (SSM) diesen Tunneleffekt festgestellt, was dazu führte, dass die SSM nur in Verbindung mit äußerst teuren Kopplungen von Vor- und Rücklauf (hier als Festpunktbrücke bezeichnet) eingebaut wurden (Schmitt et al. 2015). Die Kombination aus SSM + Festpunktbrücke war aber der konventionellen Sandverfüllung wirtschaftlich unterlegen.

Im Forschungsvorhaben der MVV Energie AG, Mannheim lag der Fokus auf der Herstellung von fließfähigen Verfüllmaterialien. Im Unterschied dazu werden in dem diesem Abschlussbericht zugrundeliegenden Forschungsvorhaben „Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung in Gräben und Haubenkanälen“, marktgängige, fließfähige Verfüllmaterialien untersucht, die gütüberwacht auf die Baustelle geliefert werden können. Beide Forschungsvorhaben gingen die Hemmnisse gegenüber dem Einsatz fließfähiger Verfüllmaterialien als Bettungsmaterial für Fernwärmerohre an, weshalb ein regelmäßiger Austausch mit einem Experten aus dem Forschungsvorhaben der MVV Mannheim stattfand. Dieser war außerdem an der Erarbeitung des Hinweisblattes der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. „Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau“ beteiligt und arbeitet im AGFW Projektkreis „Fließfähige Verfüllmaterialien“ mit. (Schmitt et al. 2014, 2015)

## 2.1 Identifikation der fließfähigen Verfüllmaterialien mit höchster Relevanz für die FW

Zu Projektstart war bereits ersichtlich, dass eine vollständige wissenschaftliche Untersuchung, aller am Markt angebotenen fließfähigen Verfüllmaterialien, hinsichtlich ihrer Eignung für den fernwärmespezifischen Rohrleitungsbau, den Rahmen des Forschungsvorhabens übersteigen würde. Um sicherzustellen, dass vor allem solche ZFSV untersucht werden die für die Branche eine hohe Relevanz aufweisen, wurde durch den AGFW eine Marktabfrage unter allen Mitglieder initiiert. Durch einen Fragebogen (siehe Anlage 1) wurde die bereits eingesetzten Mengen und gesammelten Erfahrungen mit ZFSV erfasst. Darüber hinaus wurde auch nach Voraussetzungen gefragt, die den Einsatz von ZFSV voranbringen könnten. Die Ergebnisse, die im Folgenden kurz dargestellt werden, beeinflussten auch die Auswahl notwendiger Randbedingungen im Projekt.

Für die Befragung im Jahre 2012 konnten 73 Mitgliedsunternehmen des AGFW gewonnen werden. Von diesen konnten 35% bereits auf Erfahrungen mit ZFSV zurückblicken. Wie in Abbildung 2 zu sehen kamen bei diesen vorwiegend *Füma* und *Füma-Boden-Erdbeton* (36%) sowie *RSS- Flüssigboden* (20%), *Dämmen und Blitzdämmen* (12%) und *Weimarer Bodenmörtel* (11%) zum Einsatz. Weitere (21%) verteilen sich auf: *Stabilisierte Sandmischung*, *Porenleichtboden*, *Karbofill E*, *BSC Grabenmörtel*, *Füllmix*, *Readymix* und *Terra Flow Compound*<sup>14</sup>.

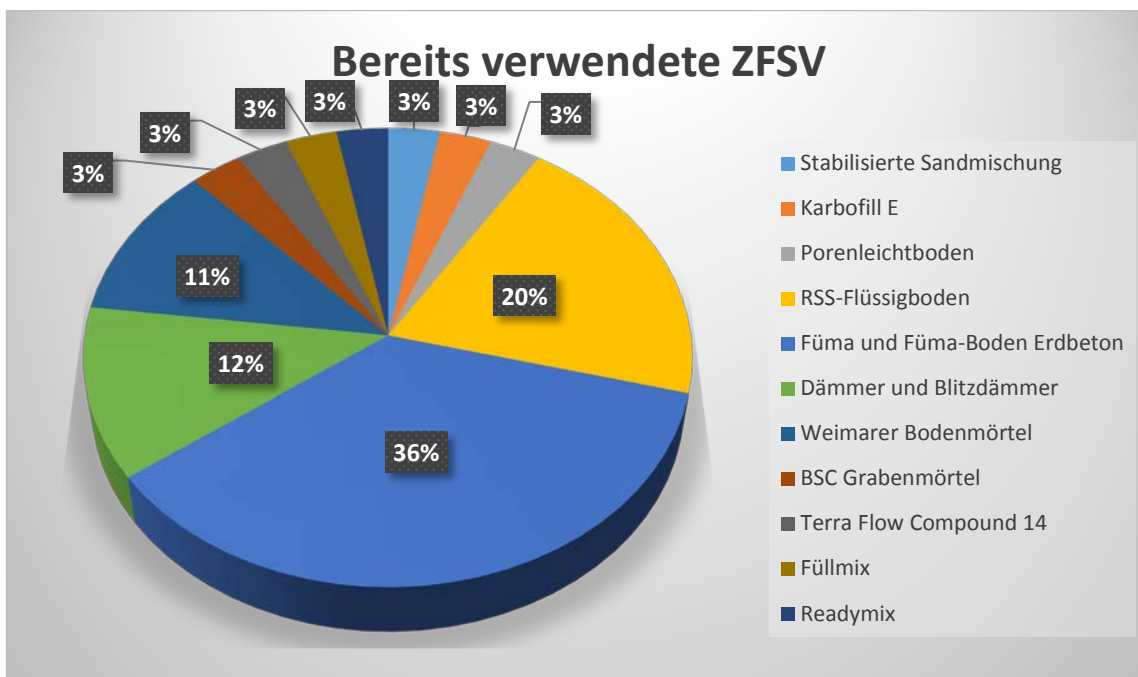


Abbildung 2: Prozentuale Übersicht bereits verwendeter ZFSV

Durchschnittlich kommen dabei je Unternehmen etwa 263 m<sup>3</sup> der ZFSV im Jahr zum Einsatz. Die Bandbreite reicht von einem Minimum von 2 m<sup>3</sup>/Jahr bis hin zu einem Maximum von über 2250 m<sup>3</sup>/Jahr.

Nach Einschätzung der Anwender haben sich dabei: *Füma* und *Füma-Boden Erdbeton*, *Weimarer Bodenmörtel*, *Stabilisierte Sandmischung* sowie *BSC Grabenmörtel* und *Füllmix* zu 100 % bewährt. Als positiv werden hierbei die hohe Flexibilität des Verfüllmaterials beim Befüllen schwer zugänglicher Stellen und das Wegfallen der Verdichtungsarbeit bewertet. Deshalb kommen die ZFSV besonders dann zum Einsatz wenn an der Baustelle schwierige

Bedingungen herrschen, wie zum Beispiel beengte und hindernisreiche Bauräume oder dann, wenn aufgrund der Erschütterungen nicht mit dem Verdichtungsgerät gearbeitet werden darf.

Der Preis eines Kubikmeters ZFVS, der von den an der Umfrage teilgenommenen Unternehmen beziffert wurde, beläuft sich im Mittel auf etwa 82 € bei einer Bandbreite von 50 € bis 150 €. Bezüglich des Festigkeitsverhaltens dominiert die Spaten- (43 %) und Pickellösbarkeit (26 %) deutlich gegenüber der Benutzung von Presslufthammer (17 %) und Abbruchstange (14 %).

Über das Reibungsverhalten Rohr- ZFSV ist nur wenig bekannt, lediglich 15 % konnten Informationen dazu liefern, noch weniger einen genauen Reibungskoeffizient  $\mu$  nennen. Solche Lücken gilt es im genannten Forschungsvorhaben zu füllen. Die Unternehmen, die eine Antwort zu dieser Frage geben konnten nehmen Reibkoeffizienten zwischen 0,1 und 0,5 an wobei sie Reibungskräfte zwischen 10 - 32 kN/m erwarten.

Die Mehrheit (85 %) sieht Chancen, ZFSV verstärkt in ihrem Unternehmen einzusetzen. Dabei befindet sich der Durchschnittswert für die einsetzbaren Massen bei rund 2130 m<sup>3</sup>/Jahr mit einer Spannweite von 100 bis 10.000 m<sup>3</sup>. Eine Gewichtung unterschiedlicher Kriterien, die für den verstärkten Einsatz von ZFSV entscheidend sind, ist Abbildung 3 zu entnehmen.

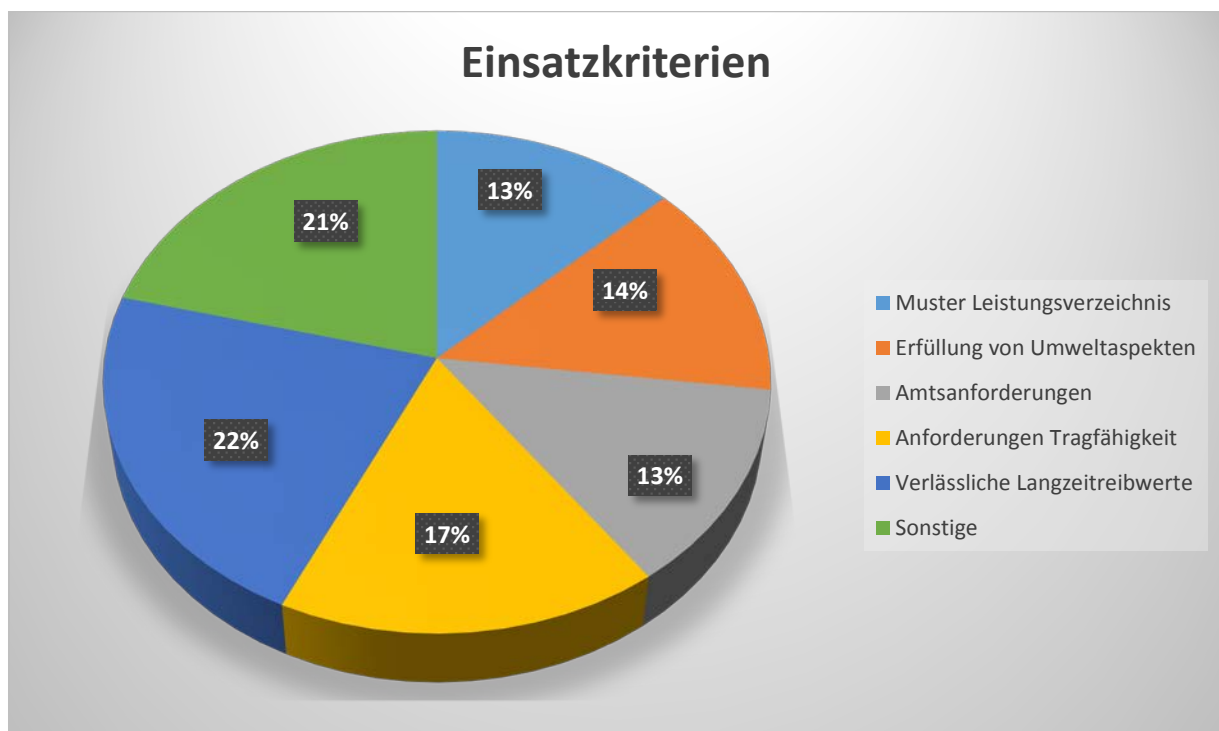


Abbildung 3: Kriterien für den verstärkten Einsatz von ZFSV

In der Kategorie „Sonstiges“ konnten eigene Kriterien genannt werden. Dabei wurde vor allem auf die Wirtschaftlichkeit, Gewährleistung seitens des Rohrherstellers und eine geregelte Gütebeschaffenheit genannt.

Entsprechend wurde auch bei den Vorbehalten gegenüber ZFSV auf wirtschaftliche Aspekte, sowie das Gewährleistungsdefizit eingegangen. Weitere ausschlaggebende Punkte sind die noch geringen Erfahrungen in diesem speziellen Bereich, was mit fehlenden Langzeitwerten und Forschungsergebnissen einhergeht. Anwender fragen sich zum Beispiel, welche Rezepturen und Verfahren langfristig tatsächlich die gewünschten Eigenschaften im Graben liefern. Hinsichtlich der erforderlichen Rohrstatik von Fernwärmeleitungen kamen vor allem



fehlenden Informationen und Erfahrungen bezüglich der vorherrschenden Reibungskräfte, Bettungsdrücke, Verfestigungszeiten und Langzeiteigenschaften auf. In Anlage 2 ist eine Übersicht der Hinweise aus dem Fragebogen zu sehen.

## 2.2 Überblick zum Stand der Forschung und Technik in der Literatur

In Anlage 3 ist eine nationale Literaturliste zum Thema ZFSV zusammengestellt. Es ist zwischen

- populärwissenschaftlicher Literatur,
- wissenschaftlicher Literatur und Normen/ Regelwerken sowie
- zwischen nicht fernwärmebezogener Literatur und fernwärmebezogener Literatur

zu unterscheiden. Der überwiegende Teil der Literatur ist populärwissenschaftlich und nicht fernwärmebezogen. In vielen Fällen handelt es sich um produktbezogene Erfahrungsberichte, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, da die Ergebnisse und Aussagen zumeist situationsbezogen und nicht überprüfbar sind.

Die Anzahl an wissenschaftlicher beziehungsweise fernwärmebezogener, wissenschaftlicher Literatur und Regelwerke ist sehr gering. Dies belegt den geringen Untersuchungs- und Standardisierungsstand für das Material ZFSV. Zu nennen sind die Untersuchungen von (Arsic 2009), Pecher et al. (2013), (Sandig 2014), (Schmitt et al. 2014), (Schmitt et al. 2015) sowie als Regelwerk die (H ZFSV 2012).

**(Arsic 2009)** beschäftigt sich mit der Bettung von Rohrleitungen in unterschiedlichen Verfüllmaterialien; warmgehende Rohre oder gar KMR werden nicht betrachtet. Rechnerische Bemessung und Nachweisführung der ZFSV gebetteten Rohrleitungen steht im Mittelpunkt. Es wird ein Vorschlag zur Modifikation der Vorgehensweise der (ATV-DVWK-A 127 2000) bei der Verwendung von ZFSV unterbreitet.

**(Pecher et al. 2010)** beschäftigen sich im Forschungsvorhaben „Verfahren zur flüssigen Grabenverfüllung“ mit der Stabilität und Auftriebswirkung der Suspension (= ZFSV) sowie zu deren Stützwirkung auf Grabenwände. Zusammenfassend leiten sie Nachweisverfahren zur Ermittlung des Auftriebs von Körpern in ZFSV und zur Standsicherheit ZFSV-gestützter Gräben her. Über den bekannten Auftrieb von Körper in Flüssigkeiten nach Archimedes hinaus wirken bei Suspensionen (= ZFSV) zusätzliche Scherspannungen durch Umfließen auf den Körper ein, die den effektiven Auftrieb vergrößern. Zusätzlich werden bautechnische Möglichkeiten zur Kompensation des Auftriebs beschrieben.

**(Sandig 2014)** konzentriert sich auf die mechanischen Eigenschaften der Materialien mit dem Ziel, die Eignung zum Einsatz als Oberflächendichtung in Deichen nachzuweisen. Er untersucht unter anderem das mechanische Verhalten im frischen und verfestigten Zustand. Dabei setzt er baustofftypische Messverfahren für Mörtel und Beton sowie typische bodenmechanische Laboruntersuchungen ein.

**(Schmitt et al. 2014)** untersuchen verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung der Baukosten von Fernwärme-Transportleitungen. Auf Basis der technischen Bewertung und Kostenvergleichen werden

- die Kaltverlegung,
- der Verguss mit ZFSV
- und die Übereinanderverlegung

als Hauptthemen der Untersuchungen bestimmt. Es werden Laboruntersuchungen, die zum Teil auch an die OTH.R, früher HS Regensburg, vergeben wurden, und 8 Feldversuche durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse in Hinblick auf das Material und dessen Einsatz sind nachfolgend zusammengestellt:

- ZFSV eignen sich zum Verguss von Leitungen.
- Über die Rezeptur können die Eigenschaften der ZFSV beeinflusst werden.
- Für die Herstellung von ZFSV sind fein- und gemischtkörnige Böden geeignet.
- Die Herstellung anhand einer Standardrezeptur ist nicht möglich. Dies hat Auswirkungen auf die Mengen der einzelnen Bestandteile und damit die Herstellungskosten.

Weitere Ergebnisse haben bau- und verlege-technische Aspekte zum Gegenstand. Aus rohrstatischer Sicht wird folgendes Fazit mitgeteilt:

- ZFSV können zur Verfüllung von Fernwärmeleitungen eingesetzt werden; es treten keine unzulässigen Verschiebungen auf.
- Es treten teilweise deutlich größere Reibungskräfte auf als bei Verfüllung mit Sand.
- Es werden höhere Sicherheiten als bei der Verfüllung mit Sand empfohlen.
- Die Verschiebungsmessungen in den Feldversuchen sollten fortgesetzt werden, um folgende Punkte zu klären:
  - Kommt es zu einem weiteren Anwachsen der Verschiebungen?
  - Was geschieht beim Abkühlen der Leitung?
- Die statische Auslegung ist mit den gebräuchlichen Berechnungsmodellen möglich.

In **(Schmitt et al. 2015)** werden die möglichen Einsparungen

- beim Verguss der Leitung mit ZFSV statt Sandbettung,
- bei Übereinanderverlegung der Rohrstränge statt Nebeneinanderverlegung sowie
- bei Kombination der beiden Techniken

anhand von Modellkalkulationen bestimmt. Es werden Einsparungen bis zu einer Höhe von 15 % für möglich erachtet. Dies erfordert jedoch auch kaufmännische und organisatorische Anstrengungen.

Die **(H ZFSV 2012)** sind für die Herstellung und Anwendung von ZFSV im Erdbau mit Bindemitteln in technischen Bauwerken im Straßenbau gültig und enthalten Qualitätsanforderungen. Der Begriff ZFSV wird bestimmt. Für Fernwärmeleitungen wird auf das Regelwerk des AGFW verwiesen. Das Reibungsverhalten zwischen PE-Außenmantel und Bettungsmaterial ist durch Eignungsprüfung, zum Beispiel in Anlehnung an die Sandkastenprüfung nach (DIN EN 489:2009-07), nachzuweisen (Anfahren und mehrere Verschiebezyklen). Im Weiteren werden

- die Baustoffe,
- die Herstellung und Lieferung,
- der Einbau,
- die Anforderungen an die ZFSV, konkret
  - Einbaueigenschaften
  - Endprodukteigenschaften
    - Tragfähigkeit
    - Wiederaushubfähigkeit
    - Druckfestigkeit oder CBR-Wert

- Volumenstabilität
  - Anwendungsspezifische Eigenschaften
- und die Prüfungen, konkret
  - E-Modul-Bestimmung
  - Bestimmung der Gasdurchlässigkeit
  - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit
  - Bestimmung des Reibungskoeffizienten

behandelt. Der Anhang des (H ZFSV 2012) enthält eine Übersicht zu Technischen Regelwerken.

Die Übersicht zur Literatur erfasst den nationalen veröffentlichten Stand der Forschung und Technik und zeigt auf, dass für ZFSV und deren Einsatz auf verschiedenen Gebieten, zu denen der Fernwärmeleitungsbau gehört, zum Teil noch erheblicher Forschungs- und Regelungsbedarf besteht.

In (Schmitt et al. 2014) und (Schmitt et al. 2015) wird die grundsätzliche technische und wirtschaftliche Eignung von ZFSV für den Fernwärmeleitungsbau aufgezeigt, wobei die Aussagen und Folgerungen auf einzelnen, tendenziell stichprobenartigen Untersuchungen fußen, so dass eine Verallgemeinerung oder die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten kaum möglich erscheint. In Abschnitt 0 werden die Ergebnisse dieser Forschungsvorhaben mit den Ergebnissen aus (Schmitt et al. 2014) abgeglichen. Der Stand der Forschung wird dadurch aktualisiert und fortgeschrieben.

Mit den (H ZFSV 2012) liegt ein erstes - wenn auch Straßenbau-spezifisches - Regelwerk für den Einsatz des Materials vor, auf dessen Festlegungen insbesondere hinsichtlich der Qualitätssicherung aufgebaut werden kann, um fernwärmespezifische Erweiterung, Ergänzungen und Details zur erarbeiten

## **2.3 Berechnungsnormen                      erdgebetteter                      warmgehender Rohrleitungen**

Der Bereich erdverlegter Rohrleitungen wird berechnungstechnisch von unterschiedlichen Berechnungsnormen behandelt. Die (DIN EN 13941:2010-12) legt Auslegungs-, Berechnungs- und Verlegungsregeln für werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für erdverlegte Warmwasserverteilungs- und -transportnetze mit Verbund-Rohrleitungssystemen nach (DIN EN 253:2015-12) fest, die für den Dauerbetrieb mit Warmwasser bei unterschiedlichen Temperaturen bis 120 °C und gelegentlichen Spitzentemperaturen bis 140 °C sowie bei maximalem Innendruck von 25 bar (Überdruck) vorgesehen sind.

Des Weiteren befasst sich die (DIN EN 13480-3:2014-12) mit Konstruktion und Berechnung von metallischen Rohrleitungen. Diese Norm kommt im Fernwärmebereich bei der Berechnung von Stahlmantelrohren und oberirdisch sowie in Schächten und Kanälen verlegten Rohrleitungen zur Anwendung.

Weiterhin existiert für die Auslegung und Ausführung von Kunststoffmantelrohrsystemen das (AGFW Arbeitsblatt FW 401), welches das Gesamtsystem vom Einzelsystembauteil bis hin zur Qualitätssicherung und Dokumentation der Baumaßnahme betrachtet.

Einen Bezug auf erdverlegte Rohrleitungen gebettet in ZFSV wird jedoch in keiner der Normen thematisiert. Berechnungsansätze hierzu sind bisher nicht vorhanden, die eine entsprechende

Planung einer in ZFSV verlegten, warmgehenden Rohrleitung nach entsprechenden Regelwerken oder Normen zulassen.

Im Jahr 2009 lieferte Igor Arsic (Arsic 2009) einen ersten praxisorientierten Berechnungsansatz zur rohrstatischen Berechnung erdbetteter Rohrleitungen, welcher durch Modifikation der (ATV-DVWK-A 127 2000) entstand. Bezüglich des für warmgehende Leitungen sehr wichtigen Langzeitreibkraftverhaltens gibt es jedoch noch keine Erkenntnisse und somit auch keine belastbaren Berechnungsansätze für KMR-Leitungen in ZFSV.

In Ermangelung einer Berechnungsvorschrift hat es sich bewährt, bei Verfüllung mit ZFSV eine Ober- und Untergrenze der Dehnungsbehinderung anzugeben. Die Obergrenze wird aus der Bedingung abgeleitet, dass die maximale Kurzzeitscherfestigkeit des PUR-Hartschaumstoffs nicht von der Dehnungsbehinderung durch ZFSV überschritten wird. Die Untergrenze resultiert aus der Forderung, dass die Dehnungsbehinderung in ZFSV nicht kleiner als die von Sand sein soll.

Bei allen bisherigen Messungen wurde beobachtet, dass die Dehnungsbehinderung in ZFSV bei der Erstverschiebung der Leitung (entspricht dem ersten Anfahren der Leitung) bis zum "Losbrechen" besonders hoch ist. Erfahrungsgemäß verringert sich die Dehnungsbehinderung durch ZFSV im Betrieb innerhalb der ersten temperaturbedingten Lastwechsel und strebt einem unteren Grenzwert zu.

Auf diese Auslegungsregel mit zwei Grenzzuständen (Ober- und Untergrenze) wird in den (H ZFSV 2012) grundsätzlich hingewiesen. In (H ZFSV 2012) wird empfohlen, in Anlehnung an die Sandkasten-Prüfung nach (DIN EN 489:2009-07) einen Wandreibungskoeffizienten zwischen PE-Mantelrohr und ZFSV zu bestimmen. *"In der Laborpraxis wird das Ergebnis des Verschiebeversuchs meist in Form der gemessenen Verschiebekraft im Vergleich zur Verschiebekraft in konventioneller Sandbettung dargestellt. Das bietet den Vorteil, dass im selben Versuch gleichzeitig mit der Reibungsmessung weitere Prüfungen, wie auch die Bestimmung der Losbrechkraft, ausgeführt werden können, z. B. Belastungsprüfungen für Verbindungsmuffen. Erfordert ein Prüfling, der z. B. mit den genannten Verbindungsmuffen bestückt ist, im Verschiebeversuch dieselben Verschiebekräfte wie ein gleicher Prüfling im konventionellen Sandbett, wird für die statische Auslegung unterstellt, dass für das betreffende Bettungsmaterial derselbe Reibungskoeffizient benutzt werden darf wie für Sand; gegebenenfalls erfolgt eine Anpassung über einen Korrekturfaktor"* (H ZFSV 2012, S. 32).

In dem später erschienenen Schlussbericht (Schmitt et al. 2015) wird der Lösungsweg über Korrekturfaktoren aus (H ZFSV 2012) aufgegriffen. "Günstig wäre, wenn man Korrekturfaktoren definieren könnte, die die Abweichungen hinreichend genau erfassen und diese in die bisherigen Berechnungsprogramme so eingeführt werden könnten, dass die herkömmliche Berechnungssystematik beibehalten werden könnte" (Schmitt et al. 2015, S. 153).

Weiterhin wurden in (Schmitt et al. 2015) Verschiebungsmessungen als Feldversuche an realen Fernwärmeleitungen durchgeführt. Die Auswertung orientiert sich dabei an den bereits in (H ZFSV 2012) genannten Grenzzuständen: *"Die gemessenen Verschiebungen erlauben Rückschlüsse auf die Beanspruchung der Rohrleitung und auf die Bettungskräfte, die in der Rohrstatik für die Auslegung der Leitung benötigt werden. Werden an den Versuchsleitungen größere Verschiebungen gemessen als in der statischen Auslegung berechnet wurden, besteht die Gefahr, dass die Dehnungsaufnahme unterdimensioniert und die Betriebssicherheit gefährdet ist; werden geringere Verschiebungen gemessen, besteht die*

*Gefahr, dass der Verbund Stahlrohr/PUR-Schaum und/oder die Stahlrohrbauteile überlastet werden"* (Schmitt et al. 2015, S. 152).

Um gegen die Untergrenze der Dehnungsbehinderung abzusichern, wurden bei MVV bisher Festpunktbrücken (mechanische Koppelungen zwischen Vor- und Rücklauf) eingesetzt. In (Schmitt et al. 2015) heißt es hierzu:

Informativ: „Beim Einsatz von ZFSV-Mischungen wird bisher aus Sicherheitsgründen mit einer minimalen Reibkraft (entsprechend einer Überdeckungshöhe von 0,1 m) gerechnet. Dies führt rechnerisch zu sehr großen Verschiebungen, die nur durch aufwändiges mechanisches Vorspannen der Dehnungspolster, oder durch Einsatz einer ebenfalls teuren Festpunktbrücke aufgenommen werden können" (Schmitt et al. 2015, S. 26).

### 3 Experimentelle Untersuchungen an ZFSV

In diesem Abschnitt werden boden- und kontaktmechanischen Untersuchungen an und mit bundesweit verfügbaren ZFSV dokumentiert, ausgewertet und bewertet. Der Erkenntnisstand zum Materialverhalten, Materialkontaktverhalten und zu den Auswirkungen auf die Rohrstatik und das Verschiebungsverhalten der Leitungen wird dadurch erweitert und vertieft.

#### 3.1 Allgemeines

ZFSV stellt man her, in dem die Ausgangsstoffe Böden beziehungsweise Baustoffe mit Bindemitteln und Wasser vermischt werden, wobei die Wassergehalt der fließ- und / oder pumpfähigen ZFSV mit etwa 30 bis 70% bezogen auf die Trockenmasse deutlich über den beim Verdichten nichtbindiger und bindiger Böden „optimalen“ Wassergehalten von 5 bis 25% im konventionellen Erdbau liegen. Alleine aufgrund der sehr hohen Wassergehalte, jedoch auch aufgrund der eingesetzten Bindemittel, ist bei ZFSV gegenüber nichtbindiger und bindiger Böden ein andersartiges bodenmechanisches und kontaktmechanisches Verhalten zu erwarten, das für die Anwendung in der Fernwärmepaxis bekannt sein muss.

Das mechanische und kontaktmechanische Verhalten kann zunächst nur durch experimentelle Untersuchungen überprüft und bewertet werden, weshalb auf Basis einer Branchenbefragung und labortechnischen Voruntersuchungen die zu untersuchenden ZFSV ausgewählt wurden (siehe Abschnitt 3.3).

#### 3.2 Kategorien ZFSV

Die Herstellung der unterschiedlichen Produkte erfolgt auf unterschiedliche Weise und mit verschiedenen Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Herkunft. Für die ZFSV ist nach den Projekterfahrungen zu unterscheiden, ob diese aus lieferantenseitig bereitgestellten Ausgangsstoffen und Bindemitteln weitgehend gleicher Art oder ob diese mit baustellenseitig bereitgestellten Böden hergestellt werden, wobei die Böden variieren können. Außerdem ist zu unterscheiden ob die Herstellung zentral vorgenommen wird oder lokal in der Nähe der Baustelle. In Abbildung 4 sind die wesentlichen Möglichkeiten dargestellt. Eine Gemeinsamkeit ist dabei der Transport des fertigen Produkts mittels Fahrmischern.

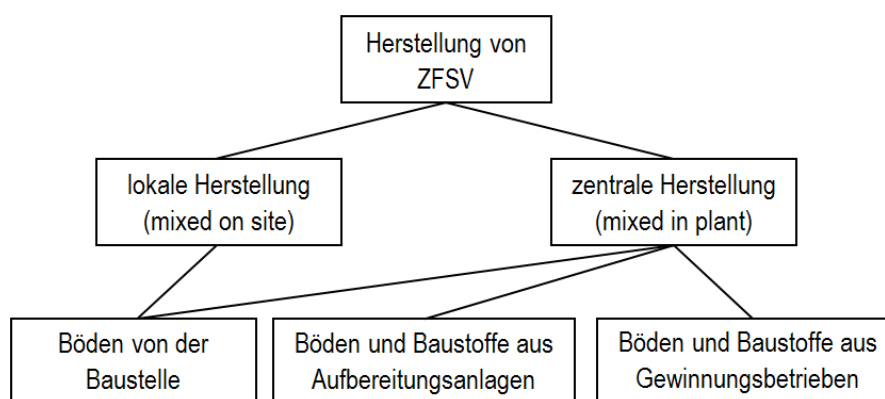


Abbildung 4: Herstellung von ZFSV und Herkunft des Ausgangsmaterials in Anlehnung an (H ZFSV 2012)

##### Lokale Herstellung („mixed on site“)

Eine Variante zur Herstellung von ZFSV ist die lokale Aufbereitung des Ausgangsmaterials in mobilen Stationen (mixed on site, Abk. mos). Bei Veränderung des Ausgangsmaterials

müssen die Rezepturen entsprechend angepasst werden. Die Anlage wird an geeigneten Stellen in möglichst geringer Distanz zur Baustelle errichtet und bedarf einer gewissen Infrastruktur. Notwendig ist die Versorgung mit Trinkwasser, Starkstrom und der Aufstellmöglichkeit für die notwendige Maschinenteknik. Weiterhin sind Anfahrmöglichkeiten für die Befüll- bzw. Separierfahrzeuge und den Fahrmischer notwendig.

### **Zentrale Herstellung („mixed in plant“)**

Weiterhin bestehen drei Möglichkeiten zur zentralen Herstellung von ZFSV (**mixed in plant**, Abk. **mip**). Ähnlich den mobilen Stationen können ZFSV, in stationären Aufbereitungsanlagen, aus den Böden der jeweiligen Baustelle hergestellt werden. Außerdem können ZFSV von Aufbereitungs- oder Gewinnungsbetrieben angeboten werden. Ausgangsmaterialien sind hier Recycling-Baustoffe, gesammelte und aufbereitete Böden, bzw. Neben- oder Abfallprodukte aus anderen Produktionsprozessen (H ZFSV 2012, S. 5; Wegener 2004, S. 471).

## **3.3 Vorgehensweise**

Auf Basis einer Branchenbefragung wählten die Projektpartner die vier ZFSV aus, die von den Befragten als ZFSV mit größter Relevanz für die Fernwärme definiert wurden. (In Abbildung 40 ist eine Übersicht des Abschichtungsverfahrens, in den einzelnen Stufen, zu sehen.) Weiterhin wurde unter den Projektpartner folgende Vorgehensweise zur Untersuchung der vier ausgewählten ZFSV abgestimmt:

- Erarbeitung eines tabellarischen Anforderungskatalogs an den ZFSV (siehe Anlage 4) durch die Projektpartner
- Kontaktaufnahme mit den Lieferanten/ Herstellern:
  - Besteht Interesse zur Zusammenarbeit im Forschungsvorhaben?
  - Kann der ZFSV den Anforderungskatalog erfüllen?
- Bei Interesse zur Zusammenarbeit:
  - Aufforderung an die Lieferanten zur Erstellung einer fernwärmegeeigneten Rezeptur/ eines fernwärmegeeigneten ZFSV unter Beachtung des Anforderungskatalogs
  - bei MOS-ZFSV (siehe Abschnitt 3.2 und 3.4) Übersendung der Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen der drei Ausgangsböden im geotechnischen Labor der OTH.R sowie von Materialproben zur Rezepturerstellung
- Voruntersuchungen:
  - Überprüfung der Lieferantenangaben zum Anforderungskatalog und der Eigenschaften der ZFSV gemäß des Anforderungskatalogs durch Herstellung und Untersuchung von Materialproben im geotechnischen Labor der OTH.R;
  - Herstellung des Materials für die Materialproben nach vorheriger Einweisung oder unter Begleitung durch sachkundiges Personal des Lieferanten beziehungsweise direkt fertige Materialanlieferung zur Materialprobenahme
- Hauptuntersuchungen:

Auf Basis des vorhergehenden Arbeitsschrittes Auswahl von zwei ZFSV, deren mechanisches und kontaktmechanisches Verhalten tiefergehend untersucht und bewertet wird:

  - Last-Setzungs-Verhaltens (Kompressionsversuche)
  - Scherparameter (Triaxialversuche)

- Seitendruckbeiwert  $K_0$  (Triaxialversuche unter  $K_0$ -Bedingung)
- kontaktmechanisches Verhalten
  - kleinmaßstäblich mittels Stabscherversuchen
  - großmaßstäbliche mittels Durchschiebeversuchen mit Fernwärmerohren im Technikum

### 3.4 Bodenarten zur Herstellung von MOS-ZFSV

Für die **MOS-ZFSV** hatten die Projektpartner bereits im Rahmen der Antragstellung entschieden, dass drei repräsentative, lokal im Raum Regensburg in ausreichender Menge und Homogenität beschaffbare Böden mit Feinkornanteil eingesetzt werden. Folgende Gründe und Eigenschaften führten zu dieser Entscheidung:

- Die ausgewählten Böden sind bundesweit anzutreffen.
- Die ausgewählten Böden sind Aushubböden, ohne dass daran Absiebungen vorgenommen werden oder bisher nicht weiter verwendbare Restprodukte („Waschrückstände“) der Kies- und Sandgewinnung.
- Es werden keine hochwertigen nichtbindigen oder gar grobkörnigen Böden (Feinkornanteil < 5-Masse-%) eingesetzt.
- Aufgrund des hohen Feinkornanteils (> 15-Masse-%) handelt es sich um bindige Böden, die sehr frostempfindlich sind und eine „geringe Verdichtungswilligkeit“ aufweisen.
- Die ausgewählten Böden werden üblicherweise wegen schlechter bis mangelhafter erdbautechnischer Wiedereinbaueignung und schwerer Verdichtbarkeit nicht für Rückverfüllungszwecke genutzt und nach dem Aushub oder nach Kies- und Sandgewinnung zumeist deponiert.
- Die Böden eignen sich aus wirtschaftlichen Gründen, im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetz („Wiederverwertung geht vor Entsorgung“) und aus verfahrenstechnischen Gründen aufgrund des hohen Feinkornanteils gut für die Herstellung von MOS-ZFSV.

Für die MOS-ZFSV fiel die Auswahl auf folgende drei Böden. Die angegebene Kurzbezeichnung gibt die Bodengruppe nach (DIN 18196:2011-05) an:

- Sand-Ton-Gemisch **ST\***; lokale Bezeichnung: Waschrückstand; Herkunft: Kieswerk nahe Bad Abbach
- Kies-Ton-Gemische **GT**; lokale Bezeichnung: Rotlagenkies; Herkunft: Grube in Regensburg
- Leicht plastische Tone **TL**; lokale Bezeichnung: Lösslehm; Herkunft: Grube in Regensburg

An den Ausgangsböden haben die Mitarbeiter des Labors für Geotechnik an der OTH. R folgende Untersuchungen als Dreifachbestimmungen vorgenommen, die in der Anlage 5 dokumentiert sind. Dort sind auch die Normen vermerkt nach beziehungsweise in Anlehnung an die vorgegangen wurde.

- Korngrößenverteilung
- Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Fließ- und Ausrollgrenze
- Korndichte
- Wasseraufnahmevermögen
- Kalkgehalt



- Glühverlust
- Proctorversuch

Der Vergleich der Kornverteilungskurven (siehe Abbildung 5) bestätigt, dass diese ein breites Kornspektrum abdecken. Repräsentative Erkenntnisse und Aussagen in Abhängigkeit der Bodenart sollten damit möglich sein.

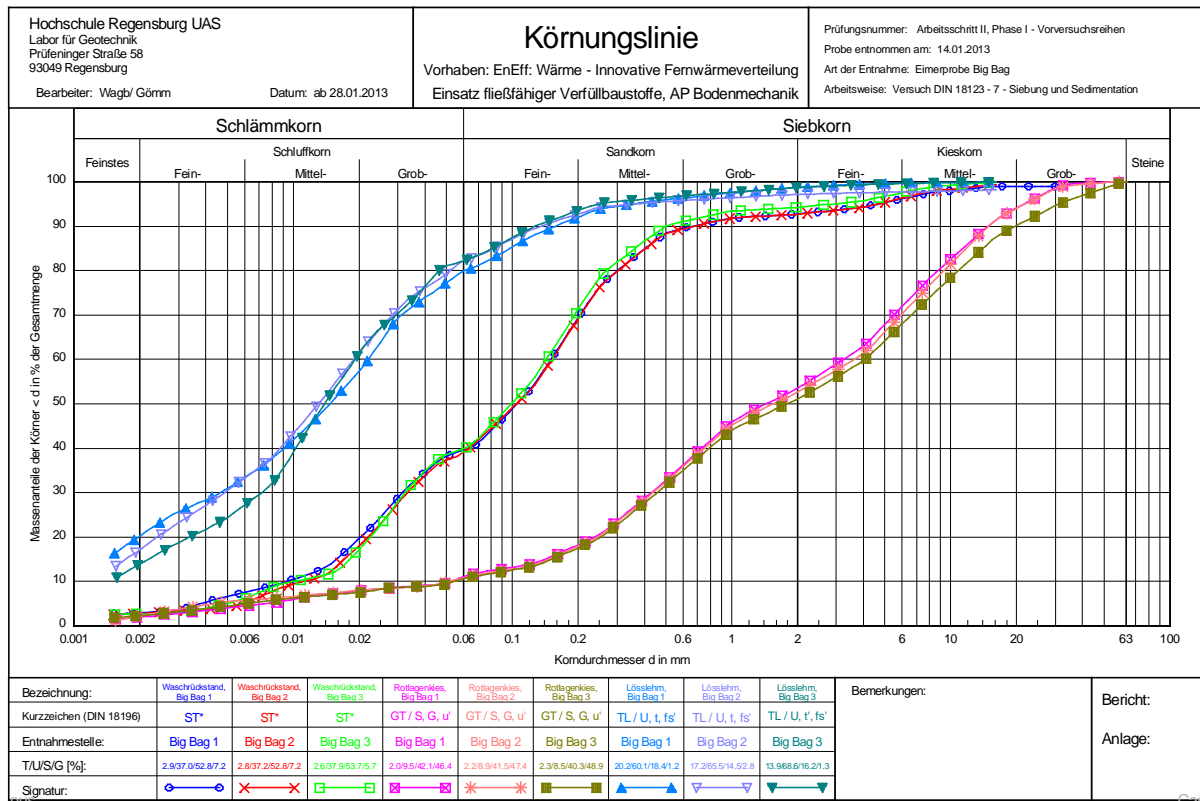


Abbildung 5: Kornverteilungskurven der Ausgangsböden für MoS-ZFSV.

Der Vergleich der Zustandsgrenzen des Feinkorn(anteils) anhand des Plastizitätsdiagrammes nach Casagrande zeigt, dass die Böden in Hinblick auf das Verhalten des Feinkorns ähnlich einzuordnen sind. Das Feinkorn kann nur wenig Wasser aufnehmen. Dies ist bei Bindemitteln mit Tonmineralien von Bedeutung, da deren Wasseraufnahmevermögen entscheidend ist. Es ist nicht zu erwarten, dass die Tonminerale der Ausgangsböden die Wasseraufnahme entscheiden beeinflussen. Die Ergebnisse der gesonderten Untersuchung des Wasseraufnahmevermögens untermauern dies. Bei allen drei Bodenarten ist dieser Parameter als sehr gering bzw. niedrig eingestuft.

Die Proctordichte liefert ebenfalls die zu erwartenden Ergebnisse. Mit zunehmendem Feinkornanteil sinkt die erreichbare Trockendichte; der Wassergehalt für ein optimales Verdichtungsergebnis steigt hingegen an.

### 3.5 Anmischwasser

Die Projektbearbeiter erfragten bei zwei Herstellern und dem Lieferanten eines Bindemittels die Anforderungen an das Anmischwasser. Als entscheidende Parameter wurden

- pH-Wert und
- die Leitfähigkeit

benannt. Die zulässige Spanne beträgt zwischen 7 und 10 für den pH-Wert. Die Leitfähigkeit muss unterhalb von 1000 mS/cm liegen, da u. a. Metalle und Salze die Herstellung und Eigenschaften der ZFSV beeinflussen. Generell lässt sich festhalten, dass Trinkwasser innerhalb Deutschlands ohne weitere Untersuchungen als Anmischwasser geeignet ist.

Die Projektbearbeiter untersuchten das an der OTH.R als Anmischwasser eingesetzte Trinkwasser auf pH-Wert und Leitfähigkeit (Anlage 6). Die veröffentlichten Untersuchungswerte des lokalen Wasserversorgungsunternehmens REWAG sind mit angegeben. Die oben genannten Anforderungen sind erfüllt.

## **3.6 Voruntersuchungen**

Alle Hersteller teilten ihr Interesse zur Zusammenarbeit mit und sicherten zu, dass die ZFSV den Anforderungskatalog erfüllen. Für die MIP-ZFSV erfolgte die Materialanlieferung. Für die MOS-ZFSV stellten die Hersteller Rezepturen und Bindemittel bereit.

### **3.6.1 Beschreibung der vier ZFSV**

Für die Benennung im Projekt haben sich die Projektbearbeiter auf die Bezeichnungen

- Produkt A,
- Produkt B,
- Produkt C mit den Unterprodukten
  - Produkt C-ST
  - Produkt C-GT
  - Produkt C-TL
- und Produkt D mit den Unterprodukten
  - Produkt D-ST
  - Produkt D-GT
  - Produkt D-TL

geeignet. Produkt A und Produkt B sind MIP-ZFSV. Produkt C und D sind MOS-ZFSV. Für die MOS-ZFSV kamen die bereits beschriebenen, Böden ST\*, GT und TL zum Einsatz, so dass sich drei Unterprodukte ergeben. Die Bezeichnung der Unterprodukte lehnt sich an die Kurzbezeichnung der Böden an (siehe Abschnitt 3.4).

#### **3.6.1.1 Produkt A**

Produkt A ist nach Herstellerangaben ein bundesweit verfügbarer, zementgebundener hydraulischer Baustoff bzw. hydraulisch abbindender Trockenmörtel. Die Hauptbestandteile sind Normzement (CEM I – Portlandzement) und Kalksteinmehl sowie Anmischwasser. Nähere Informationen zum Zement und Kalksteinmehl liegen nicht vor.

Im Labor wird auf Basis eines vorgegebenen Wasser-Feststoff-Wertes (w/f-Wert) eine fließfähige Suspension durch hochtouriges Mischen hergestellt. Hierfür wurde vom Hersteller ein Rührwerk bereitgestellt. Für die Baustelle wird das Material in geeigneten Mischanlagen mit Wasservorlage und Einmischen des Trockenmörtels hergestellt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu den Bestandteilen, zur Zusammensetzung und zu ausgewählten Kennwerten.

Tabelle 1: Produkt A – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt A	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	Kalksteinmehl	933,53
<b>Bindemittel I</b>	CEM I	
<b>Bindemittel II</b>	---	---
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	653,47
<b>w/f [-]</b>	0,70	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1587	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	933,53	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	20 – 30 (in Anlehnung an Mörtelprüfungen)	---

w/f	Wasser-Feststoff-Wert	[-] oder [%]
$\rho_{\text{soll,f}}$	Soll-Feuchtdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{soll,d,rech}}$	Soll-Trockendichte, rechnerisch bestimmt	[kg/m <sup>3</sup> ]

Unmittelbar nach dem Mischen ist  $\rho_{\text{soll,f}}$  für die Freigabe zum Einbau zu prüfen. Ergänzend kann das Ausbreitmaß in Anlehnung an Mörtelprüfungen mittels Setztrichter auf einer Glasplatte durch Anheben des gefüllten Setztrichters ohne Schlag geprüft werden. Das in Anlehnung an Mörtelprüfungen als Ziehmaß ermittelte Ausbreitmaß des Produktes A ist chargenabhängig und lag zwischen 20 – 30 cm mit den zur Verfügung gestellten Materialchargen. Abbildung 6 zeigt das Material während der Prüfung des Ausbreitmaßes.

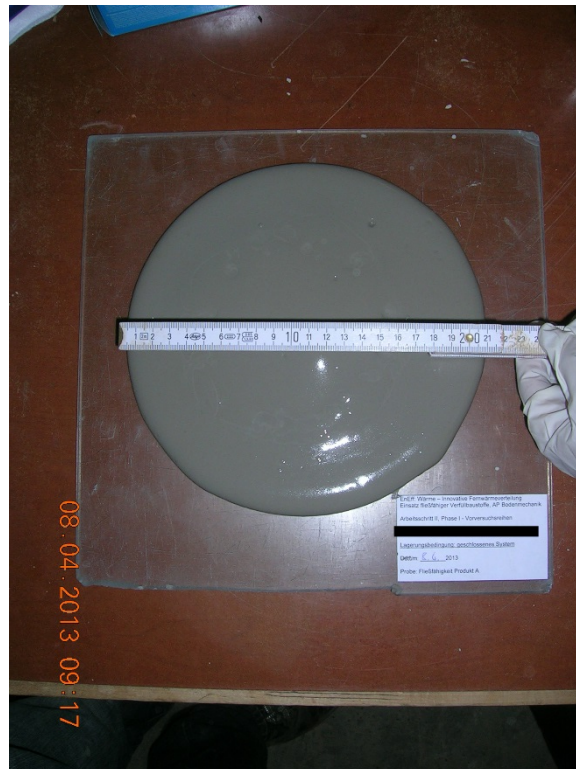


Abbildung 6: Produkt A - Prüfung Ausbreitmaß (Quelle: OTH.R, Labor für Geotechnik)

### 3.6.1.2 Produkt B

Produkt B ist nach Herstellerangaben in zwei Varianten verfügbar. **Variante 1** ist ein feinkörniger Porenleichtbeton aus Zementen, fein abgestuften Gesteinskörnungen, Wasser und gegebenenfalls Zusatzstoffen. Die Dichte ist durch Schaumbildner oder luftporenbildende Zusatzmittel einstellbar. **Variante 2** ist ein fließfähiger und selbstnivellierender Verfüllbaustoff aus Zementen, abgestuften Gesteinskörnungen und Wasser. Die Fließfähigkeit wird durch Zusatzmittel erreicht.

Kleine Proben im Labor herzustellen, ist planmäßig nicht vorgesehen. Für die Baustelle wird das Material in herkömmlichen Betonwerken gemischt und im Fahrmischer angeliefert. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den Bestandteilen, zur Zusammensetzung und zu ausgewählten Kennwerten.

Tabelle 2: Produkt B – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt B	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
Ausgangsstoff	Sand 0/4	1415 (keine Eigenfeuchte)
Bindemittel I	CEM II/ A-LL 32,5 R	43
Bindemittel II	---	---
Anmischwasser	fertig angeliefert	311
Zusatzstoff	---	---
Zusatzmittel	LP	1,634
w/f [-]	0,2133	---
$\rho_{\text{soll,f}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1771	---
$\rho_{\text{soll,d,rech}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1458	---
Ausbreitmaß [cm]	55	---

Unmittelbar vor dem Einbau ist das Ausbreitmaß für die Freigabe zum Einbau zu prüfen. Das Ausbreitmaß wird mit dem Ausbreittisch mit 15 Schlägen in Anlehnung an Betonprüfungen (siehe Anforderungskatalog: Anlage 4) bestimmt. Abbildung 7 zeigt das Material während der Prüfung des Ausbreitmaßes.



Abbildung 7: Produkt B – Prüfung Ausbreitmaß (Quelle: OTH.R, Labor für Geotechnik)

### 3.6.1.3 Produkt C

Produkt C wird aus bauseitig bereitgestelltem Boden als Ausgangsstoff, Zement, Derivaten natürlicher Tonmineralien mit Stellmitteln und dem Anmischwasser hergestellt. Nach dem Sicherheitsdatenblatt des Herstellers handelt es sich bei den Derivaten natürlicher Tonmineralien um alkalisch aktivierten Bentonit mit nicht deklarierungspflichtigen Additiven. In Abhängigkeit des Feinkorngehalts wird der Boden gegebenenfalls vor dem Mischprozess mit Spezialkalk zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit vermischt.

Das Material wird im Labor des Lieferanten mit einem handgeführten Rührwerk (Mörtelrührer) hergestellt. An der OTH.R wurde das Material in Abstimmung mit dem Lieferanten in einem Betonmischer mit maximal 140 Liter Trommelfüllung hergestellt. Für die Baustelle wird das Material in speziellen Mischanlagen hergestellt und mittels Fahrmischer angeliefert. Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 geben eine Übersicht zu den Bestandteilen, zur Zusammensetzung und zu ausgewählten Kennwerten der drei Unterprodukte (siehe Unterabschnitt 3.6.1). Unmittelbar vor dem Einbau ist das Ausbreitmaß für die Freigabe zum Einbau zu prüfen. Das Ausbreitmaß wird mit dem Ausbreittisch mit 15 Schlägen in Anlehnung an Betonprüfungen (siehe Anforderungskatalog: Anlage 4) bestimmt. Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Unterprodukte während der Prüfung des Ausbreitmaßes.

Tabelle 3: Produkt C-ST – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt C-ST	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	ST*	1308 (keine Eigenfeuchte)
<b>Bindemittel I</b>	CEM I 42,5 R	38
<b>Bindemittel II</b>	Alkalisch aktivierter Bentonit	40
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	479
<b>w/f [-]</b>	0,3456	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1865	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1386	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	58 ± 2	---



Abbildung 8: Produkt C-ST – Prüfung Ausbreitmaß (Quelle: OTH.R, Labor für Geotechnik)

Tabelle 4: Produkt C-GT – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt C-GT	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	GT	1474 (keine Eigenfeuchte)
<b>Bindemittel I</b>	CEM I 42,5 R	28
<b>Bindemittel II</b>	Alkalisch aktivierter Bentonit	42
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	420
<b>w/f [-]</b>	0,2720	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1964	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1544	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	58 ± 2	---



Abbildung 9: Produkt C-GT – Prüfung Ausbreitmaß (Quelle: OTH.R, Labor für Geotechnik)

Tabelle 5: Produkt C-TL – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt C-TL	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	TL	881 (keine Eigenfeuchte)
<b>Bindemittel I</b>	CEM I 42,5 R	35
<b>Bindemittel II</b>	Alkalisch aktivierter Bentonit	40
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	641
<b>w/f [-]</b>	0,6705	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1597	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	956	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	56 ± 2	---



Abbildung 10: Produkt C-TL – Prüfung Ausbreitmaß (Quelle: OTH.R, Labor für Geotechnik)

### 3.6.1.4 Produkt D

Produkt D wird aus bauseitig bereitgestelltem Boden als Ausgangsstoff, Zement, Ton mit speziellen Zusätzen und dem Anmischwasser hergestellt. Nähere Informationen zum Ton mit speziellen Zusätzen liegen nicht vor.

An der OTH.R wurde das Material in Abstimmung mit dem Lieferanten in einem Betonmischer mit maximal 140 Liter Trommelfüllung hergestellt. Für die Baustelle wird das Material in speziellen Mischanlagen hergestellt. Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 geben eine Übersicht zu den Bestandteilen, zur Zusammensetzung und zu ausgewählten Kennwerten der drei Unterprodukte D-ST, D-GT und D-TL (siehe Unterabschnitt 3.6.1).

Tabelle 6: Produkt D-ST – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt D-ST	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	ST*	1343,69 (9,7 % Eigenfeuchte)
<b>Bindemittel I</b>	CEM I 32,5 N	40,19
<b>Bindemittel II</b>	Ton mit speziellen Zusätzen	64,30
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	334,88
<b>w/f [-]</b>	0,3413	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1783,06	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1448,23	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	nicht angegeben	---

Tabelle 7: Produkt D-GT – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt D-GT	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	GT	1504,25 (5,4 % Eigenfeuchte)
<b>Bindemittel I</b>	CEM I 32,5 N	37,62
<b>Bindemittel II</b>	Ton mit speziellen Zusätzen	72,23
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	323,21
<b>w/f [-]</b>	0,2604	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1937,31	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1614,10	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	nicht angegeben	---

Tabelle 8: Produkt D-TL - – Bestandteile, Zusammensetzung und ausgewählte Kennwerte

	Produkt D-TL	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ausgangsstoff</b>	TL	1164,28 (8,7 % Eigenfeuchte)
<b>Bindemittel I</b>	CEM I 32,5 N	29,12
<b>Bindemittel II</b>	Ton mit speziellen Zusätzen	55,92
<b>Anmischwasser</b>	Leitungswasser OTH.R	384,44
<b>w/f [-]</b>	0,4131	---
<b><math>\rho_{\text{soll,f}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1633,76	---
<b><math>\rho_{\text{soll,d,rech}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1249,32	---
<b>Ausbreitmaß [cm]</b>	nicht angegeben	

### 3.6.2 Durchgeführte Voruntersuchungen

#### 3.6.2.1 Durchgeführte Voruntersuchungen

Tabelle 9 enthält eine Übersicht über an der OTH.R durchgeführte Untersuchungen an den an der OTH.R hergestellten Materialproben. Die angegebenen Untersuchungen beziehen sich auf den Anforderungskatalog in Anlage 4.

Tabelle 9: Übersicht durchgeführte Voruntersuchungen

Untersuchung	Produkt A	Produkt B	Produkt C-			Produkt D-		
			ST	GT	TL	ST	GT	TL
<b>Größtkorn Ausgangsstoff</b>	---	---	3	3	3	siehe Prod. C	siehe Prod. C	siehe Prod. C
<b>Organische Bestandteile Ausgangsstoff</b>	---	---	3	3	3	siehe Prod. C	siehe Prod. C	siehe Prod. C
<b>Fließfähigkeit</b>	3	1	1	1	1	1	1	1
<b>Wasserabsonderung</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Volumenstabilität (Kurzzeit)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Volumenstabilität (Langzeit)</b>	27	27	27	27	27	27	27	27
<b>Verfestigung</b>	27	27	27	27	27	27	27	27
<b>Dichte</b>	27	27	27	27	27	27	27	27
<b>Wassergehalt</b>	27	27	27	27	27	27	27	27

#### 3.6.2.2 Größtkorn und organische Bestandteile Ausgangsstoff

Eine Untersuchung der Gesteinskörnung der Produkte A und B konnte entfallen, da das Produkt A als fein vermahlendes Pulver angeliefert wurde. Bei der Anlieferung des Produktes B (Ausgangsstoff Sand 0/4) zeigte die visuelle Prüfung, dass die Korngröße deutlich unterhalb 20 mm lag (siehe Abbildung 7). Die Bestimmung der organischen Bestandteile konnte für beide Produkte wegen der Materialherkunft entfallen.

Für die Produkte C und D ist die Untersuchung des Größtkorns der Gesteinskörnung und der organischen Bestandteile der Gesteinskörnung in der Anlage 5 dokumentiert. Sofern



überhaupt Überschreitungen der einzuhaltenden Anforderungen auftraten, hat man diese im Projekt wegen der Geringfügigkeit akzeptiert. Schwankungen der Zusammensetzung natürlicher Böden sind unvermeidbar und treten auch auf der Baustelle auf.

### 3.6.2.3 Fließfähigkeit, Wasserabsonderung und Volumenstabilität (Kurzzeit)

Die begleitende Untersuchung dieser drei Anforderungen erfolgte im Rahmen der Materialherstellung für die Voruntersuchungen. Für das Produkt A erfolgte die Prüfung nach abweichenden beziehungsweise ergänzenden Prüfverfahren auf Basis der lieferantenseitigen Qualitätssicherungsvorgaben. Dazu gehörte zum Beispiel die Bestimmung der Soll-Feuchtdichte  $\rho_{\text{soll,f}}$ .

Alle untersuchten Produkte erfüllten die Anforderungen.

### 3.6.2.4 Volumenstabilität (Langzeit), Verfestigung, Dichte, Wassergehalt

Die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  (N/mm<sup>2</sup>) ist eine Kenngröße, die den zeitlichen Verlauf der Verfestigung beschreibt, wenn man Proben aus dem gleichen Material in unterschiedlichem Alter untersucht. Gleichzeitig ließen sich die drei weiteren Anforderungen mit den verwendeten Materialproben prüfen.

Den zeitlichen Verlauf der Verfestigung zieht man in der Praxis heran, um die Wiederaushubfähigkeit im Sinne der Lösbarkeit nach (DIN 18300:2016-09) abzuschätzen. Die in darin genannten Kriterien sind auf ZFSV nur unzureichend anwendbar. Die dort maßgeblichen Eigenschaften und Kennwerte wie zum Beispiel ortsübliche Bezeichnung, Korngrößenverteilung, Plastizitäts- und Konsistenzzahl aber auch Verwitterung und Veränderungen sowie Trennflächengefüge sind für eingebaute ZFSV im Zustand vor dem Lösen nicht bestimmbar oder unzutreffend. Ein entsprechender Hinweis ist in den (H ZFSV 2012) enthalten. Als Hilfskennwert ist dort die einaxiale Druckfestigkeit im Alter von 28d genannt. Für weitere Beurteilungszwecke mit Berücksichtigung der zeitabhängigen Entwicklung der Druckfestigkeit ist in den (H ZFSV 2012) der Zusammenhang zwischen Alter, Druckfestigkeit und Wiederaushubfähigkeit schematisch dargestellt (siehe Abbildung 11).

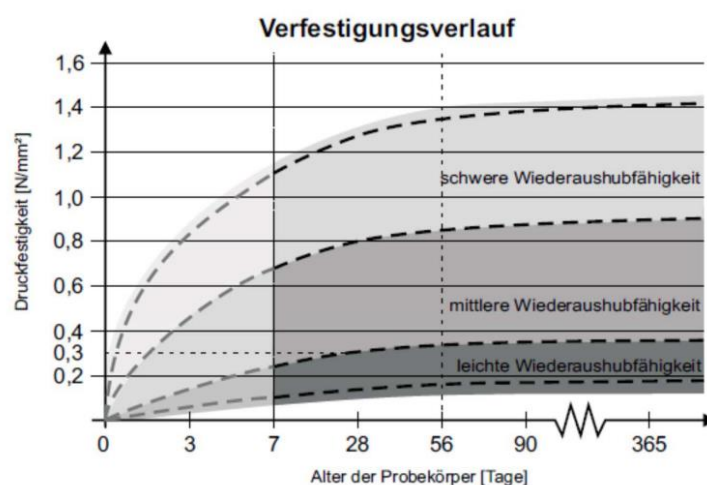


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Verfestigungsverlaufs (Quelle: H-ZFSV, dortiges Bild 6)

In den (H ZFSV 2012) ist folgender Zusammenhang für die Beurteilung des zeitlichen Festigkeitszuwachses  $f_z$  angegeben, der die mittels logarithmischer Ausgleichsfunktion beschreibbare Festigkeitsentwicklung erfasst:

$$f_z = \frac{f_{c,t2} - f_{c,t1}}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$$

Formel 3: Berechnung des Festigkeitszuwachses  $f_z$

$f_z$	Maß für den Festigkeitszuwachs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{c,t1}$	Druckfestigkeit bei einem Probenalter von $t_1 = 7d$	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{c,t2}$	Druckfestigkeit bei einem Probenalter von $t_2 \geq 56d$	[N/mm <sup>2</sup> ]

Für langfristig leicht wiederaushubfähige ZFSV empfiehlt man dort einen Wert  $f_z(7 - 56d) < 0,15$  N/mm<sup>2</sup> und einen Wert der Druckfestigkeit bei 28d  $< 0,3$  N/mm<sup>2</sup>. Für langfristig mittel wiederaushubfähige ZFSV empfiehlt man dort einen Wert  $f_z(7 - 56d) < 0,20$  N/mm<sup>2</sup> und einen Wert der Druckfestigkeit bei 28d im Bereich 0,3-0,8 N/mm<sup>2</sup>. Die Anwendung und Auswertung benötigt damit mindestens 3 Proben mit unterschiedlichen Prüfaltern bis zu 56d, was etwa 2 Monaten Untersuchungszeit bedarf.

In der Planung und im Baustellenbetrieb sind solche lange Wartezeiten nicht praktikabel, insbesondere wenn die Ergebnisse von Eignungsprüfungen vor Beginn der Verfüllung mit ZFSV zwingend vorliegen müssen. Die oben genannten Kriterien berücksichtigen nicht, welche Eigenschaften, Einflussfaktoren und Mechanismen die Festigkeitsentwicklung maßgeblich bestimmen. Einer der Projektmitarbeiter hat verbesserte Prognosemethoden, die dies berücksichtigen, durch Adaption vorhandener Prognosemethoden auf ZFSV entwickelt. Diese sind in (Wagner und Neidhart 2016a) und (Wagner und Neidhart 2016b) beschrieben.

Um  $q_u$  zu bestimmen, führt man den einaxialen Druckversuch durch, der in (DIN 18136:2003-11) in seinen Einzelheiten beschrieben ist. Es handelt sich um einen kostengünstigen Standardlaborversuch. Man stellt die Materialprobe in eine Prüfpresse ein und gibt eine Vorschubgeschwindigkeit der Presse in Abhängigkeit der Probendimension an. Nun erfasst man in regelmäßigen Zeitabständen die auf die Probe wirkende Kraft und die bis dahin aufgetretene Verringerung der Probenhöhe. Abbildung 12 zeigt den Versuchsaufbau.

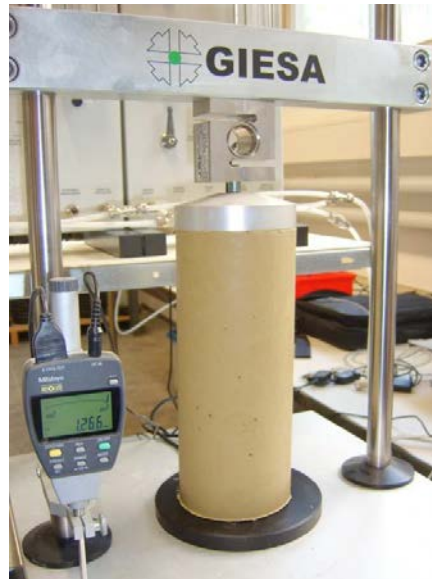


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Ermittlung von  $q_u$  (Quelle: OTH.R, Labor für Geotechnik); Hinweis: Es ist genauer und regelkonform, die Verringerung der Probenhöhe an der Probe zwischen Kopfplatte und Kraftmessdose zu messen. Hier wurde die Messuhr aus fotografischen Gründen seitlich platziert, um den Probenaufbau nicht verdecken.

Die auf die Probe wirkende Kraft lässt sich wegen der Zerstörung des inneren Zusammenhalts der Probe nicht beliebig steigern und diese verringert sich nach Erreichen eines Maximalwertes  $F_{max}$  wieder. Damit gilt

$$q_u = \sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A}$$

Formel 4: Berechnung der einaxialen Druckfestigkeit

$q_u$	Einaxiale Druckfestigkeit nach (DIN 18136:2003-11)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{max}$	maximale einaxiale Druckspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	maximale axiale Prüfkraft	[N]
A	Querschnitt Probe bei $F_{max}$	[mm <sup>2</sup> ]

Im Labor für Geotechnik an der OTH.R wird die einaxiale Druckfestigkeit regelkonform grundsätzlich an zylindrischen Proben mit einem Verhältnis  $h/d \approx 2:1$  und beidseitigem Endflächenabgleich mittels Gips untersucht, wobei h die Höhe und d den Durchmesser der zylinderförmigen Probe bezeichnen.

Bei würfelförmigen Proben oder Proben mit  $h/d \leq 2 : 1$  ist davon auszugehen, dass die Endflächenreibung und die Spannungskonzentrationen in den Ecken die Versuchsergebnisse erheblich beeinflussen. Bei fehlendem Endflächenabgleich kann eine unsymmetrische Krafteinleitung die Versuchsergebnisse beeinflussen, weshalb Gipsausgleich grundsätzlich zu empfehlen ist.

Zur Proben-Herstellung und -Lagerung sind speziell für diesen Untersuchungszweck gefertigte, verschließbare (Blech-) Dosen mit Schutzbeschichtung an der OTH.R im Einsatz.

Beim Einsatz von ZFSV sind verschiedene Umgebungsszenarien möglich. Diese ließen sich durch entsprechende Lagerungsbedingungen bei weitgehender Temperaturkonstanz wie folgt nachstellen.

- **Geschlossenes System:** umgebender Baugrund erlaubt keine Wasseraufnahme oder Wasserabgabe → Lagerung der Proben in dicht verschlossenen Dosen (Deckel mit Moosgummidichtung und Spannringen)
- **Erdfeuchtes System:** umgebender Baugrund erlaubt Wasseraufnahme und Wasserabgabe → Lagerung der Proben mit der unverschlossenen Dosenseite in Sand mit einem Wassergehalt von etwa 10%
- **Gesättigtes System:** umgebender Baugrund erlaubt Wasseraufnahme und Wasserabgabe und stellt Wasser im Überschuss bereit → Lagerung der Proben mit der unverschlossenen Dosenseite in Wasser

Die ursprüngliche Planung sah vor, das Anfangsvolumen und das Volumen der Proben am Prüftag zu bestimmen und zu vergleichen, um so die Volumenstabilität (Langzeit) zu beurteilen. Wegen der großen Probenanzahl hat sich die Bestimmung des Anfangsvolumens (punktuelles Ausmessen und Berechnung des befüllten Dosenvolumens) als unpraktikabel erwiesen. Am Prüftag erfolgte daher die Sichtprüfung der Veränderung des Probenvolumens wie zum Beispiel Rissbildung oder Ablösung von der Dosenwand.

Nach der Entnahme aus den Lagerdosen zum Untersuchungszeitpunkt konnten durch Ausmessen und Wiegen der Proben deren Dichte/ Feuchtdichte  $\rho_f$  in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  leicht bestimmt werden. Der zugehörige Wassergehalt  $w$  [-] oder [%] der Proben, der  $w/f$  entspricht, ließ sich Untersuchungszeitpunkt durch Ofentrocknung nach (DIN 18121-1:1998-04) bestimmen. Weitere Details dazu finden sich in der (DIN 18136:2003-11).

### 3.6.3 Ergebnisse der Voruntersuchung

Zur Untersuchung der langzeitlichen Festigkeitsentwicklung ZFSV (Boden/ Baustoffe gemischt mit hydraulischen Bindemitteln) werden die Versuche regelkonform mit folgender Zeitreihe durchgeführt: 1 d, 3 d, 7 d, 14 d, 28 d, 56 d, 112 d, 224 d, ... nach Herstellung des ZFSV. Die schrittweise Verdopplung der zeitlichen Untersuchungsintervalle ist erforderlich, um erkennbare oder signifikante Festigkeitszuwächse von Untersuchungszeitpunkt zu Untersuchungszeitpunkt zu ermitteln, da sich die Reaktionen im ZFSV mit zunehmender Zeit verlangsamten. Im Allgemeinen wurden Untersuchungen bis 112 +/- 3 d vorgenommen, lediglich bei Produkt B wurden die Untersuchungen bis auf 225 d ausgeweitet, da die Festigkeitsentwicklung nicht den Erwartungen entsprach. Die Kurven in den folgenden Diagrammen sind, falls nicht ausdrücklich anders beschrieben, grundsätzlich Ausgleichfunktionen (sogenannte Fits) auf Basis der einzelnen Versuchsergebnisse.

#### 3.6.3.1 Ergebnisse Produkt A

Abbildung 13 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt A bis zum Alter von 113 d. Abbildung 14 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 15 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.

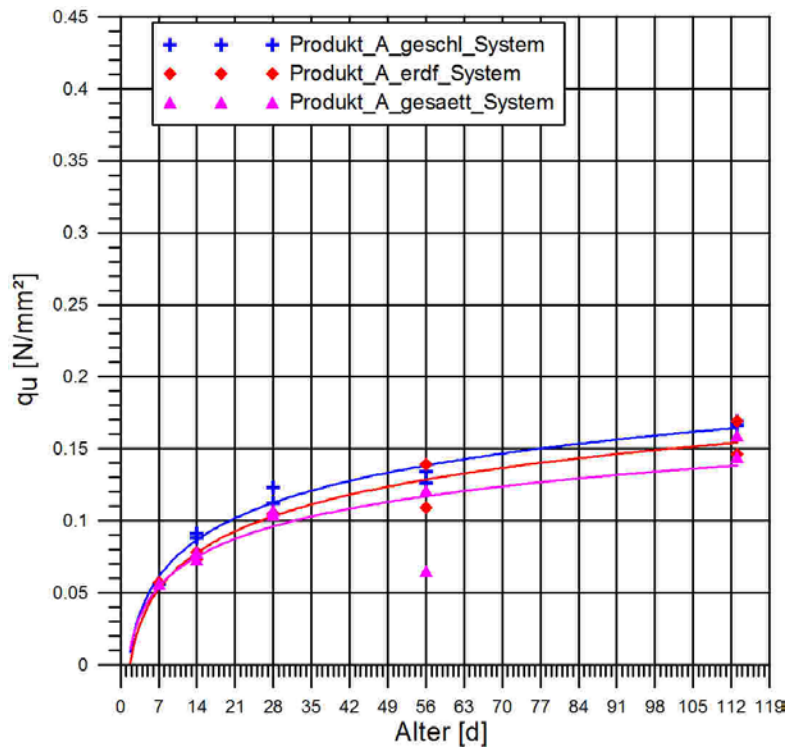


Abbildung 13: Produkt A – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 113 d

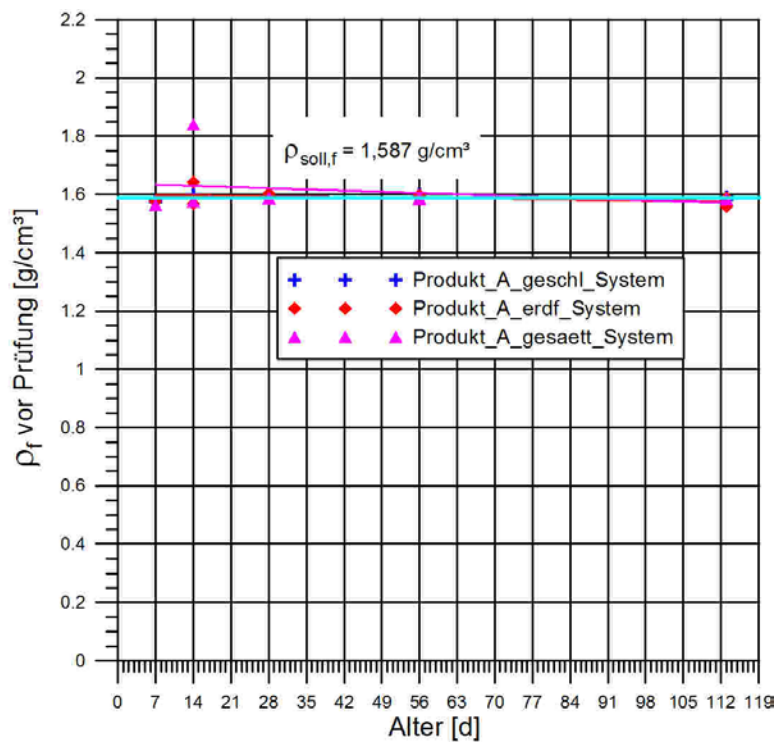


Abbildung 14: Produkt A – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 113 d

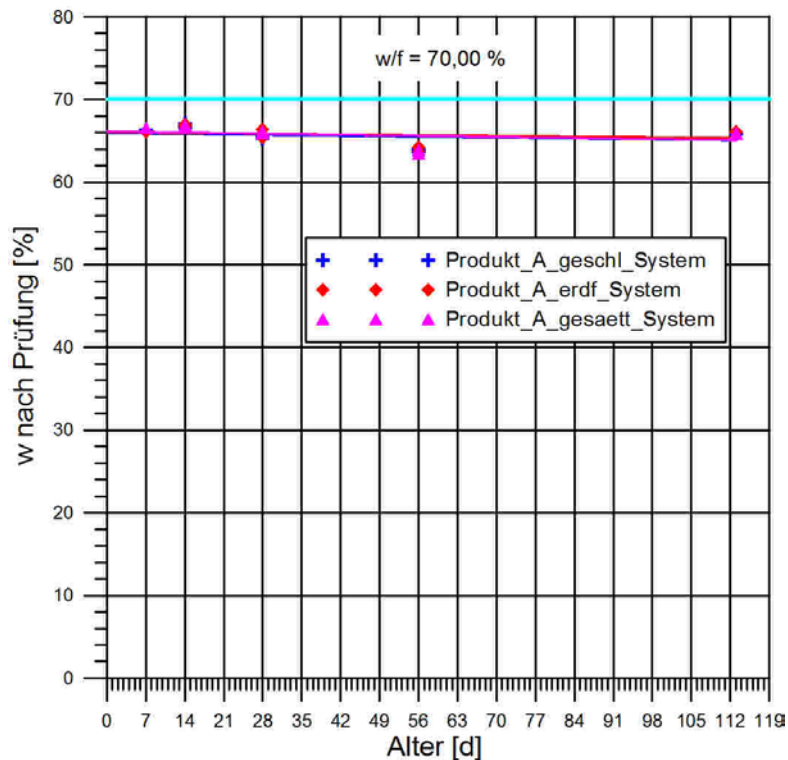


Abbildung 15: Produkt A – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 113 d

Die altersabhängigen Größenwerte von  $q_u$ , die den zeitlichen Verlauf der Verfestigung angeben, liegen bis zum Materialalter von 113 d unterhalb des Grenzwertes von  $0,5 \text{ N/mm}^2$ . Die Extrapolation der Ausgleichskurven auf ein Alter von 30 Jahren ergibt, dass auch für dieses Alter der Grenzwert eingehalten ist.  $\rho_f$  und  $\rho_{\text{sol},f}$  stimmen überein. Die Wassergehalte  $w$  liegen geringfügig unterhalb des  $w/f$ -Wertes. Dies lässt sich mit Verdunstungserscheinungen im geringem Umfang sowie der Umsetzung des Anmischwassers infolge der zementchemischen Reaktionen erklären. Mit der Trocknungsmethode verbleiben Teile des umgesetzten Wassers in der Probe.

### 3.6.3.2 Ergebnisse Produkt B

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt B bis zum Alter von 225 d, da ein unerwartetes Festigkeitsdefizit bis 112 d beobachtet wurde. Es sollte überprüft werden, ob sich bei längeren Lagerungszeit von 225 d doch noch Nacherhärtungen einstellen. Abbildung 17 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 18 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.

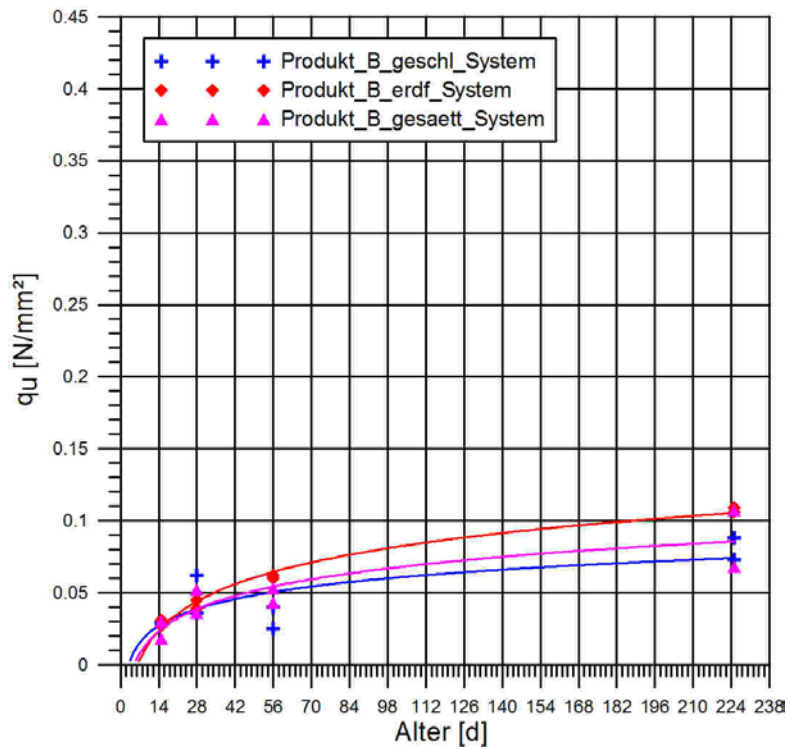


Abbildung 16: Produkt B – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 225 d

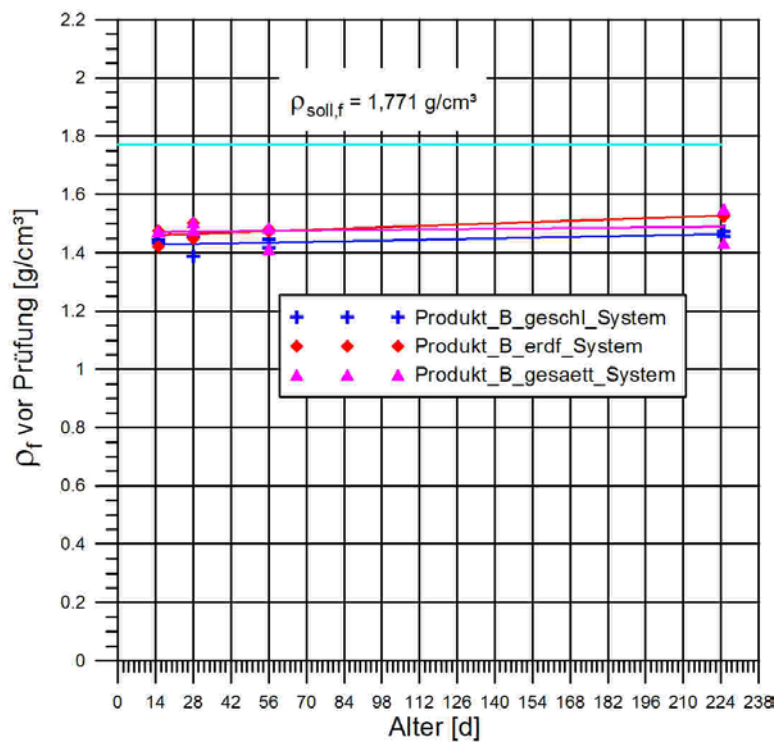


Abbildung 17: Produkt B – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 225 d

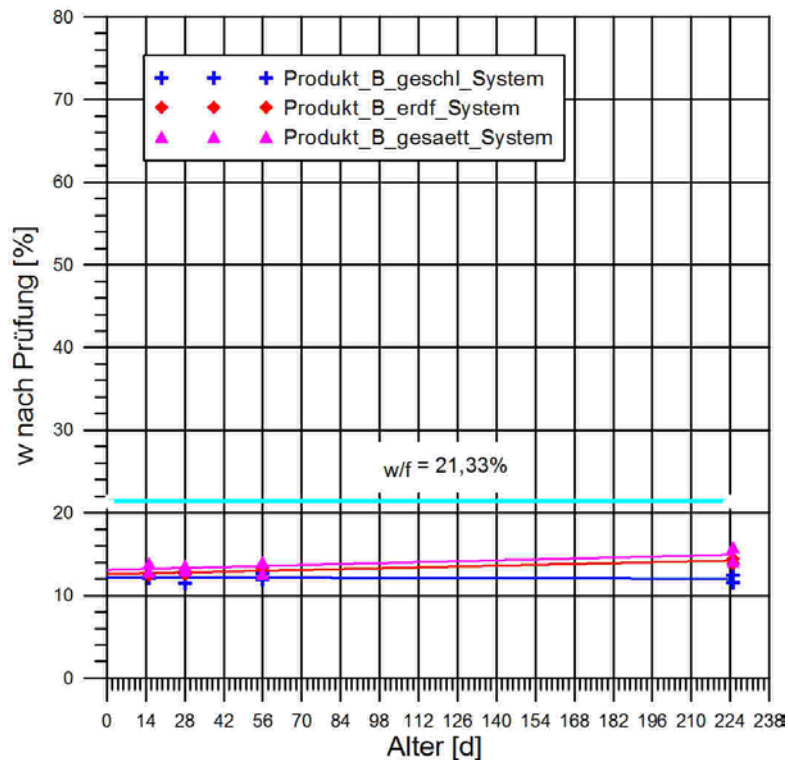


Abbildung 18: Produkt B – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 225 d

Die altersabhängigen Größenwerte von  $q_u$ , die den zeitlichen Verlauf der Verfestigung angeben, liegen bis zum Materialalter von 225 d deutlich unterhalb des Grenzwertes von  $0,5 \text{ N/mm}^2$  und deutlich unterhalb Größenwerte von  $q_u$  der anderen Produkte. Die Extrapolation der Ausgleichskurven auf ein Alter von 30 Jahren ergibt, dass auch für dieses Alter der Grenzwert eingehalten ist.  $\rho_f$  weicht deutlich von  $\rho_{\text{soll},f}$  ab. Dies gilt auch für die Wassergehalte  $w$  im Vergleich zu  $w/f$ . Verdunstungserscheinungen im geringem Umfang erklären dies nur unzureichend. Bei der Prüfung der Volumenstabilität (Kurzzeit) sonderte das Material gegenüber den anderen Produkten deutlich Wasser ab (Bluten; siehe Abbildung 19), hielt jedoch den Grenzwert des Anforderungskatalogs ein. Die Unterschiede in den Wassergehalten lassen sich so zum Teil erklären. Die Verringerung der Dichte mit der Zeit ließ sich nicht abschließend klären, war jedoch aufgrund der in Abschnitt 3.6.4 getroffenen Auswahl nicht weiter von Bedeutung.





Abbildung 19: Produkt B – Wasserabsonderung (Bluten) nach etwa 24 h

Die Größenwerte von  $q_u$  für die 7 d alten Materialproben fehlen. Zum Teil misslang der Ausbau aus den Dosen (Abbildung 20). Zum Teil zerbrachen die Proben beim Abheben von der folienumhüllten Glasplatte zum Abgleich der Endflächen (Abbildung 21). Die Kontaktkräfte zwischen Gips und folienumhüllter Glasplatte überschritten die Kontaktkräfte in der Probe. Man konnte die Proben durch sehr geringe Belastung mittels flach aufgelegter Hand zerstören (Abbildung 21).



Abbildung 20: Produkt B – Alter 7 d, erdfeuchtes System – Misslungener Dosenabau



Abbildung 21: Produkt B – Beim Endflächenabgleich und durch leichten händischen Druck zerstörte Probe

In Abstimmung mit den Projektpartnern hat die OTH.R den Lieferanten kontaktiert und um Prüfung gebeten. Der Lieferant teilte mit, dass die Überprüfung der Mischanlage (Chargenprotokolle) keine Auffälligkeiten ergab.

### 3.6.3.3 Ergebnisse Produkt C

Abbildung 22 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt C-ST bis zum Alter von 115 d. Abbildung 23 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 24 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.

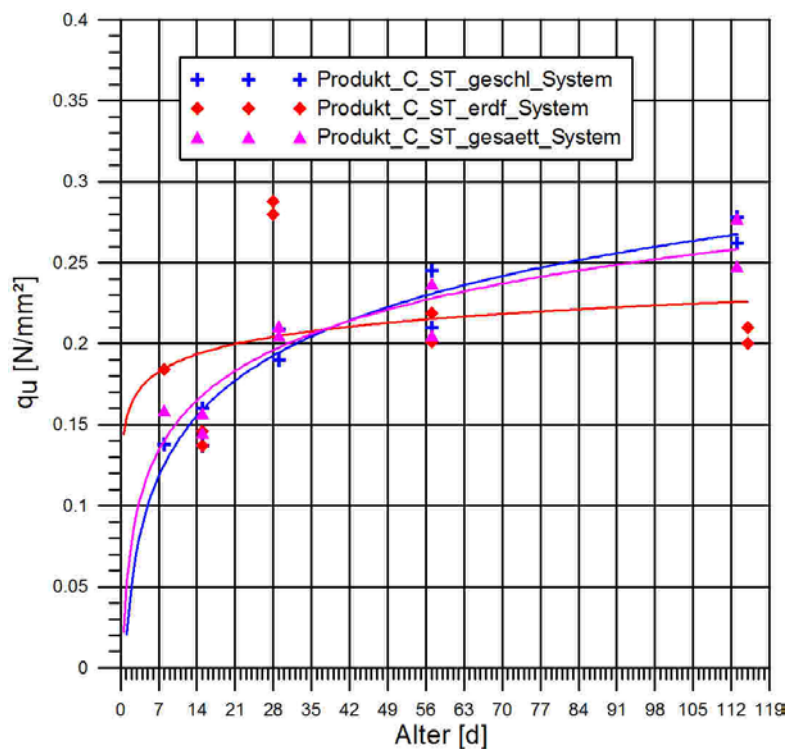


Abbildung 22: Produkt C-ST – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 115 d

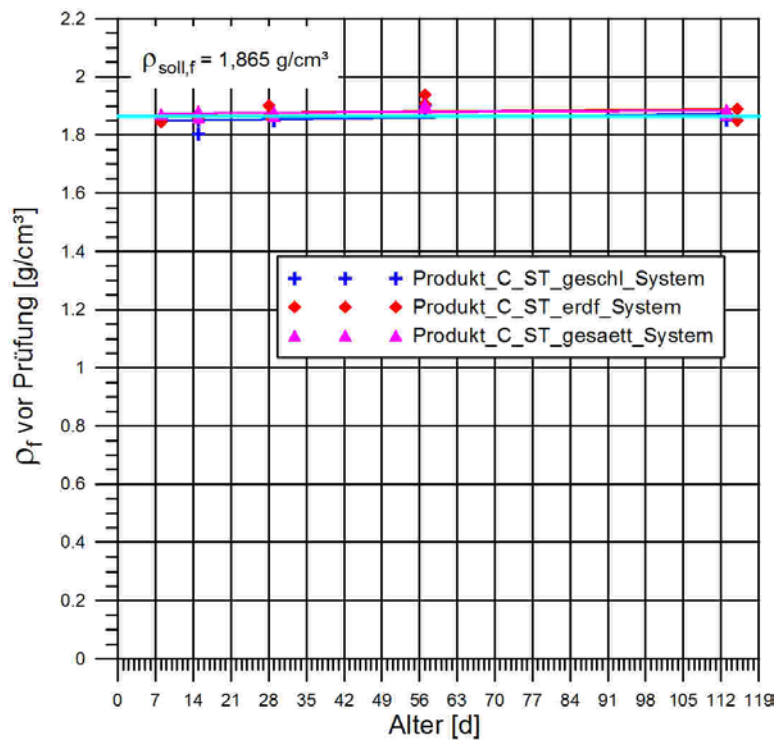


Abbildung 23: Produkt C-ST – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 115 d

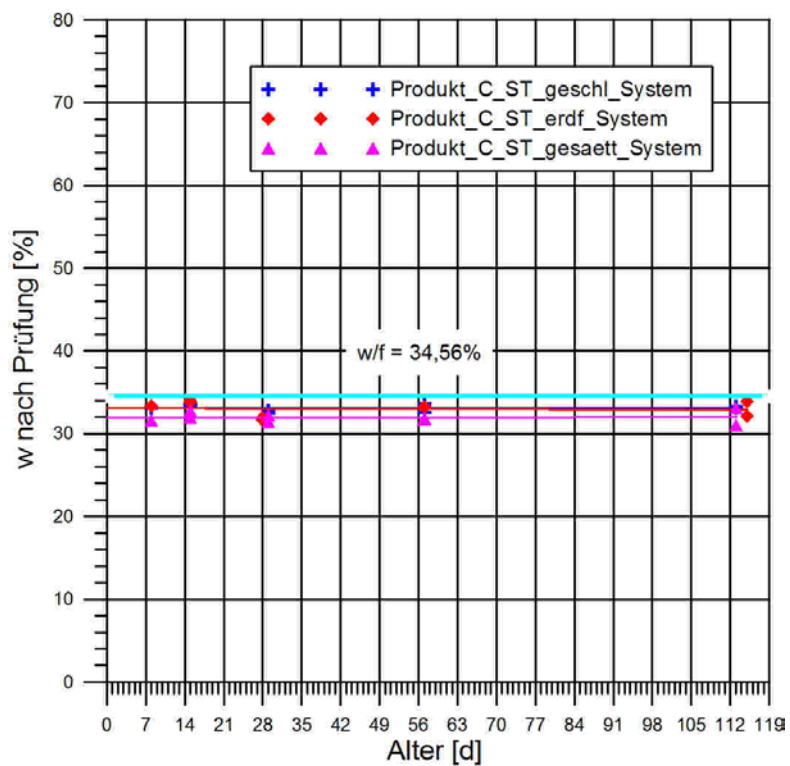


Abbildung 24: Produkt C-ST – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 115 d

Abbildung 25 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt C-GT bis zum Alter von 115 d. Abbildung 26 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 27 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.

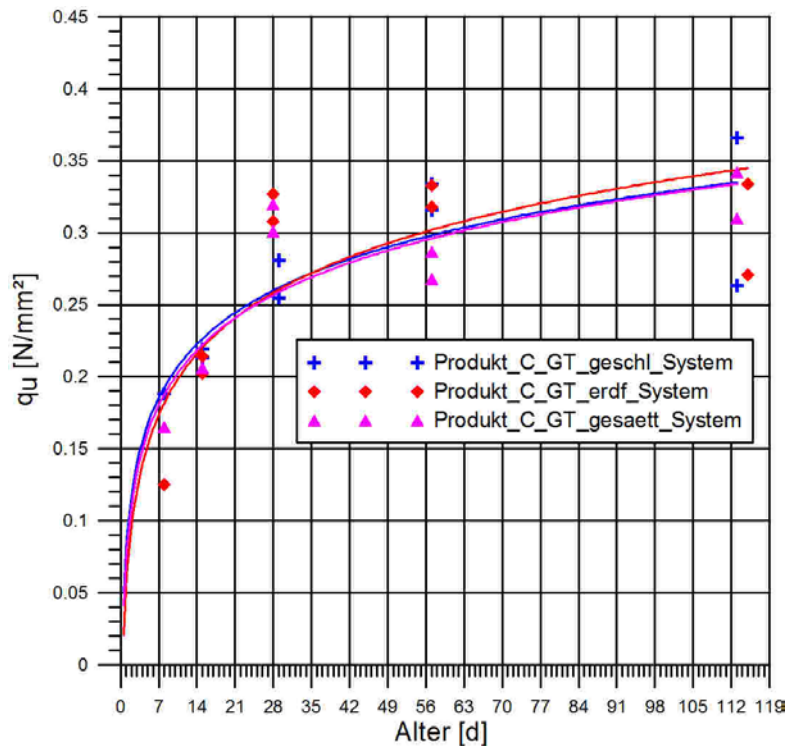


Abbildung 25: Produkt C-GT – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 115 d

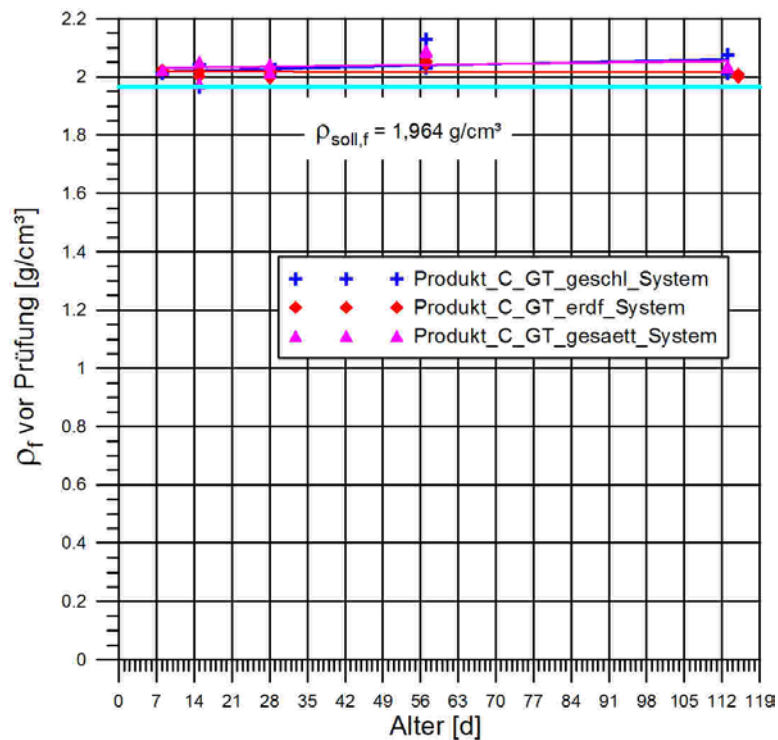


Abbildung 26: Produkt C-GT – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 115 d

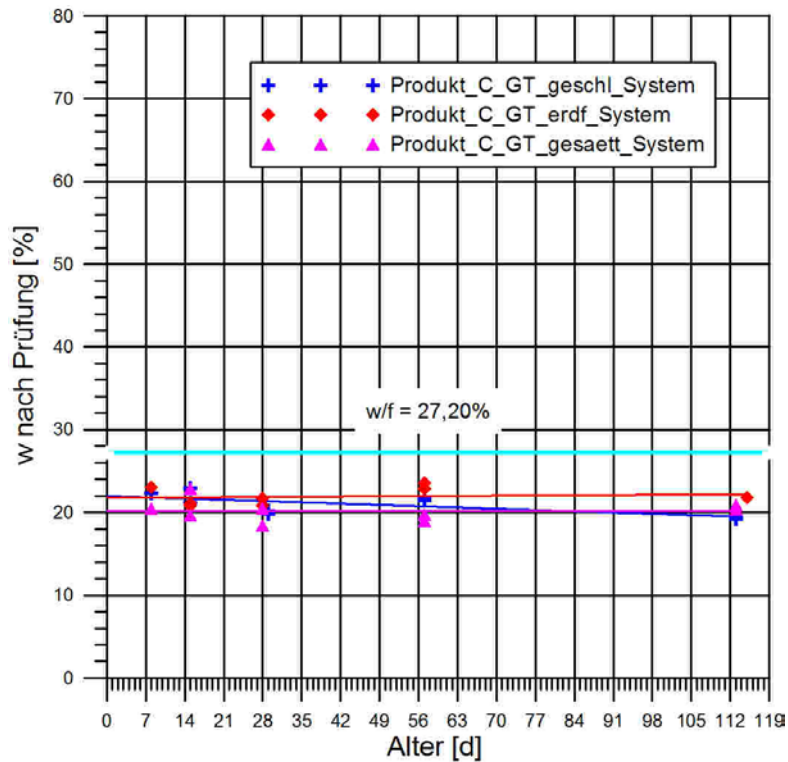


Abbildung 27: Produkt C-GT – Entwicklung von w bis zum Alter von 115 d

Abbildung 28 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt C-TL bis zum Alter von 115 d. Abbildung 29 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 30 zeigt die zugehörige Entwicklung von w. Die Sollwerte sind mit eingetragen.

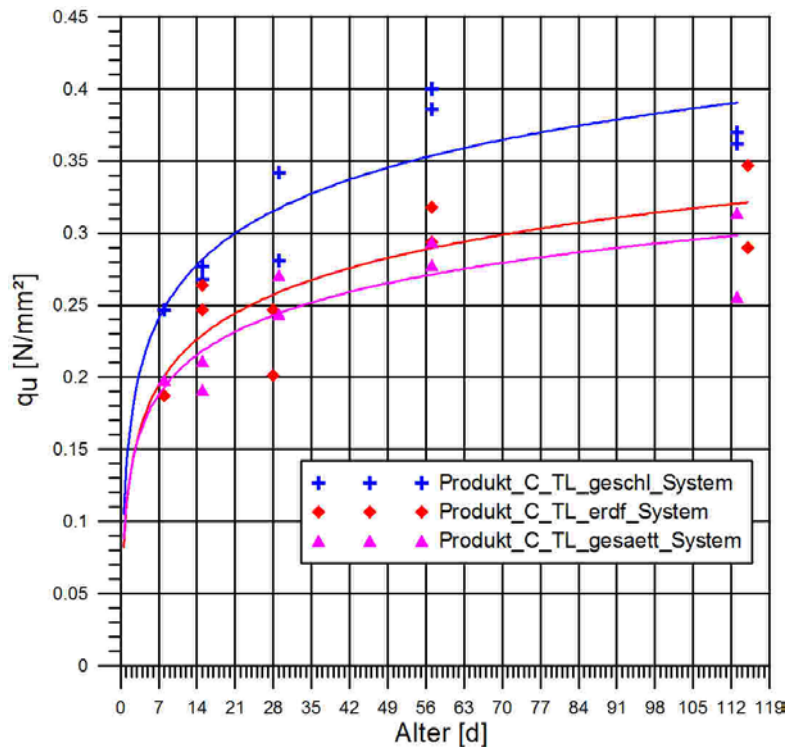


Abbildung 28: Produkt C-TL – Entwicklung von  $\rho_u$  bis zum Alter von 115 d

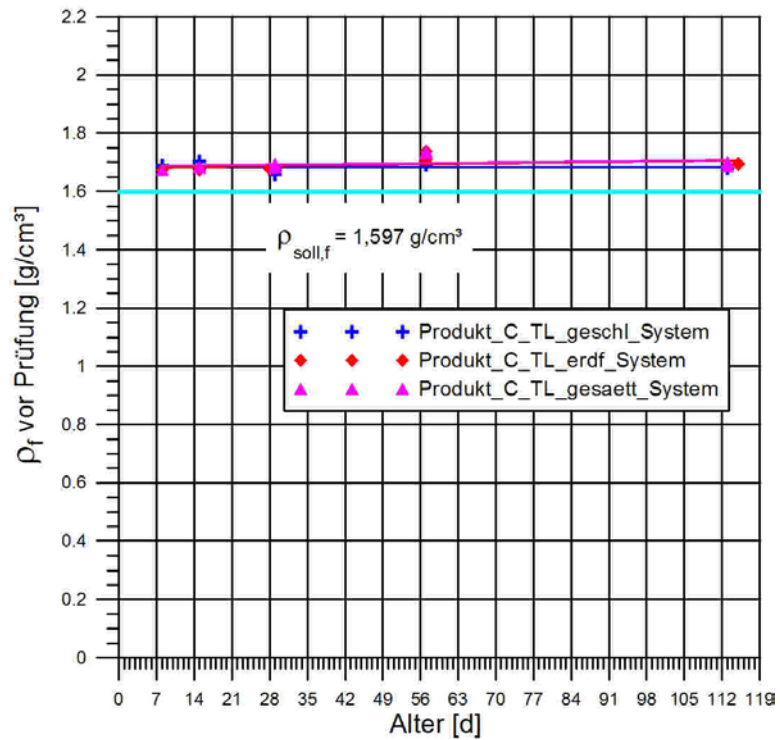


Abbildung 29: Produkt C-TL – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 115 d

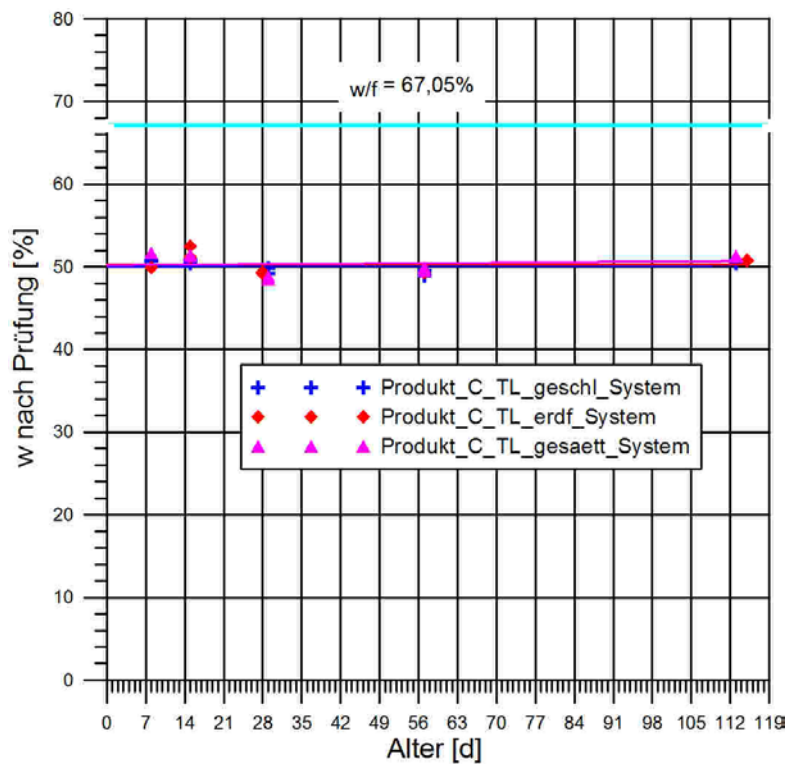


Abbildung 30: Produkt C-TL – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 115 d

Die altersabhängigen Größenwerte von  $q_u$ , die den zeitlichen Verlauf der Verfestigung angeben, liegen bis zum Materialalter von 115 d für alle als Ausgangsstoff verwendeten Bodenarten unterhalb des Grenzwertes von  $0,5 \text{ N/mm}^2$ . Die Extrapolation der Ausgleichskurven auf ein Alter von 30 Jahren ergibt, dass für dieses Alter beim Produkt C-TL der Grenzwert eingehalten ist. Für das Produkt C-GT ergibt die Extrapolation einen Wert  $q_u \approx 0,65 \text{ N/mm}^2$ , für das Produkt C-ST  $q_u \approx 0,55 \text{ N/mm}^2$ ; beide Werte wurden von den Projektpartnern akzeptiert. Die Größenwerte von  $q_u$  sind im Vergleich zwischen den Unterprodukten ähnlich; die Mengen an Ausgangsstoff und Anmischwasser sowie Bindemittel sind unterschiedlich.

Da es sich um natürliche, bindige Ausgangsböden ohne spezielle Aufbereitung jedoch mit entsprechenden Schwankungen beim Feinkornanteil, Ausgangswassergehalt, etc. handelt, ist der Mischvorgang und insbesondere auch die verwendete Gerätetechnik entscheidend für die Gleichförmigkeit der Untersuchungsergebnisse. Weiterhin verändert ein intensiveres und langandauerndes Mischen u. a. die Menge an feinen und feinsten Aggregaten und Körnern, was wiederum deutlichen Einfluss auf den Wasserbedarf der Mischung und letztendlich auch auf die Festigkeitsentwicklung hat. Entsprechend streuen die Ergebnisse von MOS-ZFSV etwas stärker als bei MIP-ZFSV. So liegen z. B. die Wassergehalte  $w$  bei den Unterprodukten C-GT und C-TL zum Teil deutlich unter den  $w/f$  der Rezeptur. Bei der Herstellung der Materialproben unter Betreuung durch den Lieferanten genügte eine geringere als die planmäßige Wassermenge, um das Ausbreitmaß zu erreichen.  $\rho_f$  ist wegen der verringerten Wasserzugabe nur beim Produkt C-TL merklich größer als  $\rho_{\text{soll},f}$ .

### 3.6.3.4 Ergebnisse Produkt D

Abbildung 31 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt D-ST bis zum Alter von 112 d. Abbildung 32 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 33 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.

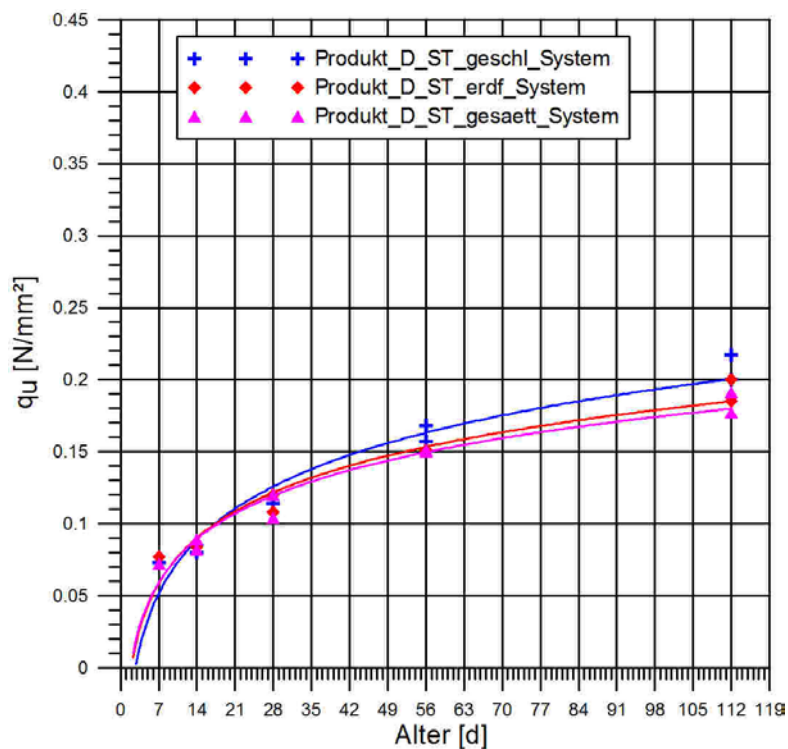


Abbildung 31: Produkt D-ST – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 112 d

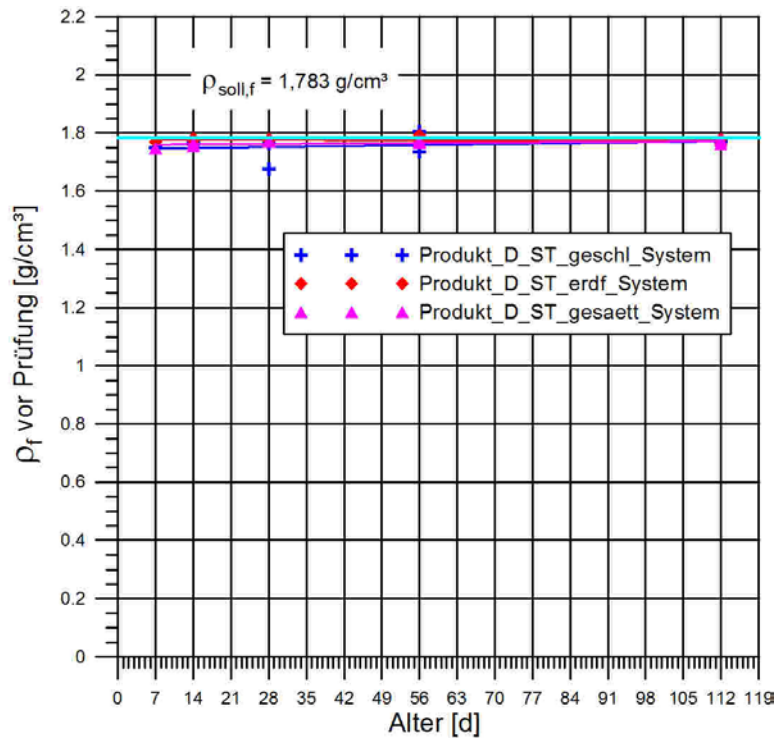


Abbildung 32: Produkt D-ST – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 112 d

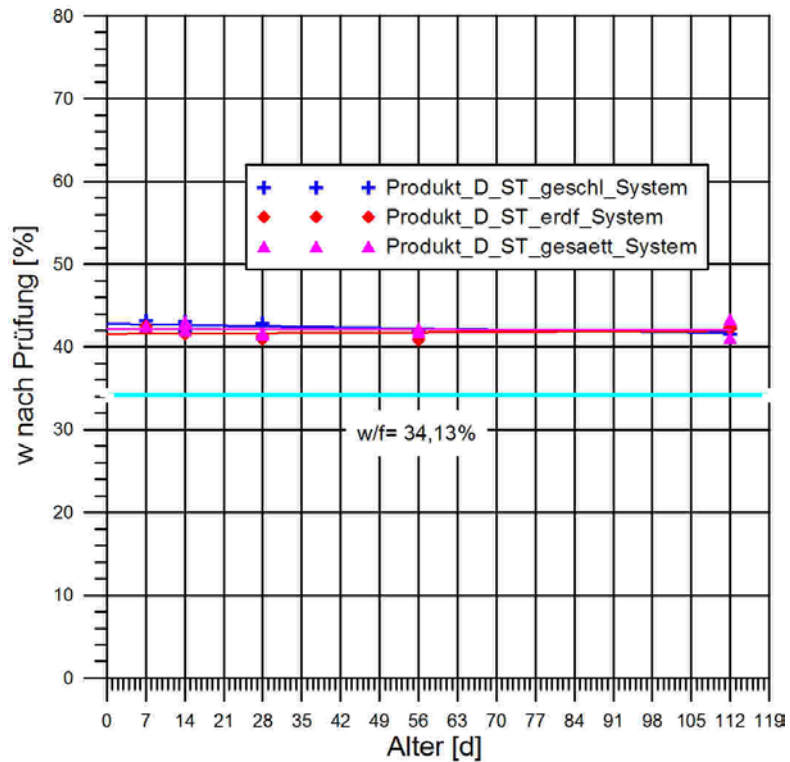


Abbildung 33: Produkt D-ST – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 112 d

Abbildung 34 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt D-GT bis zum Alter von 112 d. Abbildung 35 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 36 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.



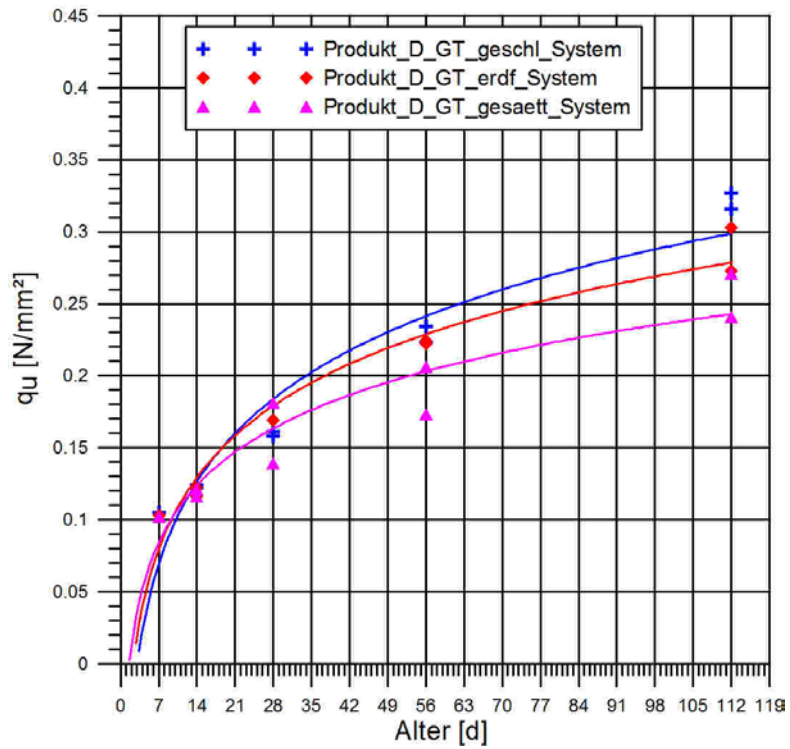


Abbildung 34: Produkt D-GT – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 112 d

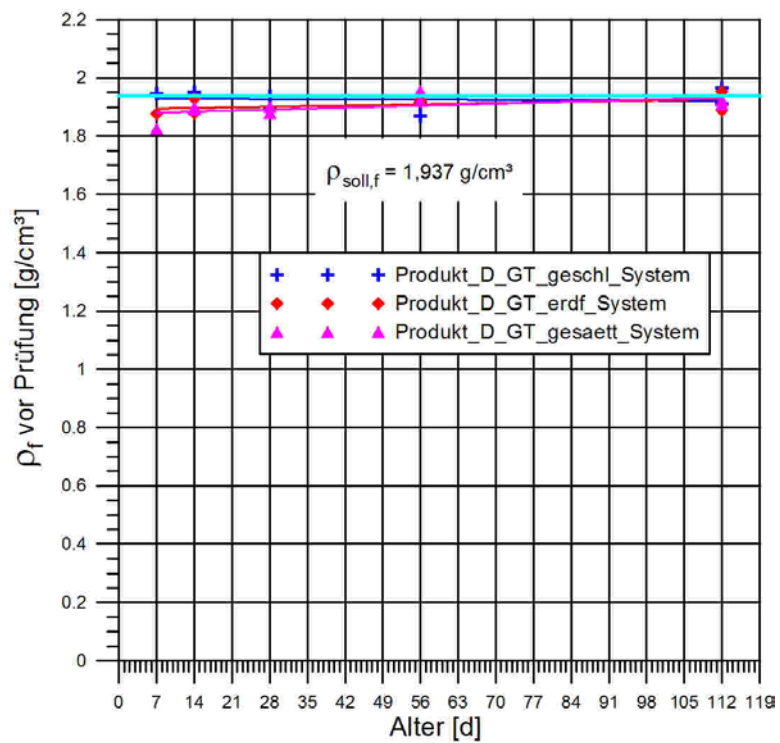


Abbildung 35: Produkt D-GT – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 112 d

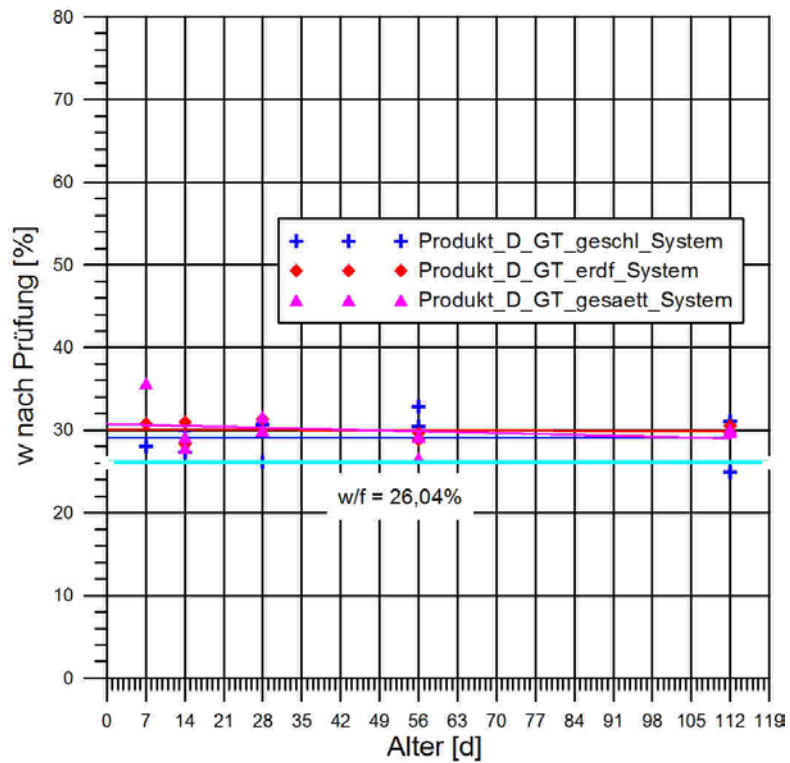


Abbildung 36: Produkt D-GT – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 112 d

Abbildung 37 zeigt die Entwicklung von  $q_u$  für das Produkt D-TL bis zum Alter von 112 d. Abbildung 38 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $\rho_f$  und Abbildung 39 zeigt die zugehörige Entwicklung von  $w$ . Die Sollwerte sind mit eingetragen.

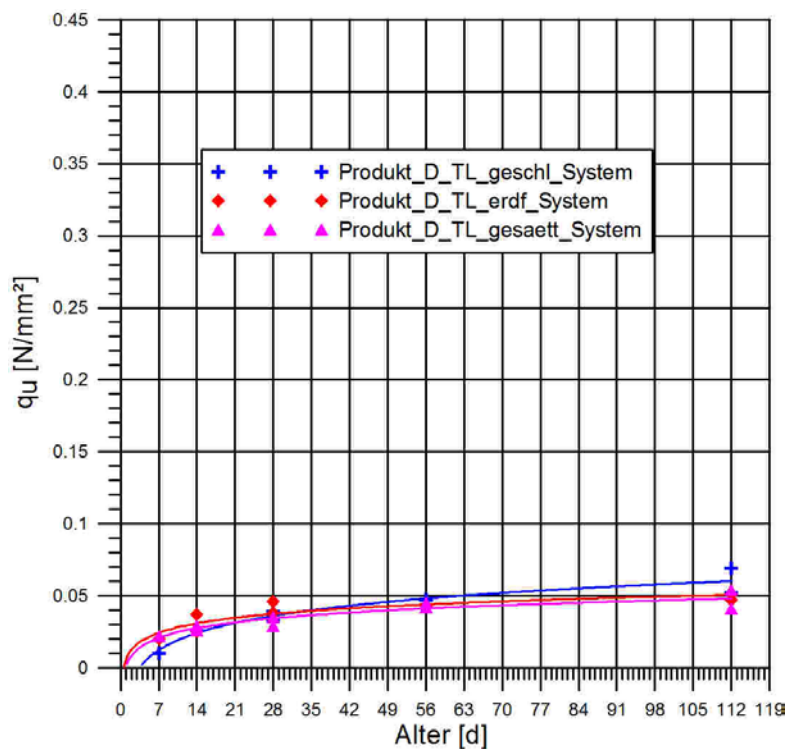


Abbildung 37: Produkt D-TL – Entwicklung von  $q_u$  bis zum Alter von 112 d

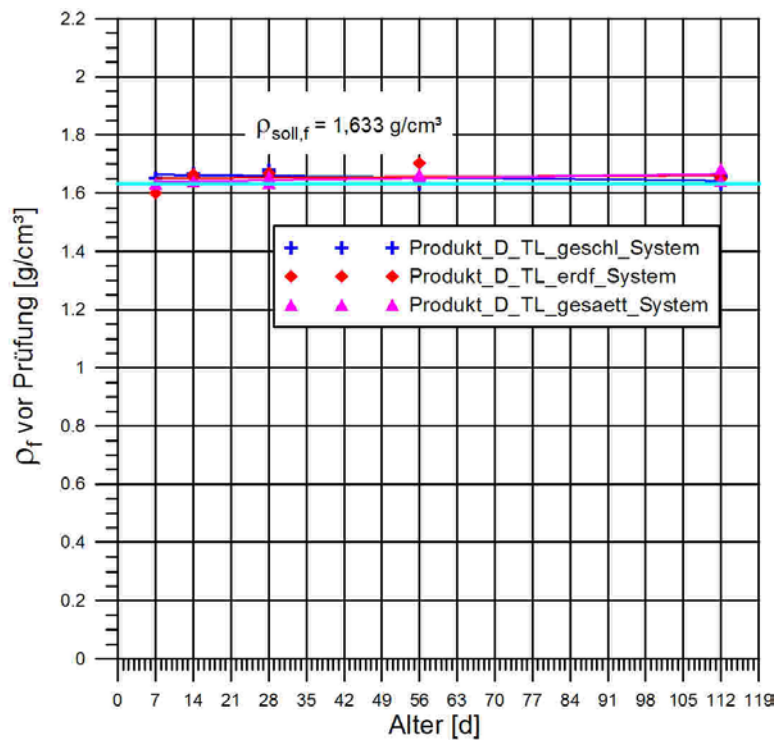


Abbildung 38: Produkt D-TL – Entwicklung von  $\rho_f$  bis zum Alter von 112 d

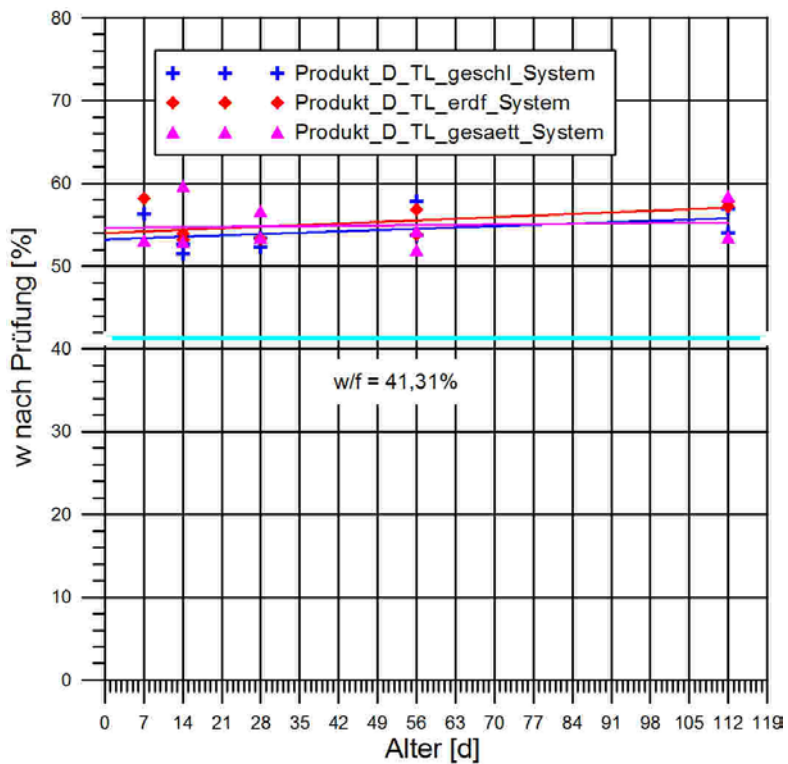


Abbildung 39 Produkt D-TL – Entwicklung von  $w$  bis zum Alter von 112 d

Die altersabhängigen Größenwerte von  $q_u$ , die den zeitlichen Verlauf der Verfestigung angeben, liegen bis zum Materialalter von 115 d für alle als Ausgangsstoff verwendeten

Bodenarten unterhalb des Grenzwertes von  $0,5 \text{ N/mm}^2$ . Die Extrapolation der Ausgleichskurven auf ein Alter von 30 Jahren ergibt, dass auch für dieses Alter der Grenzwert für die Unterprodukte D-ST und D-TI nicht überschritten wird. Für das Produkt D-GT ergibt die Extrapolation einen Wert  $q_u \approx 0,65 \text{ N/mm}^2$ , was immer noch einer mittleren Wiederaushubfähigkeit entspricht. An dem mit dem Ausgangsstoff TL hergestellten Materialproben des Produkt D-TL haben die Untersuchungen sehr niedrige Größenwerte von  $q_u (< 0,1 \text{ N/mm}^2)$  ergeben. An Proben, die älter als 56 d sind, tritt keine bedeutende Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit gegenüber derjenigen im Alter von 56 d mehr auf. Die bestimmten Größenwerte von  $q_u$  nehmen für gleiches Probenalter und damit im Zeitverlauf in der Reihung Ausgangsstoff GT/ST\*/TL ab. Die Wasser-Feststoff-Werte beziehungsweise Wassergehalte nehmen in der genannten Reihenfolge zu. Die Wassergehalte liegen für alle Unterprodukte über den Wasser-Feststoff-Werten gemäß Rezeptur. Bei der Herstellung der Prüfkörper unter Betreuung des Lieferanten musste man mehr Wasser als in den Rezepturen angeben, um das erforderliche Ausbreitmaß zu erreichen. Bedeutende Abweichungen von  $\rho$  und  $\rho_{\text{soll},f}$  sind nicht vorhanden.

### 3.6.4 Auswahl der ZFSV für die Hauptuntersuchungen

Den Lieferanten der vier im Abschichtungsverfahren ausgewählten ZFSV (siehe Abschnitt 2.1), wurden die Ergebnisse der Untersuchungen der Volumenstabilität (Langzeit), Verfestigung, Dichte und Wassergehalt ihrer Produkte bis zu einem Probenalter von 28 d mit der Möglichkeit einer Rezepturkorrektur zur Verfügung gestellt. Die Lieferanten haben keine Rezepturkorrekturen oder sonstige Änderungen mitgeteilt.

Mit dem Produkt B sind im Labor deutliche Schwierigkeiten in der Handhabung aufgetreten. Die ausgeführten Prüfungen ergaben sehr geringe Werte für  $q_u$ . Nach Rückfrage beim Hersteller hat man das Material planmäßig hergestellt. Gegenüber den anderen Produkten ließ sich eine deutliche Wasserabsonderung (Bluten) beobachten, wenn auch unterhalb des Grenzwertes gemäß dem Anforderungskatalog.

Die Projektpartner kamen in der 3. Sitzung der Projektpartner am 10.07.2013 überein, dass das Produkt B in der an der OTH.R geprüften Form nicht für den Einsatz bei Fernwärmeleitungen geeignet ist. Für die Hauptuntersuchungen kam es nicht in Frage.

Die Produkte A, C und D sind aufgrund der Voruntersuchungen für eine Verwendung bei den Hauptuntersuchungen geeignet.

Bei den verbleibenden drei Produkten hat man das **Produkt A (MIP-ZFSV)** und das **Produkt C (MOS-ZFSV) mit den drei Unterprodukten C-ST, C-GT und C-TL** ausgewählt. Dadurch deckt das Projekt die Spannbreite der Produkte und der Bereitstellung der Produkte beziehungsweise der Ausgangsstoffe ab.

Produkt C und D sind in Herstellung und Zusammensetzung ähnlich. Entscheidend für die Auswahl war u. a., dass bei Produkt C geringere Mengen an Bindemitteln je  $\text{m}^3$  erforderlich waren als bei Produkt D. Nach Wissen der Projektpartner hat eine größere Bindemittelmenge je  $\text{m}^3$  höhere Kosten je  $\text{m}^3$  zur Folge, was Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit hat.

In Abbildung 40 ist das im Projekt durchlaufene Abschichtungsverfahren schematisch dargestellt.

Umfrage AGFW (In der Branche eingesetzte ZFSV)	Laborversuche mit ZFSV (größte Relevanz für Branche)	Technikumsversuche
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilisierte Sandmischung</li> <li>• Karbofill E</li> <li>• Porenleichtbeton</li> <li>• RSS-Flüssigboden</li> <li>• Füma und Füma-Boden Erdbeton</li> <li>• Dämmer und Blitzdämmer</li> <li>• Weimarer Bodenmörtel</li> <li>• BSC Grabenmörtel</li> <li>• Terra Flow Compound 14</li> <li>• Füllmix</li> <li>• Readymix</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Mixed in Plant</b></li> <li>• Produkt A</li> <li>• <b>Produkt B</b></li> <li>• <b>Mixed on Site</b></li> <li>• Produkt C <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt C-ST</li> <li>• Produkt C-GT</li> <li>• Produkt C-TL</li> </ul> </li> <li>• <b>Produkt D</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Produkt D-ST</b></li> <li>• <b>Produkt D-GT</b></li> <li>• <b>Produkt D-TL</b></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt A</li> <li>• Produkt C <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt C-ST</li> <li>• <b>Produkt C-GT</b></li> <li>• <b>Produkt C-TL</b></li> </ul> </li> </ul>

Abbildung 40: Abschichtungsverfahren im Projekt (rote Produkte wurden anschließend nicht weiter untersucht)

### 3.6.5 Lagerungsbedingungen für die Hauptuntersuchungen

Für die Hauptuntersuchungen wurde noch die Lagerungsbedingung **gesättigtes System** angewandt, sofern eine separate Lagerung der Probekörper außerhalb der Versuchsggeräte überhaupt erforderlich war. Die Lagerungsbedingung wurde einerseits gewählt, um mit möglichst gesättigten Proben arbeiten zu können und das langwierige und aufwändige Nachsättigen der Proben zu vermeiden, und andererseits, um die Streuung der Versuchsergebnisse zu minimieren, was die Ergebnisse der Voruntersuchungen nahelegten.

## 3.7 Hauptuntersuchungen Produkt A und C – Last-Setzungs-Verhalten

### 3.7.1 Motivation und Versuch

Die Ermittlung des eindimensionalen Last-Setzungs- beziehungsweise Last-Verformungsverhaltens erfolgt mit relativ geringem versuchstechnischen Aufwand im Labor mit Hilfe des eindimensionalen Kompressionsversuchs, der in (DIN 18135:2012-04) beschrieben ist. Gebräuchlich ist auch die Bezeichnung Oedometerversuch. Abbildung 41 zeigt das Versuchsgerät und Belastungsprinzip.

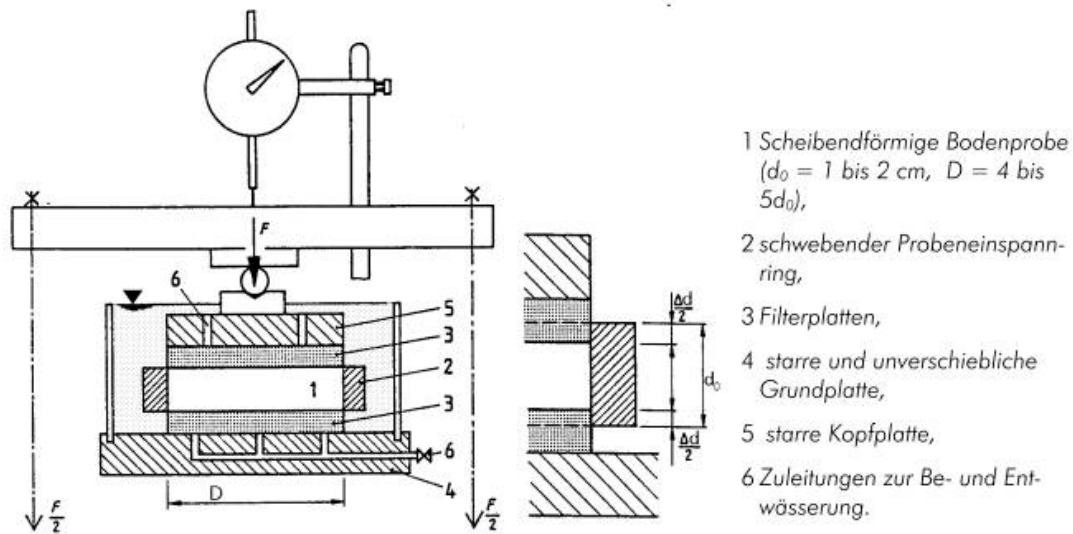


Abbildung 41: Kompressionsgerät (ÖNORM B 4420: 1989 01 01)

Man baut die Bodenprobe in einen radial sehr steifen Stahlring ein. Anschließend belastet und entlastet man die Probe vertikal stufenweise in vorher festzulegenden Laststufen mit Druckspannungen  $\sigma$  (siehe Abbildung 42a).

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{Probenfläche}}}$$

Formel 5: Berechnung der Druckspannung

Da die Belastung im Allg. über Gewichte erfolgt, handelt es sich um einen spannungs- bzw. kraftgesteuerten Versuch. Durch den sehr steifen Stahlring erfolgt die Belastung und Entlastung theoretisch querdehnungsfrei. Die sich bei Belastung einstellenden Zusammendrückungen und die sich bei Entlastungen einstellenden Hebungen, erfasst man in Abhängigkeit der verstrichenen Zeit seit Belastungs- beziehungsweise Entlastungsbeginn. Diese bezeichnet man als Setzungen in der jeweiligen Laststufe. Zur Auswertung trägt man die Endwerte der üblicherweise auf die Ausgangsprobenhöhe normierten Setzungen der jeweiligen Laststufe (= Stauchungen), in einem Druck-Stauchungsdiagramm auf (Abbildung 42b). Eine Laststufe wird im Allg. 24 h konstant gehalten, so dass alle Setzungen abgeklungen sind, bevor die nächste Laststufe aufgebracht wird. Aus diesem Diagramm ermittelt man für die bautechnisch relevanten Spannungsintervalle die Steifemoduli  $E_s$  [N/mm<sup>2</sup>] als Sekantenmoduli in der Art eines Elastizitätsmoduls gemäß den Grundsätzen der Festigkeitslehre, wie in Abbildung 43 schematisch dargestellt.

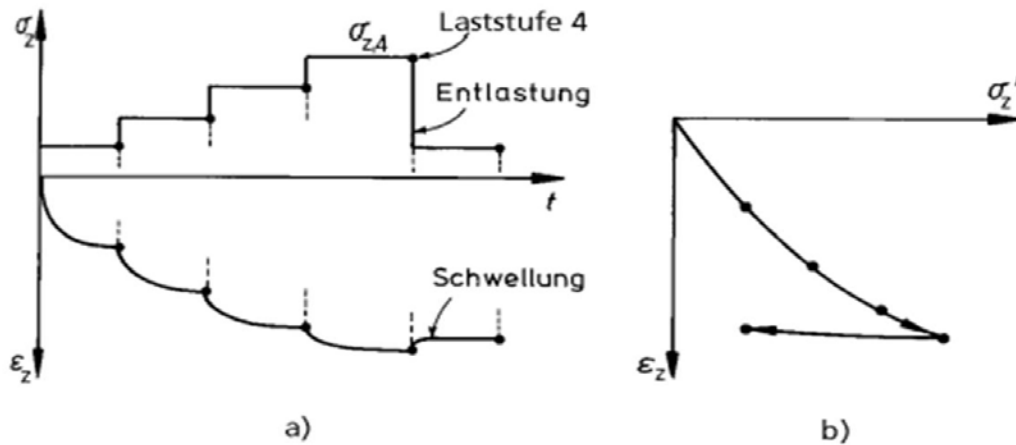


Abbildung 42: Typischer Versuchsverlauf und Ergebnisdarstellung. a) oben: Steigerung der Druckspannungen in vier Laststufen  $\sigma_1$ - $\sigma_4$ , anschließend Entlastung auf  $\sigma_1$ ; a) unten: vertikale Zusammendrückung beziehungsweise Stauchung und Schwellung mit der Zeit, b) Druck-Stauchungs-Diagramm (Quelle: OTH.R, Skript Prof. Neidhart; unveröffentlicht; leicht verändert)

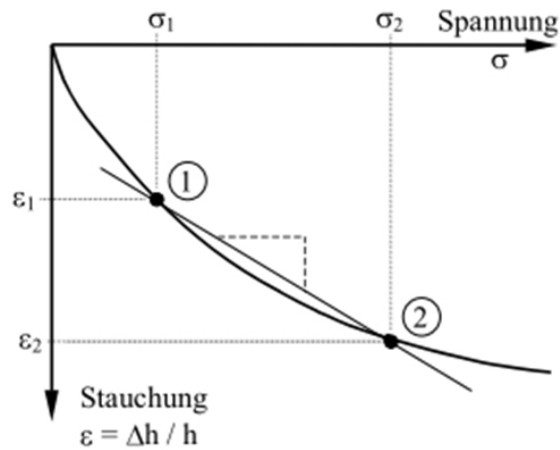


Abbildung 43: Prinzip der Ermittlung von  $E_s$  als Sekantenmodul (Quelle: OTH.R, Skript Prof. Neidhart; unveröffentlicht; leicht verändert)

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \left[ \frac{MN}{m^2} \right]$$

Formel 6: Berechnung des Steifemoduls  $E_s$  als Sekantenmodul.

Die auftretenden Setzungen resultieren aus dem Auspressen von Wasser und/oder Luft aus dem Mehrphasen-System Boden oder ZFSV, das aus Feststoff, Wasser und Luft besteht (siehe Abbildung 44). Dabei lagern sich die Einzelbestandteile des Feststoffanteils durch Verringerung des von Wasser und Luft gefüllten Porenraums um (Verdichtung).

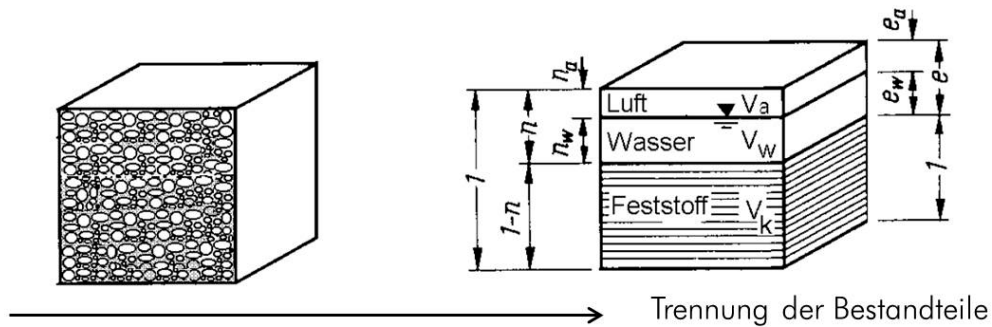


Abbildung 44: Mehrphasen-System Boden oder ZFSV (Quelle: OTH.R, Skript Prof. Neidhart; unveröffentlicht)

Der Großteil der Setzungen ist deshalb plastisch. Elastische Anteile, die sich als Hebungen bei Entlastung zeigen, resultieren vorwiegend aus elastischen Zusammendrückungen des Feststoffanteils.

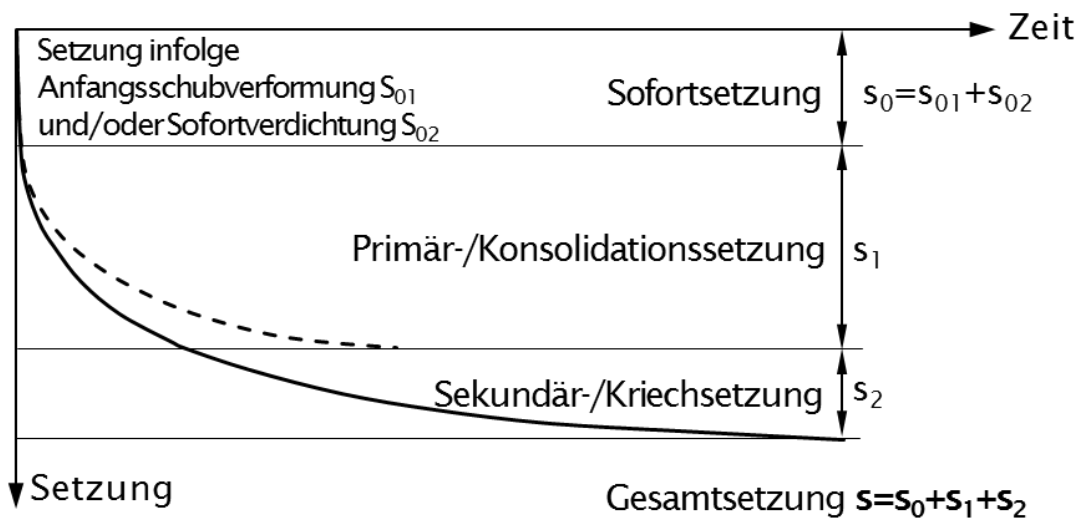


Abbildung 45: Setzungsarten über die Zeit

Die Setzungen lassen sich in **Sofortsetzungen**  $s_0$ , **Konsolidationssetzungen**  $s_1$  und **Sekundärsetzungen**  $s_2$  unterscheiden (siehe Abbildung 45). Die **Sofortsetzungen** tritt unmittelbar zum Beginn einer neuen Laststufe auf, ohne dass man diese gesondert betrachtet. Bei **Konsolidationssetzungen** wird Wasser aus der Probe ausgedrückt, was aufgrund der häufig geringen Durchlässigkeit der Böden sehr lange andauert. Konsolidationssetzungen bilden den Hauptteil der Setzungen, denen die zuvor und oben beschriebenen Vorgänge zu Grunde liegen. **Sekundär- oder Kriechsetzungen** sind lang anhaltende Setzungen bei konstanter Last, die nach Abschluss der Konsolidation zu beobachten sind u. U. über Jahre andauern.

Das Ende der Konsolidationssetzungen und den Beginn der Kriechsetzungen bestimmt man durch verlängerte Beobachtungszeiten in einer Laststufe (Zeit-Setzungs-Versuch) nach einem in (DIN 18135:2012-04) beschriebenen Verfahren.

Mit dem Druck-Stauchungsdiagramm erfolgen Aussagen über das Verformungsverhalten und diesbezügliche Besonderheiten des untersuchten Materials. Die Steifemoduli  $E_s$  benötigt man zur rechnerischen Abschätzung der Setzungen unter einer äußeren Last wie zum Beispiel Straßenverkehr.



Im (AGFW Arbeitsblatt FW 401) findet sich der Elastizitätsmodul von Boden ohne Anspruch auf Vollständigkeit im Teil 10 (Statische Auslegung; Grundlagen der Spannungsermittlung) als  $E_5$ , E-Modul Erdreich bei der Ermittlung von Bettungsmoduli beziehungsweise einer Bettungsziffer. Es ist zu beachten, dass der  $E_s$ -Modul von Boden nicht konstant ist, sondern vom Druckspannungsintervall und der Anzahl der Belastungen und Entlastungen abhängt. Die Probe verdichtet sich während der Erstbelastung stärker als bei folgenden Entlastungen und Wiederbelastungen auf das gleiche Niveau.

### 3.7.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Im Forschungsvorhaben wurde das eindimensionale Last-Verformungsverhalten von (Klöden und Wolfrum 2014) nach folgendem Versuchsprogramm (Tabelle 10) und weitgehend einheitlichem Belastungsplan (Tabelle 11) untersucht.

Tabelle 10: Versuchsprogramm Eindimensionales Last-Verformungsverhalten

	Teilprobe 1	Teilprobe 2	Teilprobe 3
Ausgangsboden ST*	X	X	-
Ausgangsboden GT	X	X	-
Ausgangsboden TL	X	X	-
Produkt A – 7 d	X	X	X
Produkt A – 28 d	X	X	X
Produkt C-GT – 7 d	X	X	X
Produkt C-GT – 28 d	X	X	X
Produkt C-ST – 7 d	X	X	X
Produkt C-ST – 28 d	X	X	X
Produkt C-TL – 7 d	X	X	-
Produkt C-TL – 28 d	X	X	-

Tabelle 11: Belastungsplan Eindimensionales Last-Verformungsverhalten

Laststufe [kPa]	Belastungsdauer [h] oder [d]	Belastung/Entlastung
<b>25 (Vorbelastung)</b>	24 h bzw. 6 d bzw. 27 d	Vorbelastung
12,5	24	Erstentlastung
25	24	Zweitbelastung
50	72	Erstbelastung mit Zeit-Setzungs-Beobachtung
25	6	Erstentlastung
12,5	18	Zweitentlastung
25	6	Drittbelastung
50	18	Zweitbelastung
100	24	Erstbelastung
200	24	Erstbelastung mit Zeit-Setzungs-Beobachtung
100	72	Erstentlastung
50	6	Erstentlastung
25	18	Zweitentlastung
12,5	6	Drittentlastung

Die Vorbelastung erfolgte bei den Ausgangsböden des Produktes C für etwa 24 h unmittelbar nach Probeneinbau. Bei den ZFSV erfolgte die Vorbelastung erst nach 24 h bis zur Erstentlastung. Damit wurde berücksichtigt, dass ZFSV zunächst abbinden müssen und im Graben im Allg. erst nach etwa 1 Tag überschüttet bzw. belastet werden.

Die Ausgangsböden hat man mit einem Wassergehalt an der vorab bestimmten Fließgrenze des Feinkornanteils aufbereitet und unmittelbar nach der Aufbereitung beziehungsweise der Herstellung eingebaut.

Die Auswertung und Darstellung erfolgte mit der bezogenen Zusammendrückung

$$s' = \frac{s}{h_0}$$

Formel 7: Verhältnis der bezogenen Zusammendrückung

$s'$	bezogene Zusammendrückung	[-]
$s$	Zusammendrückung	[mm]
$h_0$	Anfangshöhe der Probe	[mm]

### 3.7.3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisdokumentation und Ergebnisdarstellung ist sehr umfangreich. Hier lassen sich nur beispielhaft Ergebnisse darstellen und die wichtigsten Versuchsergebnisse zusammenfassen.

Abbildung 46 zeigt das Druck-Stauchungsdiagramm für den Ausgangsboden ST\*. Abbildung 47 zeigt das Druck-Stauchungsdiagramm für das Produkt C-ST im Alter von 28 d bei Belastungsbeginn. Abbildung 48 zeigt das Druck-Stauchungsdiagramm für das Produkt A im Alter von 7 d bei Belastungsbeginn. Abbildung 49 zeigt das Druck-Stauchungsdiagramm für das Produkt A im Alter von 28 d bei Belastungsbeginn. In den Diagrammen sind die Einbaudichten feucht  $\rho_{f,v}$  und trocken  $\rho_{d,v}$  sowie der Einbauwassergehalt  $w_{f,v}$  für eine Teilprobe mit angegeben. In der zweiten Zeile sind die Größenwerte für die Proben nach Versuchsende (Index ...,n) angegeben.

$\rho_{f,v}$	Einbaudichte feucht	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{d,v}$	Einbaudichte trocken	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w_{f,v}$	Einbauwassergehalt	[-]
$\rho_{f,n}$	Ausbaudichte feucht	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{d,n}$	Ausbaudichte trocken	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w_{f,n}$	Ausbauwassergehalt	[-]

Die Einbaudichte des Ausgangsbodens ST\* entspricht in etwa einem Verdichtungsgrad  $D_{pr} = 0,90$  und damit 90% der maximal erreichbaren Trockendichte bei Verdichtung im Labor nach einem vorgegebenen Einbauverfahren mit normierter Verdichtungsenergie aus dem Erdbau. Details finden sich in (DIN 18127:2012-09).

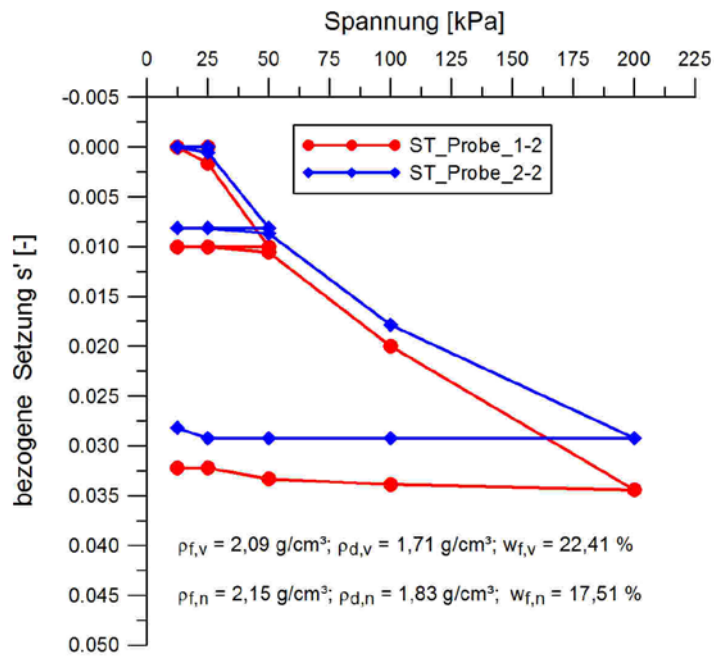


Abbildung 46: Druck-Stauchungsdiagramm Ausgangsboden ST\*

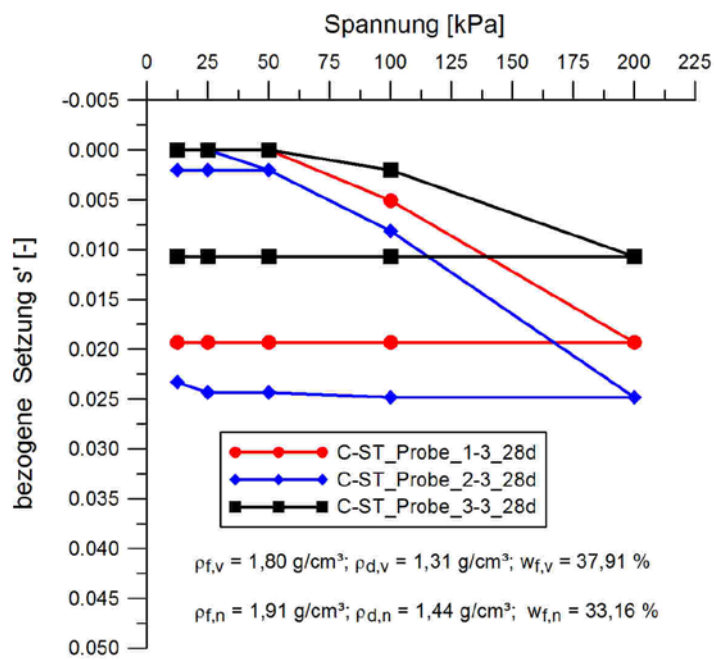


Abbildung 47: Druck-Stauchungsdiagramm Produkt C-ST; Probenalter 28 d bei Belastungsbeginn

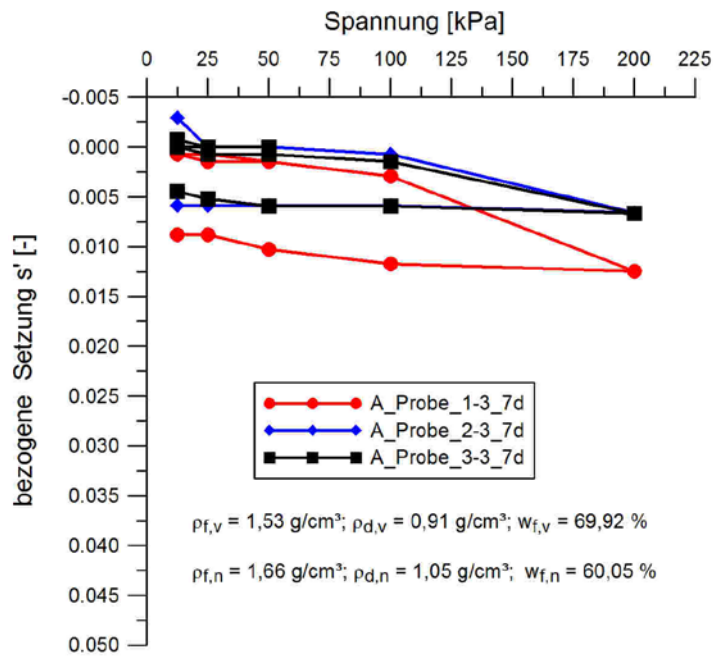


Abbildung 48: Druck-Stauchungsdiagramm Produkt A; Probenalter 7 d bei Belastungsbeginn

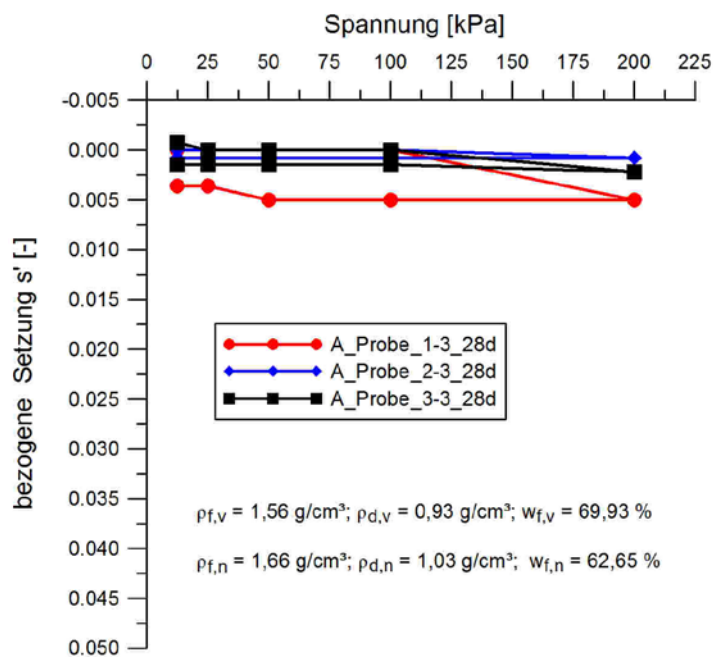


Abbildung 49: Druck-Stauchungsdiagramm Produkt A; Probenalter 28 d bei Belastungsbeginn

In Abbildung 50 sind die Zeit-Setzungs-Diagramme für den Ausgangsboden TL und das Produkt C-TL im Alter von 7 d und 28 d für die Laststufe 50 kPa dargestellt. In Abbildung 51 sind die Zeit-Setzungs-Diagramme für den Ausgangsboden ST\* und das Produkt C-ST im Alter von 7 d und 28 d für die Laststufe 200 kPa dargestellt.

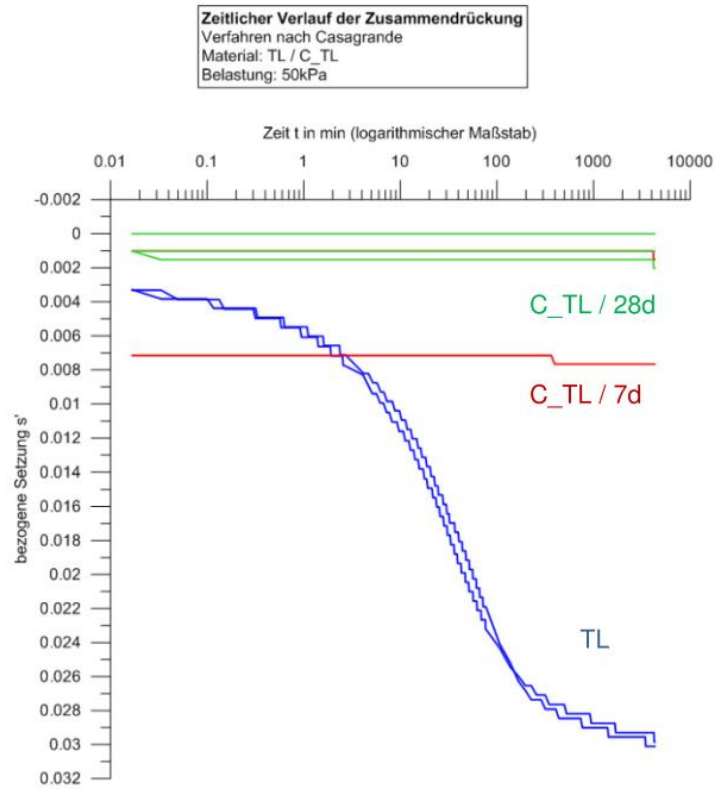


Abbildung 50: Laststufe 50 kPa - Zeit-Setzungs-Diagramm TL/ Produkt C-TL 7 d und Produkt C-TL 28 d bei Belastungsbeginn

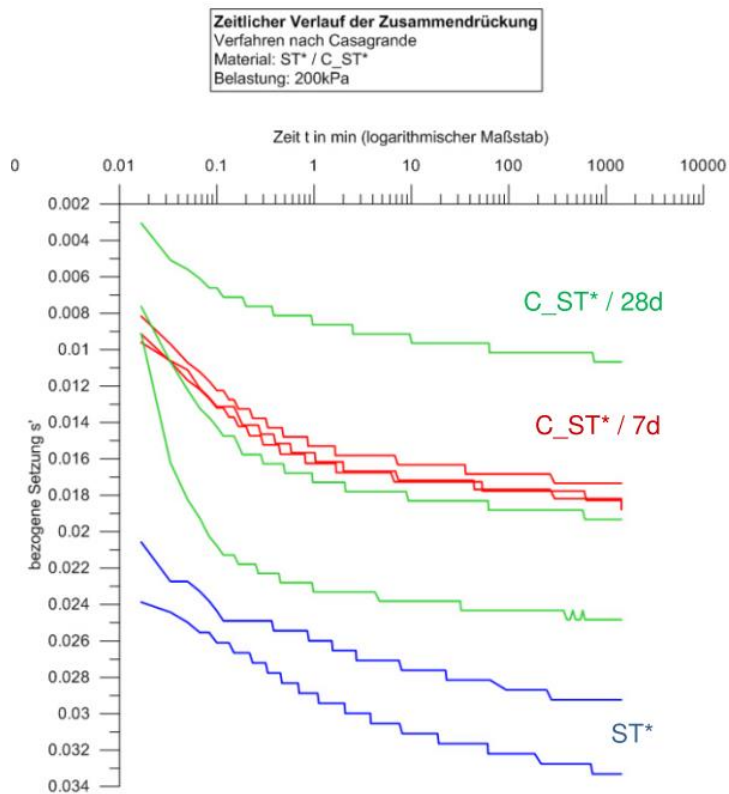


Abbildung 51: Laststufe 200 kPa - Zeit-Setzungs-Diagramm ST\*/ Produkt C-ST 7 d und Produkt C-ST 28 d bei Belastungsbeginn

In Tabelle 12 sind die als Sekantenmodul ermittelten Steifemoduli für das Spannungsintervall/die Laststufen 25 - 50 kPa für die Erst- und Zweitbelastung zusammengestellt. „ $\rightarrow\infty$ “ gibt an, dass die Messung keinen Endsetzungsunterschied zwischen den Laststufen ergeben hat und damit die Steifigkeit bzw. der Steifemodul der Probe sehr hoch ist. Das Spannungsintervall/die Laststufen 25 - 50 kPa decken die üblichen Überlagerungsspannungen von KMR von etwa 1,0 bis 3,0 m ab.

Tabelle 12: Spannungsintervall/Laststufen 25-50 kPa – Steifemoduli Erstbelastung und Zweitbelastung

Spannungsintervall/Laststufen: 25 - 50 kPa			
Belastung	Steifemodul $E_s$ [MPa]		
	---	Produkt A/7 d	Produkt A/28 d
Erstbelastung		34,05	$\rightarrow\infty$
Zweitbelastung		$\rightarrow\infty$	$\rightarrow\infty$
	Ausgangsboden ST*	Produkt C-ST/7d	Produkt C-ST/28 d
Erstbelastung	3,15	14,39	12,33
Zweitbelastung	45,60	49,35	$\rightarrow\infty$
	Ausgangsboden GT	Produkt C-GT/7d	Produkt C-GT/28 d
Erstbelastung	2,39	91,28	$\rightarrow\infty$
Zweitbelastung	91,5	$\rightarrow\infty$	$\rightarrow\infty$
	Ausgangsboden TL	Produkt C-TL/7d	Produkt C-TL/28 d
Erstbelastung	0,88	14,12	32,55
Zweitbelastung	7,03	49,2	24,55

Die Ergebnisse aus der Darstellung und Auswertung der Druck-Stauchungsdiagramme und Zeit-Setzungs-Diagramme lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Produkt C zeigte trotz geringerer Trockendichten und höheren Wassergehalten bei Belastungsbeginn im Vergleich zu den Ausgangsböden ein Last-Setzungsverhalten mit deutlich geringeren Setzungen. Bei gleichen Druckspannungen stellten sich Setzungen ein, die erheblich unter den Setzungen der Ausgangsböden lagen (etwa Faktor 1,5-2,5 geringer für die Ausgangsböden ST\* und GT und etwa Faktor 5 geringer für den Ausgangsboden TL).
- Das Produkt A zeigte ebenfalls nur geringe Setzungen, die in normierter Form in der Größenordnung der Setzungen des Produktes C lagen.
- Mit zunehmendem Probenalter (28 d gegenüber 7 d) verringerten sich die Setzungen. Nur für das Produkt C-ST waren die Setzungen in etwa identisch
- Die Setzungen der ZFSV waren überwiegend plastischer Natur. Bei Entlastung blieben die aufgetretenen Setzungen erhalten. Dies ist ein Anzeichen für geringes Schwellvermögen und geringe Korndeformationen.
- Im Belastungsbereich zwischen 50 kPa und 100 kPa (nur Produkt C) und (nochmals) zwischen 100 kPa und 200 kPa nahmen die Setzungen deutlich und schlagartig zu.
- Die Darstellung des Zeit-Setzungs-Verlaufes in der Laststufe 50 kPa ergab bei den Ausgangsböden bodentypisches Verhalten mit Sofortsetzungen, Konsolidationssetzungen und Beginn der Kriechsetzungen.
- Die Darstellung des Zeit-Setzungs-Verlaufes in der Laststufe 50 kPa ergab bei den ZFSV ein für bindige Böden untypisches Verhalten: Es stellten sich ausschließlich Sofortsetzungen ein, Konsolidationssetzungen und Kriechsetzungen blieben aus.

- Erst in der Laststufe 200 kPa ergab die Darstellung des Zeit-Setzungs-Verlaufes für die ZFSV trotz einer Beobachtungszeit von nur 24 h bodentypisches Verhalten (Sofortsetzungen, Konsolidationssetzungen, Kriechsetzungen) oder beginnendes bodentypisches/bodenähnliches Verhalten (Sofortsetzungen, beginnende Konsolidationssetzungen).
- Die Steifemoduli der ZFSV liegen für die **Erstbelastung** deutlich über den Steifemoduli der Ausgangsböden und nehmen mit zunehmendem Probenalter zu oder bleiben in etwa gleich. Der Steifemodul des Produkts A liegt in der Spannbreite der Steifemoduli des Produktes C.
- Die Steifemoduli der ZFSV liegen auch für die **Zweitbelastung** deutlich über den Steifemoduli der Ausgangsböden.

### 3.7.4 Folgerungen

Aus der Untersuchung des eindimensionalen Last-Verformungsverhaltens lässt sich folgern:

- Die untersuchten ZFSV verhalten sich deutlich steifer als die Ausgangsböden, was angesichts geringerer Trockendichten und höherer Wassergehalte bei Belastungsbeginn im Vergleich zu den Ausgangsböden ungewöhnlich ist und steht im Gegensatz zu den Grundsätzen der Bodenmechanik üblicher bindiger Böden.
- Offensichtlich stellt sich ein „Strukturbruch“ ein, der eine Änderung des Last-Verformungsverhaltens/ Stoffverhaltens der ZFSV mit sich bringt.
- In Spannungsbereichen über dem „Strukturbruch“ verändert sich das mechanische Verhalten der ZFSV hin zu dem natürlicher bindiger Böden bzw. der Ausgangsböden.
- Die Grenzspannung dieses „Strukturbruches“ ist vom Probenalter und der Rezeptur abhängig.

## 3.8 Hauptuntersuchungen Produkt A und C - Scherfestigkeit

### 3.8.1 Motivation

In der Geotechnik bestimmt man die Scherfestigkeit von Böden vorzugsweise mit dem Triaxialversuch. Als Scherfestigkeit versteht man die maximal mögliche Schubspannung in einer Scherfläche im Boden oder im ZFSV. Ist die Scherfestigkeit erreicht, lassen sich die Verformungen in der Scherfläche steigern, ohne die Scherspannungen weiter zu vergrößern: Man spricht vom Grenzzustand. Überschreitet man die Scherfestigkeit, können die Scherspannungen gleich bleiben oder abfallen, während sich das Material weiter verformt.

Die mathematische Formulierung für die Scherfestigkeit im Grenzzustand mit Scherparametern hängt von den Versuchsrandbedingungen ab. Kann das Material entwässern, gilt:

$$\tau_f \approx c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

*Formel 8: Berechnung der Scherspannung im Grenzzustand für Materialien die entwässern können*

$\tau_f$	Scherspannung im Grenzzustand (failure)	[kPa]
$c'$	effektive Kohäsion	[kPa]
$\sigma'$	effektive Normalspannung auf die Scherfläche	[kPa]
$\varphi'$	effektiver Reibungswinkel im Boden	[°]
$\tan \varphi'$	(innerer) Reibungsbeiwert (analog Reibbeiwert $\mu$ in der Physik)	[-]

Kann das Material nicht entwässern, gilt

$$\tau_f \approx c_u + \sigma \cdot \tan \varphi_u$$

Formel 9: Berechnung der Scherspannung im Grenzzustand für Materialien die nicht entwässern können

$c_u$	Kohäsion des undrainierten Bodens	[kPa]
$\varphi_u$	Reibungswinkel des undrainierten Bodens;	[°]
	zumeist $\varphi_u \approx 0^\circ$	

Es ist für bindige Böden und ZFSV unerlässlich, sowohl die effektiven Scherfestigkeitsparameter (Formel 8) als auch die undrainierten Scherfestigkeitsparameter (Formel 9) zu kennen, da sich im Boden und ZFSV je nach Belastungs- bzw. Rohrerwärmungsgeschwindigkeit unterschiedliche Zustände zwischen den vorgenannten Grenzwerten der Scherfestigkeiten einstellen.

Legt man KMR nach dem AGFW-Regelwerk (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10) statisch aus, muss man die in Formel 8 definierte Scherfestigkeit u. a. aus zwei Gründen kennen:

**Grund 1:** Man berechnet mit der Wichte des Verfüllmaterials und der Einbautiefe des Rohres die Normalspannungen, die das Verfüllmaterial entlang des Rohrumfangs auf das Rohr ausübt. Anders als Wasser zeigen Verfüllmaterialien kein hydrostatisches, allseitig gleiches Druckverhalten. Im Verfüllmaterial ist in gleichen Tiefen in vertikaler Richtung eine andere Druckspannung vorhanden als in horizontaler Richtung. Diese Druckspannungen bezeichnet man in der Geotechnik als vertikale und horizontale Erddruckspannungen. Das AGFW-Regelwerk legt den Erdruchdruckzustand zu Grunde, für den gilt:

$$\frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} = K_0$$

Formel 10: Berechnung des Erdruchdruckbeiwerts

$\sigma_h'$	effektive horizontale Spannung	[kPa]
$\sigma_v'$	effektive vertikale Spannung	[kPa]
$K_0$	Erdruchdruckbeiwert	[-]

Kann der Erdruchdruckbeiwert  $K_0$  nicht direkt experimentell mittels Triaxialversuchen ermittelt werden, wird dafür häufig die Beziehung aus Formel 1 ( $K_0 \approx 1 - \sin \varphi$ ) angesetzt.

**Grund 2:** Hat man die Normalspannungen ermittelt, bestimmt man mit diesen die tangentialen Reaktionsspannungen, die das Verfüllmaterial auf den PEHD-Mantel des KMR ausübt, wenn sich das KMR axial dehnt und gegen das Verfüllmaterial verschiebt. Für das Verhältnis der Spannungen gilt:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N'$$

Formel 11: Berechnung der tangentialen Reaktionsspannung am Rohr

$\tau_R$	tangentiale Reaktionsspannung am Rohr an der PE-Manteloberfläche	[kPa]
$\mu$	Reibungskoeffizient	[-]
$\sigma_N'$	Normalspannungen entlang des Rohrumfangs an der PE-Manteloberfläche	[kPa]



Für  $\mu$  gilt:

$$\mu = \tan \delta = \tan\left(\frac{2}{3} \cdot \varphi'\right)$$

Formel 12: Berechnung des Reibungskoeffizienten

$\delta$  Wandreibungswinkel/ Kontaktflächenreibungswinkel [-]

### 3.8.2 Versuchsablauf

Im Triaxialversuch (Abbildung 52) setzt man einen zylindrischen Prüfkörper zunächst unter einen hydrostatischen Hauptspannungszustand mit den allseitig gleichen Hauptspannungen

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

Formel 13: Der hydrostatische Hauptspannungszustand

$\sigma_1$  Hauptspannung in axialer Richtung (z) der zylinderförmigen [kPa]  
Bodenprobe  
 $\sigma_2, \sigma_3$  Hauptspannungen in radialer Richtung (x, y) der [kPa]  
zylinderförmigen Bodenprobe

um damit eine gewünschte bzw. von der Tiefenlage des KMR abhängiges Spannungsniveau in der Bodenprobe zu erzeugen. Wartet man solange ab, bis kontrolliert alle Porenwasserüberdrücke abgeklungen sind

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad \Leftrightarrow \quad \sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$$

Formel 14: Totale und effektive Hauptspannungen.

bezeichnet man diesen Vorgang als (Re-)Konsolidation, da die im Boden herrschenden effektiven Korn-zu-Kornspannungen  $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$  in der Probe erzeugt wurden. Diese Versuchsphase wird mit **C** bezeichnet. Beginnt man sofort mit der Belastung der Probe, ohne dass der Porenwasserdruck dissipieren (sich abbauen) konnte, bezeichnet man den Zustand als unkonsolidiert, woraus sich die Versuchsphasenbezeichnung **U** ableitet.

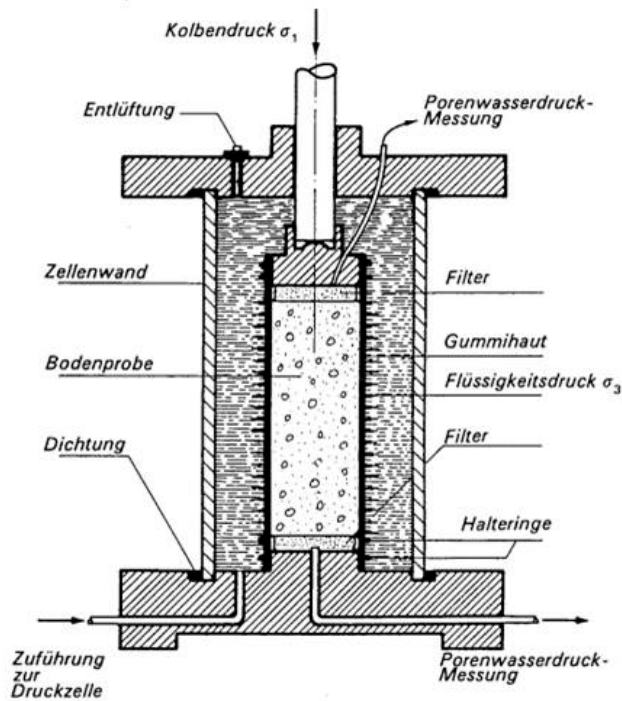


Abbildung 52: Prinzipskizze eines Triaxialgerätes.

Anschließend steigert man  $\sigma_1$  kontinuierlich mit geregelter Belastungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon} = const.$ , wobei jedoch  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  konstant gehalten werden. Dabei steigen die Deviatorspannungen  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  bzw.  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , was gleichbedeutend mit dem Ansteigen der Schubspannungen ist.  $\sigma_1$  wird solange gesteigert, bis die Scherfestigkeit (Index „f“ für failure) erreicht ist, bei der sich eine Scherfläche ausbildet. Die Scherfläche ist durch die Versuchsbedingungen mit  $\vartheta$  zur Horizontalen geneigt, ebenso die Richtung der Schubspannungen  $\tau_f$  (Abbildung 53).

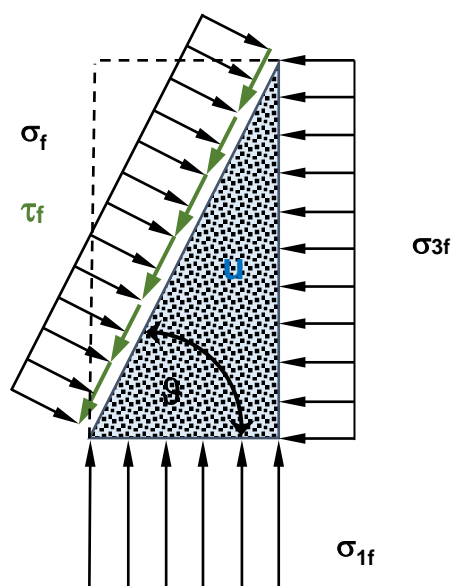


Abbildung 53: Bodenelement im Bruchzustand

Im Triaxialversuche lassen sich die Hauptspannungen regeln und messen, aus denen man  $\tau_f$ ,  $\sigma'$ ,  $c'$ ,  $\varphi'$  sowie  $c_u$  und  $\varphi_u$  rechnerisch oder graphisch bestimmt. Die eindeutige Auswertung erfordert, dass man mindestens 3 Teilproben untersucht, die alle bei unterschiedlichen hydrostatischen Hauptspannungszuständen beginnen.

Formel 8 gilt für Randbedingungen, bei denen die Probe entwässern kann. Es handelt sich um den **D-Versuch**. Im **D-Versuch** prägt man der Probe durch Konsolidierung (Versuchsphase C) einen bestimmten Spannungs- und Verdichtungszustand ein und wartet ab, dass sich Porenwasserüberdrücke abgebaut haben. Man schert die Probe drainiert (**D**rained) ab, und zwar so langsam, dass sich kein Porenwasserüberdruck aufbaut. Bei den ZFSV waren z. B. nur Geschwindigkeiten von  $\leq 0,005$  mm/min möglich, was zu Versuchsdauern bis zu 3 Wochen je Probe führen kann. Die aufgebrauchten Spannungen wirken vollständig auf das Korngerüst ( $\sigma'$ ), die Probe kann sich verdichten oder auflockern. Die Auswertung ergibt die effektiven Scherparameter  $c'$  und  $\varphi'$ . Um Kapillarkohäsion zu vermeiden, führt man den Versuch an gesättigten Proben aus. Kapillarkohäsion entsteht, wenn der Porenraum nur zum Teil mit Wasser gefüllt ist. Dies führt zu Saugspannungen der Porenraumflüssigkeit, die  $\sigma'$  erhöhen und so die Ergebnisse verfälschen.

Formel 9 gilt für Randbedingungen, bei denen man verhindert, dass die Probe entwässert. Es handelt sich um den **UU-Versuch**. Die Probe bleibt unkonsolidiert (**U**nconsolidated) und man schert diese ohne Entwässerungsmöglichkeit (**U**ndrained) mit hoher Geschwindigkeit geregelt ab. Die Spannungen erhöhen sich, während man abschert. Die Zusatzspannungen wirken rein auf die Porenflüssigkeit und erzeugen einen Porenwasserüberdruck, was Proben mit vollständiger Wassersättigung des Porenraumes erfordert. Die bei Versuchsbeginn vorhandenen Kontaktspannungen zwischen den Feststoffbestandteilen verändern sich nicht. Die rein normalspannungsunabhängigen Bindungskräfte zwischen den Feststoffbestandteilen bestimmen die Scherfestigkeit (Formel 8  $\tau_f \approx c' + \sigma' * \tan\varphi'$ ). Die Auswertung ergibt deren Wert  $c_u$  und  $\varphi_u$ .

### 3.8.3 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 13 zusammengestellt. Die angegebenen Probenalter für die ZFSV beziehen sich auf das Probenalter beim Einbau in die Triaxialzelle und Ausbau aus der Triaxialzelle.

Tabelle 13: Versuchsprogramm Scherfestigkeit Triaxialversuch

	D-Versuch	UU-Versuch
Ausgangsboden ST*	X	X
Ausgangsboden GT	X	-
Ausgangsboden TL	X	X
Produkt A – 28 d-38 d	X	-
Produkt A – 7 d	-	X
Produkt A – 13 d	-	X
Produkt A – 25 d	-	X
Produkt A – 48 d	-	X
Produkt C-ST – 29 d-39 d	X	-
Produkt C-ST – 41 d-61 d	X	-
Produkt C-ST – 6 d	-	X
Produkt C-ST – 13 d	-	X
Produkt C-ST – 26 d	-	X
Produkt C-ST – 54 d	-	X
Produkt C-GT – 30 d-40 d	X	-
Produkt C-GT – 7 d	-	X
Produkt C-GT – 14 d	-	X
Produkt C-GT – 28 d	-	X
Produkt C-GT – 55 d	-	X
Produkt C-TL – 27 d-36 d	X	-
Produkt C-TL – 6 d	-	X
Produkt C-TL – 13 d	-	X
Produkt C-TL – 26 d	-	X
Produkt C-TL – 54 d	-	X

### 3.8.4 Versuchsergebnisse

Anlage 7 zeigt als Beispiel die graphische Aufbereitung der Versuchsdaten und die graphische Versuchsauswertung für das Produkt C-ST für den D-Versuch und die UU-Versuche für ein Probenalter von 7d und 28 d.

In Tabelle 14 sind die mit den Versuchen bestimmten Scherparameter zusammengestellt.

Tabelle 14: Scherfestigkeit Triaxialversuch - Scherfestigkeitsparameter

	D-Versuch		UU-Versuch (Türke 1990)
	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kPa]	$c_u$ [kPa]
Ausgangsboden ST*	37,4	12,7	weich: 5 steif: 25 halbfest:60
Ausgangsboden GT	41,2	5,6	weich: 0 steif: 15 halbfest:40
Ausgangsboden TL	20,9	17,3	weich: 0 steif: 15 halbfest:40
Produkt A – 28 d-38 d	38,7	37,0	-
Produkt A – 7 d	-	-	39,0
Produkt A – 13 d	-	-	49,1
Produkt A – 27 d	-	-	66,6
Produkt A – 49 d	-	-	39,1
Produkt C-ST – 29 d-39 d	37,4	55,7	-
Produkt C-ST – 41 d-61 d	35,3	72,9	-
Produkt C-ST – 6 d	-	-	77,4
Produkt C-ST – 13 d	-	-	98,9
Produkt C-ST – 26 d	-	-	99,5
Produkt C-ST – 54 d	-	-	123,5
Produkt C-GT – 30 d-40 d	27,9	76,0	-
Produkt C-GT – 7 d	-	-	114,0
Produkt C-GT – 14 d	-	-	133,8
Produkt C-GT – 28 d	-	-	128,0
Produkt C-GT – 55 d	-	-	140,7
Produkt C-TL – 27 d-36 d	32,1	67,4	-
Produkt C-TL – 6 d	-	-	59,2
Produkt C-TL – 13 d	-	-	75,8
Produkt C-TL – 26 d	-	-	129,8
Produkt C-TL – 54 d	-	-	174,7

Die Ergebnisse der **D-Versuche** (Abbildung 54) ergeben:

- Bei den Ausgangsböden hat der Rotlagenkies GT den höchsten Reibungswinkel  $\varphi'$  und die niedrigste Kohäsion  $c'$ . Es folgt der Waschrückstand ST\* mit geringfügig niedrigerem  $\varphi'$  und höherem  $c'$ . Den niedrigsten Reibungswinkel zeigt der Lösslehm TL; er weist die höchste Kohäsion auf.
- Die ZFSV weisen hohe Werte von  $c'$  auf. Diese sind für das Produkt C höher als für das Produkt A. Bei den Unterprodukten C erhöht sich die Kohäsion gegenüber den Ausgangsböden deutlich. Die stärkste Veränderung findet beim Produkt C-GT statt, die geringste beim Produkt C-TL. Die beiden D-Versuche für das Produkt C-ST zeigen, dass die Kohäsion vom Probenalter abhängt.
- Der Reibungswinkel  $\varphi'$  der Unterprodukte C verändert sich gegenüber den Ausgangsböden unregelmäßig. Er verringert sich für das Produkt C-GT. Beim

Produkt C-ST bleibt er zunächst gleich und verringert sich mit zunehmendem Probenalter geringfügig. Beim Material C-TL nimmt  $\varphi'$  deutlich zu.

- Beim Produkt A mit sehr geringen Korngrößen (Trockenmörtel aus Zement und Kalksteinmehl) findet sich bemerkenswerterweise der höchste Reibungswinkel  $\varphi'$  und die geringste Kohäsion  $c'$  beim Vergleich der ZFSV.

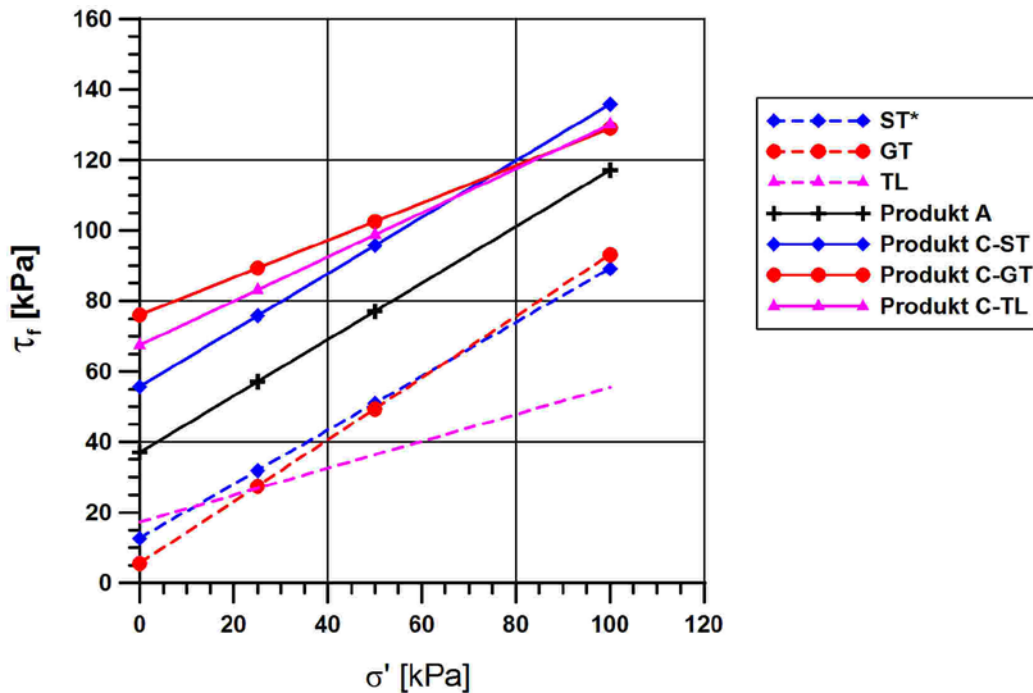


Abbildung 54: Scherfestigkeit Ausgangsböden und Scherfestigkeit ZFSV im Alter > 28 d (D-Versuch)

Die Ergebnisse der **UU-Versuche** (Abbildung 55) ergeben:

- $c_u$  nimmt mit zunehmendem Probenalter zu.
- Bei den Unterprodukten C-GT und C-ST ist die Kohäsion vom Beginn an sehr hoch. Sie nimmt ähnlich oder geringer zu als beim Produkt A und deutlich geringer als beim Produkt C-TL. Die niedrigsten Werte stellen sich beim Produkt A ein. Die höchste Zunahme und den höchsten Endwert zeigt das Produkt C-TL.

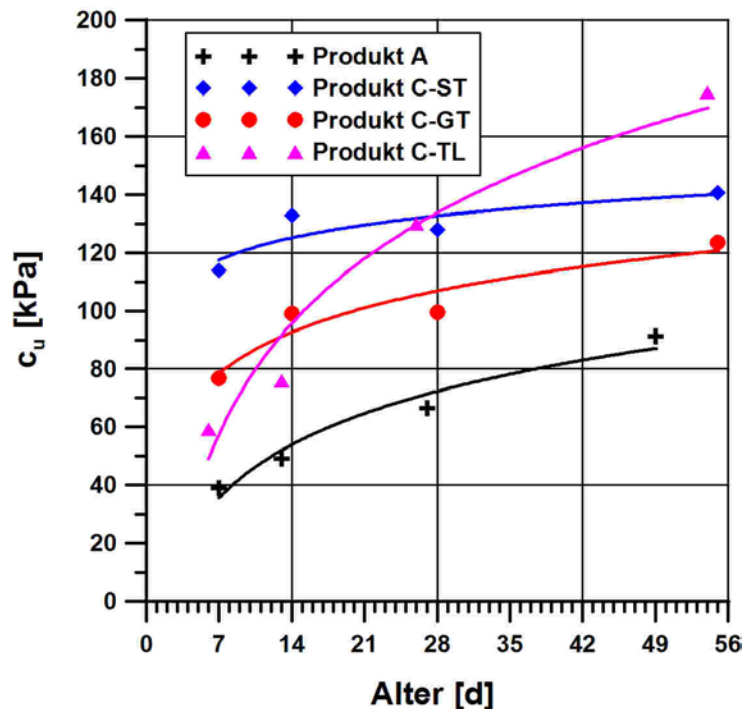


Abbildung 55: ZFSV - Zeitliche Entwicklung von  $c_u$  (UU-Versuch)

### 3.8.5 Folgerungen

Aus den Untersuchungen der Scherfestigkeit folgt:

- Die ZFSV zeigen für die untersuchten Alter größere, zeitabhängige Scherfestigkeiten als die Ausgangsböden. Neben den Trockendichten und den Wassergehalten unterscheiden sich die ZFSV von den Ausgangsböden durch die Zusatzstoffe, die offensichtlich die höheren Scherfestigkeiten verursachen.
- Da beide Produkte Zement als Zusatzstoff enthalten, kommt diesem eine entscheidende Rolle für die höhere Scherfestigkeit zu.
- Auch das Produkt A zeigt für das untersuchte Alter zum Großteil eine höhere Scherfestigkeit als die Ausgangsböden des Produktes C.
- Da ZFSV im frischen Zustand fließfähig sind und nur eine geringe Scherfestigkeit zeigen, gibt es ein kritisches Alter, in dem die Scherfestigkeit der ZFSV des Produktes C die der Ausgangsböden erreicht und dann übersteigt. Dies gilt sinngemäß für das Produkt A, das einen ausgehobenen Boden ersetzt.
- Dass sich die Scherfestigkeit im drainierten Zustand (D-Versuch) beim Produkt C erhöht, liegt daran, dass sich die Kohäsion erhöht. Bei den Unterprodukten C-ST und C-GT bleibt der Reibungswinkel gleich oder nimmt ab. Beim Unterprodukt C-TL steigt der Reibungswinkel stark an, trägt aber deutlich weniger zur höheren Scherfestigkeit bei als die Kohäsion.

Wendet man den ausschließlich reibungsbasierten Ansatz nach dem AGFW-Regelwerk (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10) für die statische Auslegung von KMR unter sonst gleichen Randbedingungen an, ergibt sich rechnerisch bis auf das Produkt C-TL kaum ein Unterschied zu den Ausgangsböden, da sich die Reibungswinkel und die Feuchtdichten kaum ändern. Der aktuelle AGFW-Ansatz kommt ohne kontaktmechanische Untersuchungen zwischen ZFSV und dem PE-Außenmantel aus, da er auf der Untersuchung der Reibungswinkel des Bettungsmaterials beruht; der Scherparameter  $c'$  bleibt unberücksichtigt.

Dem Ansatz liegt weiter zugrunde, dass die Relativverschiebung zwischen dem PE-Außenmantel des KMR und dem Verfüllmaterial für die tangentialen Reaktionsspannungen unbedeutend sind. Es handelt sich um einen starr-plastischen Reibungsansatz. Tritt keine Relativbewegung auf, wirkt keine tangentielle Reaktionsspannung. Tritt eine Relativbewegung, egal welcher Größenordnung auf, wirkt immer die gleiche tangentielle Reaktionsspannung. Es ist experimentell zu prüfen, ob dies bei ZFSV zutrifft.

## 3.9 Hauptuntersuchungen Produkt A und C – $K_0$ -Werte

### 3.9.1 Motivation und Versuch

Wofür der  $K_0$ -Wert erforderlich und wo er im (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10) verankert ist, findet sich im Unterabschnitt 3.8.1. Für Böden gilt mit ausreichender Genauigkeit Formel 1 ( $K_0 \approx 1 - \sin \varphi$ ).

Es ist unbekannt, ob der Zusammenhang nach Formel 1 auch für ZFSV gilt. Falls Formel 1 nicht auf ZFSV anwendbar ist, hat dies direkte Auswirkungen auf die statische Auslegung von KMR, weshalb dieser in Verbindung mit den Folgerungen in Unterabschnitt 3.8.5 zu ermitteln ist.

Den  $K_0$ -Wert ermittelt man in einem nicht standardisierten  $K_0$ -Versuch, der Ähnlichkeit mit dem Triaxialversuch (Abbildung 52) hat, jedoch in der Versuchstechnik, der Steuerung und Regelung sowie der Durchführung deutlich komplexer und störungsempfindlicher ist. Es handelt sich um eine **anisotrope Konsolidierung**: Man steigert  $\sigma_1$  und steuert  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  nach (siehe Formel 14), so dass sich der Durchmesser D der Probe nicht ändert, wozu man D extrem genau messen (+/- 0,000.1 mm) muss, um eine entsprechende Regelung realisieren zu können (dies gelingt im Allg. nur in klimatisierten Räumen mit konstanter Temperatur). Verhindert man die Änderung des Durchmessers der Probe, staucht sich die Probe nur axial. Dies entspricht dem Erdruchdruckzustand. Mit den im Versuch gemessenen Spannungen lassen sich  $\sigma_{h'}$  und  $\sigma_{v'}$  gewinnen und daraus direkt  $K_0$  nach Formel 9 ( $\frac{\sigma_{h'}}{\sigma_{v'}} = K_0$ ) als Quotient ermitteln

### 3.9.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

$K_0$ -Versuche fanden mit den Ausgangsböden des Produktes C und dem Produkt A statt. Da der  $K_0$ -Versuch sehr aufwändig und sehr zeitaufwändig ist (Zeitbedarf Monate), konzentrierten sich die  $K_0$ -Versuche mit dem Produkt C auf das Unterprodukt C-ST. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 15 zusammengestellt. Die angegebenen Probenalter für die ZFSV beziehen sich auf das Probenalter beim Einbau in die  $K_0$ -Triaxialzelle.



Tabelle 15: Versuchsprogramm  $K_0$ -Versuche

	$K_0$ -Versuch
Ausgangsboden ST*	X
Ausgangsboden GT	X
Ausgangsboden TL	X
Produkt A – 5 d	X
Produkt A – 9 d	X
Produkt A – 13 d	X
Produkt A – 17 d	X
Produkt A – 23 d	X
Produkt A – 38 d	X
Produkt A – 45 d	X
Produkt A – 155 d	X
Produkt A – 257 d	X
Produkt C-ST – 1 d	X
Produkt C-ST – 6 d	X
Produkt C-ST – 13 d	X
Produkt C-ST – 17 d	X
Produkt C-ST – 22 d	X
Produkt C-ST – 23 d	X
Produkt C-ST – 34 d	X
Produkt C-ST – 51 d	X
Produkt C-ST – 63 d	X
Produkt C-ST – 78 d	X
Produkt C-ST – 81 d	X
Produkt C-ST – 237 d	X
Produkt C-ST – 341 d	X

Die Ausgangsböden hat man mit einem Wassergehalt an der vorab bestimmten Fließgrenze des Feinkornanteils aufbereitet und unmittelbar nach der Aufbereitung in die Probenformen eingebaut. Die Proben wurden kurz äußerlich schockgefroren, aus den Probenformen entnommen und in die  $K_0$ -Triaxialzelle eingebaut. Anschließend erfolgte eine isotrope Konsolidierung bei etwa 30 kPa, die Bestückung mit den Sensoren zur Erfassung des Durchmessers, die Rekonsolidierung und schließlich die anisotrope Konsolidierung, die dem  $K_0$ -Versuch entspricht.

Die ZFSV hat man unmittelbar nach der Herstellung in die Probenformen abgefüllt und bis zum Bearbeitungsbeginn gelagert (Lagerungsbedingung: gesättigtes System). Nach der Entnahme aus den Probenformen erfolgte der Einbau in die  $K_0$ -Triaxialzelle inklusive Befestigung der Sensoren zur Erfassung des Durchmessers und nach isotroper Konsolidierung bei etwa 25 kPa, die Versuchsdurchführung bei anisotroper Konsolidierung.

### 3.9.3 Versuchsergebnisse

Anlage 8 zeigt als Beispiel die graphische Aufbereitung der Versuchsdaten und die graphische Versuchsauswertung für das Produkt A – 17 d und das Produkt C-ST – 81 d.

Aus der Anlage 8 ist ersichtlich, dass, wie bei der Untersuchung des Last-Setzungs-Verhaltens (Abschnitt 3.7 und Unterabschnitt 3.7.4), ein „**Strukturbruch**“ stattfindet. Die Steigung der

Ausgleichsgeraden, die dem  $K_0$ -Wert entspricht, wird bei einer bestimmten **Grenzspannung** steiler, der  $K_0$ -Wert nimmt zu.

In Tabelle 16 sind die mit den Versuchen bestimmten  $K_0$ -Werte zusammengestellt. Für die Ausgangsböden sind die mit Formel 1 berechneten  $K_0$ -Werte auf Basis der als zeitunabhängig angenommenen Scherparameter aus Tabelle 14 mit eingetragen. Für die ZFSV sind zwei  $K_0$ -Werte  $K_{0,v}$  und  $K_{0,n}$  und die Grenzspannung  $\sigma_{v,grenz'}$  angegeben.

$K_{0,v}$	K0-Wert ZFSV vor Strukturbruch	[-]
$K_{0,n}$	K0-Wert ZFSV nach Strukturbruch	[-]
$\sigma_{v,grenz'}$	effektive vertikale Grenzspannung beim Strukturbruch	[kPa]

Tabelle 16: Versuchsergebnisse  $K_0$ -Werte

	$K_0$ [-]		$K_0$ mit Formel 1 [-] und Tabelle 14
<b>Ausgangsboden ST*</b>	0,42		0,39
<b>Ausgangsboden GT</b>	0,39		0,34
<b>Ausgangsboden TL</b>	0,52		0,64
<b>Produkt A</b>	siehe unten		0,37
<b>Produkt C-ST</b>	siehe unten		0,39 ( $\varphi' = 37,4^\circ$ ) 0,42 ( $\varphi' = 35,3^\circ$ )
	$K_{0,v}$ [-]	$K_{0,n}$ [-]	$\sigma_{v,grenz'}$ [kPa]
<b>Produkt A – 5 d</b>	0,20	0,43	110
<b>Produkt A – 9 d</b>	0,14	0,50	115
<b>Produkt A – 13 d</b>	0,18	-	120
<b>Produkt A – 17 d</b>	0,20	0,41	115
<b>Produkt A – 23 d</b>	0,18	0,48	110
<b>Produkt A – 38 d</b>	0,10	-	-
<b>Produkt A – 45 d</b>	0,09	0,50	110
<b>Produkt A – 155 d</b>	0,11	0,48	110
<b>Produkt A – 257 d</b>	0,08	0,45	-
<b>Produkt C-ST – 1 d</b>	0,17	0,33	-
<b>Produkt C-ST – 6 d</b>	0,09	0,41	-
<b>Produkt C-ST – 13 d</b>	0,08	0,33	-
<b>Produkt C-ST – 17 d</b>	0,13	0,38	-
<b>Produkt C-ST – 22 d</b>	0,14	0,22	140
<b>Produkt C-ST – 23 d</b>	0,11	0,38	-
<b>Produkt C-ST – 34 d</b>	0,12	0,35	-
<b>Produkt C-ST – 51 d</b>	0,11	0,40	140
<b>Produkt C-ST – 63 d</b>	0,07	0,26	-
<b>Produkt C-ST – 78 d</b>	0,11	-	-
<b>Produkt C-ST – 81 d</b>	0,05	0,26	120
<b>Produkt C-ST – 237 d</b>	0,08	0,22	-
<b>Produkt C-ST – 341 d</b>	0,045	0,35	215

Abbildung 56 zeigt die graphische Darstellung der Daten aus Tabelle 16 für die ZFSV. Die mit Formel 1 berechneten  $K_0$ -Werte auf Basis der als zeitunabhängig angenommenen Scherparameter aus Tabelle 14 sind mit eingetragen.

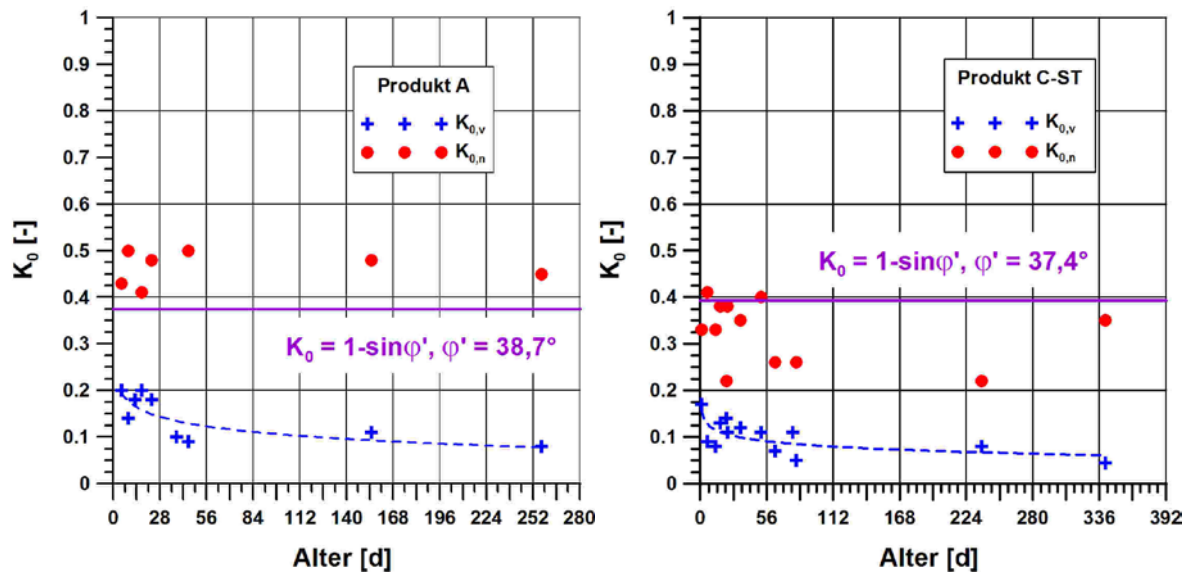


Abbildung 56: Zeitliche Entwicklung von  $K_{0,v}$  und  $K_{0,n}$  für Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts)

Die Versuche ergeben:

- Die im Versuch bestimmten  $K_0$ -Werte der Ausgangsböden und die mit Formel 1 bestimmten Werte zeigen Abweichungen bis zu 20%, was erfahrungsgemäß als geringe Abweichungen einzustufen sind. Es liegen Über- und Unterschreitungen im Verhältnis ( $K_0$  Versuch/ $K_0$  Formel 1) vor.
- Der  $K_0$ -Wert des Ausgangsbodens ST\* (Versuch und Formel 1) und die im Versuch bestimmten  $K_0$ -Werte des daraus hergestellten Produktes C-ST unterscheiden sich. Die  $K_0$ -Werte des Produktes C-ST sind spannungsabhängig größtenteils (deutlich) geringer.
- Die im Versuch bestimmten  $K_0$ -Werte der ZFSV und die mit Formel 1 bestimmten  $K_0$ -Werte der ZFSV weichen voneinander ab.
- Der  $K_0$ -Wert der ZFSV ist spannungsabhängig. Es existiert eine Grenzspannung, bei deren Überschreitung sich der  $K_0$ -Wert drastisch erhöht und tendenziell den  $K_0$ -Wert des Ausgangsmaterials erreicht.
- Vor Überschreitung der Grenzspannung nimmt der  $K_0$ -Wert der ZFSV mit zunehmendem Probenalter leicht ab.
- Die Grenzspannung ist bis zu einem Probenalter von 155 d für das Produkt A und bis zu einem Probenalter von 81 d für das Unterprodukt C-ST nicht zeitabhängig. Für das Produkt C-ST verdoppelt sich die Grenzspannung für ein Probenalter von 341 d nahezu.

### 3.9.4 Folgerungen

Aus den Versuchsergebnissen folgt:

- $K_0$ -Wert nach Formel 1 ( $K_0 \approx 1 - \sin \varphi'$ ) ist für ZFSV unzutreffend. Da dem  $K_0$ -Wert eine wesentliche Rolle bei der statischen Auslegung von KMR nach dem (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10) zukommt, empfiehlt es sich diesem bei Einsatz von ZFSV nicht nach Formel 1 anzusetzen. Erste Orientierungen für ZFSV- $K_0$ -Werte liefern die Ergebnisse der Abbildung 56.

- Der Verlegetiefe kommt eine erhebliche Bedeutung für den  $K_0$ -Wert von ZFSV zu. Bei übliche Verlegetiefen von KMR überschreitet man im Allg.  $\sigma_{v, \text{grenz}}$  nicht. Damit sind die  $K_{0,v}$ -Werte maßgeblich, die erheblich unter den  $K_0$ -Werten nach Formel 1 liegen.
- Das Materialalter ist bei der Bestimmung des  $K_{0,v}$ -Wertes zu berücksichtigen. Soweit dies nicht möglich ist, kann  $K_{0,v} = 0,1$  angesetzt werden.

### 3.10 Hauptuntersuchungen Produkt A und C – Kontaktmechanik zu PEHD

#### 3.10.1 Motivation

Der reibungsbasierte Ansatz nach dem (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10) hängt außerdem vom Kontaktverhalten zwischen ZFSV und PE ab, dass er über den Scherparameter  $\varphi'$  erfasst (Formel 11 und Formel 12). Es liegen weiter eine relativ starke Vereinfachungen im Kontaktverhalten zugrunde, die für Sand davon ausgeht, dass die Schubspannungen starr-plastisch oder elastisch-plastisch aktiviert werden (Abbildung 57):

**Starr-plastisches Kontaktverhalten:** Die Relativverschiebung zwischen dem PE-Außenmantel des KMR und dem Verfüllmaterial sind für die tangentialen Reaktionsspannungen unbedeutend.

**Elastisches-plastisches Kontaktverhalten:** Tatsächlich tritt eine diskrete Relativverschiebung auf, während der die Schubspannung bis auf den Maximalwert ansteigt. Diesen Anstieg linearisiert man und erhält so einen elastisch-plastischen Ansatz.

Beide Ansätze beschreiben das Kontaktverhalten, selbst zwischen Sand und PE, aus bodenmechanischer Sicht unzulänglich bis stark vereinfachend (Weidlich 2008), was sich jedoch aufgrund des unvermeidbar hohen Berechnungsaufwand einer genaueren Modellierung für die Praxis rechtfertigen lässt.

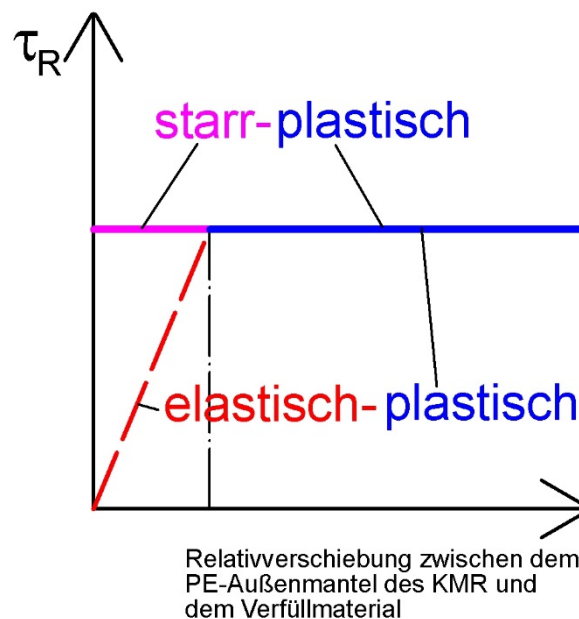


Abbildung 57: Starr-plastischer und elastisch-plastischer Reibungsansatz – Kontaktwiderstandsarbeitslinie für Sand zu PE

Die graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Relativverschiebung des PE-Außenmantels des KMR und des Füllmaterials ergibt die **Kontaktwiderstandsarbeitlinie (KWAL)**.

Diese Teile des Ansatzes kann man nur durch Experimente prüfen und bestätigen oder verneinen. Man muss auch prüfen, ob ein Unterschied zwischen **Laborversuchen im kleinen Maßstab** und **Technikumsversuchen im großen Maßstab** besteht, bzw. ob Maßstabeffekte auftreten.

### 3.10.2 Laborversuch – Versuch und Versuchsdurchführung

Im Labor untersucht man das Kontaktverhalten zwischen Böden und anderen Materialien indem man üblicherweise Geräte zur Durchführung des direkten Scherversuchs abwandelt.

Beim direkten Scherversuch baut man eine Probe in ein Gerät ein, dass aus einem oberen und unteren Rahmen besteht. Die Probe belastet man über einen senkrecht zur Probe angeordneten Stempel mit einer Normalspannung, die der Tiefe der Probe unter der Geländeoberkante in-situ entspricht. Der obere der beiden Rahmen ist horizontal beweglich. Diesen bewegt man und schert die Probe in sich ab, während man Weg und Kraft kontinuierlich erfasst.

Abbildung 58 zeigt das für kontaktmechanische Untersuchungen abgewandelte Gerät. Man ersetzt den unteren Rahmen durch das Kontaktmaterial. Bewegt man nun den oberen Rahmen horizontal, schert man in der Kontaktfläche zwischen dem Boden und dem Kontaktmaterial ab. Als Ergebnis erhält man eine **Weg-Kraft-Linie (WKL)**. Bezieht man die Kraft auf die Kontaktfläche, erhält man die tangentielle Reaktionsspannung  $\tau_R$  und der Weg entspricht der Relativverschiebung zwischen dem Kontaktmaterial und dem Füllmaterial. Dies trifft nur zu, wenn die Kontaktfläche konstant bleibt und die Wegmessung frei von Stauchungen der Versuchsanordnung ist.

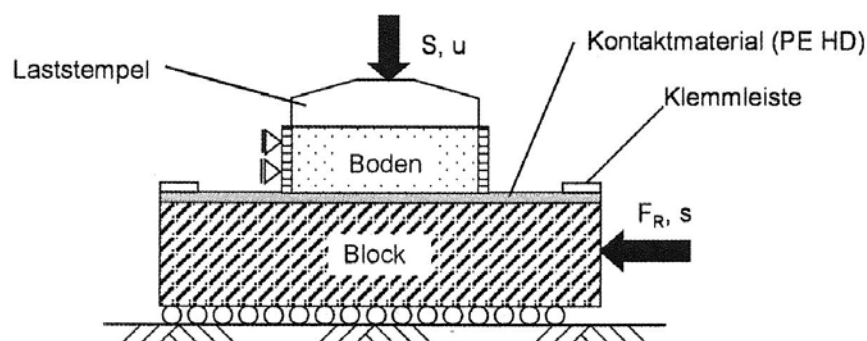


Abbildung 58: Modifizierter Scherversuch für kontaktmechanische Untersuchungen (Weidlich 2008)

An der OTH.R in Anlehnung an dieses Prinzip durchgeführte Abscherversuche **zwischen PE-Platten und ZFSV** während eines früheren Projektes zeigten, dass dieser Versuch für ZFSV ungeeignet ist: Die Ergebnisse streuten stark in sich und zwischen einzelnen Versuchen. Um die Situation in-situ nachzustellen, ist zudem der dauerhafte Kontakt zwischen Füllmaterial und PE von Anfang an bis zum Prüfbeginn sicherzustellen. Dies gelingt nur, wenn die Versuchsgeräte gleichzeitig den Probebehältern entsprechen, was eine hohe Anzahl von modifizierten Scherversuchsgeräten bedingt oder sehr lange Wartezeiten bei wenigen Geräten und sukzessiver Abarbeitung. Beides ist unwirtschaftlich.

Man hat sich deshalb entschieden, die Versuche mit einem eigens entwickelten Versuchsbehälter nach dem Stab-Scherversuchs-Prinzip durchzuführen. Dieses besteht darin, einen Stab, der hier das KMR nachbildet, in eine Probe des Bodenmaterials einzubringen oder das Bodenmaterial, hier ZFSV, um den Stab zu installieren. Das Bodenmaterial fasst man mittels einer umschließenden Behälterkonstruktion. Der Versuch ist nicht genormt, es handelt sich um Einzelfall-Sonderkonstruktionen. Diese sind so ausgeführt, dass sich eine Normalspannung senkrecht zur Stabachse bzw. radial aufbringen lässt, die die Verlegetiefe simuliert. Nachdem man die Normalspannung aufgebracht hat, zieht oder drückt man den Stab bevorzugt geschwindigkeitsgeregelt durch das Bodenmaterial. Als Ergebnis erhält man, wie beim modifizierten Scherversuch, eine Weg-Kraft-Linie. Bezieht man die Kraft auf die Kontaktfläche, erhält man wiederum die tangentielle Reaktionsspannung  $\tau_R$  und der Weg entspricht der Relativverschiebung zwischen dem Kontaktmaterial und dem Bodenmaterial. Dies trifft auch hier nur zu, wenn die Kontaktfläche konstant bleibt und die Wegmessung frei von Stauchungen der Versuchsanordnung ist. Den Versuchsbehälter hat man an der OTH.R entsprechend konstruiert. Die Wegmessung erfolgt direkt am Stab, dessen Stauchungen sich über einen entwickelten Korrekturalgorithmus korrigieren lassen.

Bei der Eigenentwicklung handelt es sich um den **Regensburger Stab-Interface-Scher-Test** oder **Re-SIST**. Ein erheblicher Vorteil besteht darin, dass der Re-SIST ein getrennt lagerbarer Probenbehälter ist, der mit den gewünschten Bedingungen (geschlossen, erdfeucht, gesättigt) gelagert werden kann und den man nur während der Versuchsdurchführung in den Belastungsrahmen einbaut.

Abbildung 59 zeigt eine Prinzipskizze des Re-SIST und der Versuchsdurchführung, eine Fotografie des im Belastungsrahmen eingebauten Re-SIST sowie eine Fotografie des Re-SIST während der Probenlagerung (schematisch).

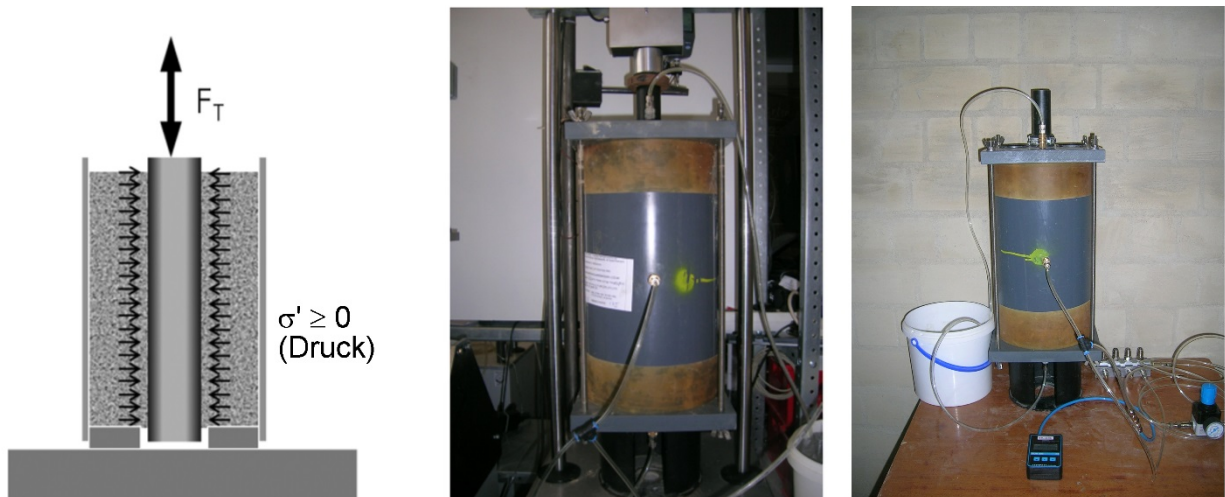


Abbildung 59: Prinzip Re-SIST und Versuchsdurchführung (links), Re-SIST im Belastungsrahmen während der Versuchsdurchführung (Mitte), Re-SIST während der Probenlagerung (schematisch)

Der Re-SIST besteht aus einem zylindrischen Rohrabschnitt und zwei quadratischen Endplatten aus Hart-PVC, die man mit Gewindestangen an den vier Ecken der Platten zusammenhält. Der Innendurchmesser des Rohrabschnitts beträgt 200 mm, die Länge 400

mm. Die Seitenlänge der Platten ist 245 mm. In den Platten befindet sich je ein zentrales Loch  $\varnothing$  45 mm mit Hilfsfräsungen um den Stab, der das KMR nachbildet, durchzuführen und zu fixieren. Die Löcher und Zusatzaussparungen sind geringfügig größer als der Stabdurchmesser, so dass sich die Scherfläche im gewissen Umfang frei ausbilden kann. Zusätzliche Klammern und Dichtungen fixieren den Stab axial zentrisch. An der Innenseite der Platten minimieren glatte Entwässerungsvliese die Platten-Endreibung. In den Platten ist je ein Entwässerungsventil eingebaut, an die angeschlossenen Schläuche sind, die z. B. in einen mit Wasser gefüllten Behälter eintauchen (Abbildung 59, rechts). Die Verlegetiefe stellt man durch externe, stufenlos steuerbare Druckluftbeaufschlagung nach, die über einen am Rohrabschnitt angebrachten Druckluftanschluss erfolgt (Abbildung 59, rechts). Die Druckluft drückt auf eine zwischen der Innenwand des Rohrabschnitts und dem Bodenmaterial angeordnete, maßgearbeitete Latexmembran. Diese klemmt man zwischen den Enden des Rohrabschnitts und den Endplatten ein, bevor man den Behälter verschraubt. Zwischen der Latexmembran und der Innenwand des Rohrabschnitts ist ein Vlies eingelegt, um Gewölbebildung zu verhindern.

Als Stab verwendet man beim Re-SIST qualitätsgesicherte PE-Rohre mit einem Außendurchmesser 40 mm und einem Nichtmetall-Kern. Dies dient dazu, eine möglichst große axiale Steifigkeit des Stabes zu erzielen und dessen Stauchungen zu minimieren. KMR mit einem Außendurchmesser 40 mm standen zum Versuchszeitpunkt nicht zur Verfügung. Dies gilt auch für PE-Rohre mit einem steiferen Metallkern.

Den Behälter baut man zusammen und fixiert das PE-Rohr axial zentrisch mit ungleichen Rohrüberständen. Den Ringraum zwischen PE-Rohr und der Innenwand des Rohrabschnitts mit Vlies und Latexmembran füllt man mit ZFSV. Dies geschieht unmittelbar nach der ZFSV-Herstellung über zwei Einfüllöffnungen in der oberen Endplatte, die man anschließend verschließt. Den Re-SIST lagert man bei möglichst konstanter Temperatur und Luftfeuchte bis zum Prüftag. Man beaufschlagt mit Druckluft etwa 24 h nach dem man befüllt hat, da dies auch in-situ eine realistische Wartezeit vor der Überschüttung ist. Zu diesem Zeitpunkt schließt man auch die Entwässerungsschläuche an. Am Prüftag baut man den mit Druckluft beaufschlagten Re-SIST mit einem geeigneten Abstandshalter an der Unterseite in den Belastungsrahmen ein. Klammern und Dichtungen, die das Rohr fixieren, werden entfernt. An der Oberseite des PE-Rohres baut man einen Klemmring mit seitlichem Messblech an, auf diesen die digitale Messuhr, die den Weg erfasst, aufgesetzt wird. Die Kraft, die notwendig ist, um das PE-Rohr durch den ZFSV zu schieben, erfasst ein Kraftmessbügel, der zwischen dem oberen Joch des Belastungsrahmens und dem oberen Ende des PE-Rohres angeordnet ist. Da es wichtig ist, das Nachbruchverhalten zu erfassen (Abbildung 57), führt man die Versuche geschwindigkeitsgeregelt bzw. als **Constant Rate of Penetration-Versuche (CRPV)** in Anlehnung an (Krieg und Goldscheider 1998) aus. Um die Probenerhärtung während des Testes und die mögliche Entwicklung von Porenwasserüberdrücken auszubalancieren, liegt die Versuchsgeschwindigkeit bei 0,05 mm/ min. Bei einem Weg von etwa 62 mm beträgt die Versuchsdauer etwa 21 h für den erstmaligen Durchschiebevorgang, der mit Zyklus 1 Richtung A (Z1 RiA) bezeichnet ist. Für weitere Durchschiebevorgänge lagert man den Behälter für die gewünschte Wartezeit zwischen diesen außerhalb des Belastungsrahmens, und wiederholt den Versuch wie oben beschrieben. Zuvor ist der Behälter um 180° zu drehen, da bei jedem Versuch der ungleiche Rohrüberstand die Seite wechselt. Die weiteren Durchschiebevorgänge erhalten die Bezeichnungen Z1 RiB, Z2 RiA und so weiter.

### 3.10.3 Versuchsprogramm Laborversuche

Das CRPV-Versuchsprogramm umfasst **Zeit-Reihen ZR** und **Radialdruck-Reihen RR**. Bei **ZR** untersucht man bei gleichem Radialdruck Proben mit zunehmendem Alter. Jedes Prüfmuster erfordert eine neue Probe. Bei **RR** prüft man mit unterschiedlichem Radialdruck beaufschlagte Proben gleichen Alters. In Tabelle 17 und Tabelle 18 ist das Versuchsprogramm zusammengestellt.

Tabelle 17: CRPV – Versuchsprogramm Zeit-Reihen ZR

			Probenalter [d]										
Produkt		Radialdruck	7	14	28	56	112						
[-]		[bar]	Anzahl [-]										
ZR 1	A C-ST	0,50	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ZR 2	A C-ST	0,25	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2
ZR 3	C-ST	0,32	2	2	2	2	2	2					

			Probenalter [d]							
Produkt		Radialdruck	7	14	28	56	60	112	226	
[-]		[bar]	Anzahl [-]							
ZR 1	C-GT	0,50	2	1	1	1	1	2	1	

			Probenalter [d]									
Produkt		Radialdruck	7	14	28	29	56	59	112	225		
[-]		[bar]	Anzahl [-]									
ZR 1	C-TL	0,50	2	1	1	1	1	1	2	1		

Die ZFSV für die ZR 1 hat man an der OTH.R gemäß Einweisung der Lieferanten hergestellt. Für Technikumsversuche an der OTH.R (Abschnitt 3.10.7) wurden die Produkte A und C-ST in größeren Mengen hergestellt, aus denen die Proben der ZR 2 stammen. In Frankfurt am Main hat das bauausführende Unternehmen der Messstrecke (Abschnitt 4.2.1) das Produkt C-ST vor Ort unter Begleitung des Lieferanten hergestellt. Das Material für die ZR 3 stammt aus den dortigen Chargen.

Tabelle 18: CRPV – Versuchsprogramm Radialdruck-Reihen RR

			Radialdruck [bar]								
Produkt		Probenalter	0,125	0,25	0,50	1,00					
[-]		[d]	Anzahl [-]								
RR 1	A C-ST	28	2	2	2	2	2	2	2	2	

Die ZFSV für die RR 1 hat man an der OTH.R gemäß Einweisung der Lieferanten hergestellt. Mit allen Proben fanden Z1 RiA-Prüfungen und Z1 RiB-Prüfungen statt.

### 3.10.4 Versuchsergebnisse Laborversuche

#### 3.10.4.1 Allgemeines

Alle Probekörper hat man nach den Versuchen aus dem RE-SIST ausgebaut und zerlegt. Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen dies beispielhaft für die Produkte A und C-ST.





Abbildung 60: Produkt A – aus dem Re-SIST nach dem Versuch ausgebauter und zerlegter Probekörper



Abbildung 61: Produkt C-ST – aus dem Re-SIST nach dem Versuch ausgebauter und zerlegter Probekörper

Bei allen Proben hat sich die Scherfläche im Kontaktbereich des PE-Rohres und ZFSV ausgebildet. Mit dem Auge ließen sich keine Strukturveränderungen am jeweiligen Produkt erkennen.

#### 3.10.4.2 Kraft/Weg-Linien, Alter/Kraft- und Radialdruck/Kraft-Diagramme

Der Kraftmessbügel erfasst die Gesamtantwort des kontaktmechanischen Systems am oberen Ende des PE-Rohres, was zu Weg-Kraft-Linien führt. Falls sich das PE-Rohr nicht staucht, lassen sich die tangentialen Reaktionsspannungen  $\tau_R$  mit der eingebundenen Staboberfläche bestimmen, da die WKL und die KWAL (zum Beispiel Abbildung 57) bis auf die Umrechnung zwischen Kraft und Spannung identisch sind. Das PE-Rohr hat aber eine endliche Steifigkeit

und staucht sich, weswegen man diese Stauchung bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigen muss. Dies geschieht mit einem Korrekturalgorithmus, der Dissertation von Wagner, die 2017 erscheint nachgelesen werden kann und im Rahmen des Projektes entwickelt wurde. Es genügt dennoch, die Weg-Kraft-Linien darzustellen. Verändert man eine Versuchsrandbedingung, die sich auf die Kontaktschubspannungen auswirkt, zeigt sich dies in den Weg-Kraft-Linien, da die gemessene Kraft den aufintegrierten Kontaktschubspannungen entspricht. Korrekturen können vermieden werden, wenn – wie bei den nachfolgend dokumentierten Versuchen - ausreichend axialsteife Rohre z. B. mit Metallkernen verwendet werden,

In den nachfolgenden Abbildungen ist der Weg  $s$  auf den Außendurchmesser  $D$  des PE-Rohres normiert.  $D$  war bei allen Versuchen gleich.

S	gemessener Weg	[mm]
D	Außendurchmesser des PE-Rohres	[mm]
s/D	normierter Weg	[-]
F	gemessene Kraft	[kN]
$F_{Peak}$	maximale gemessene Kraft	[kN]
$F_{s/D}$	bei einem bestimmten Weg s/D gemessene Kraft	[kN]

Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die WKL der Zeitreihen ZR 1 und ZR2 für die Produkte A und C-ST. Abbildung 64 zeigt die WKL der Zeitreihe ZR 1 für die Produkte C-GT und C-TL. Abbildung 65 zeigt die WKL der Radialdruckreihe RR 1. Der Zusatz Z1 RiA in der Probenbezeichnung bedeutet, dass es sich um den ersten Durchschiebevorgang handelt.

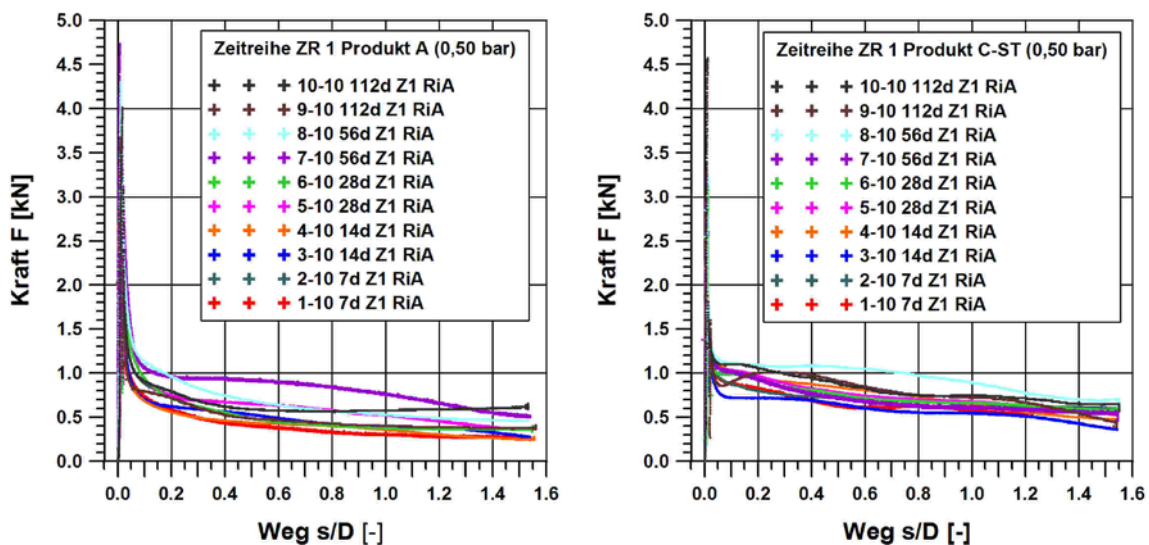


Abbildung 62: Z1 RiA: WKL ZR 1 für Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts) – alle Proben

Die Umrechnung der in den Abbildungen dokumentierten Kräfte  $F$  in eine mittlere Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_R$  erfolgt näherungsweise durch Berücksichtigung der Rohroberfläche  $A_\emptyset$  gemäß

$$\tau_R = \frac{F}{A_\emptyset} \approx 20 \cdot F \left[ \frac{kN}{m^2} \right]$$

Formel 15: Mittlere Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_R$ .

Für genauere Ermittlung der Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_R$  siehe Wagner (2017).

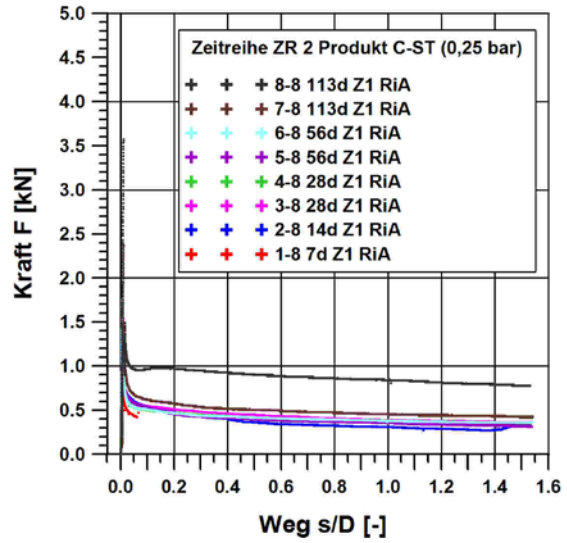
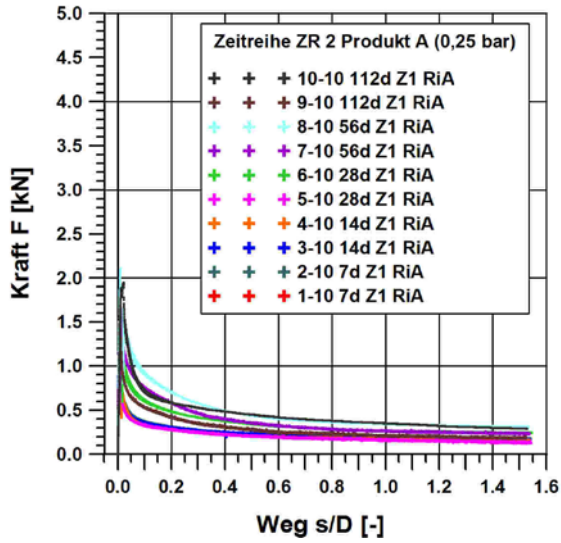


Abbildung 63: Z1 RiA: WKL ZR 2 für Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts) – alle Proben

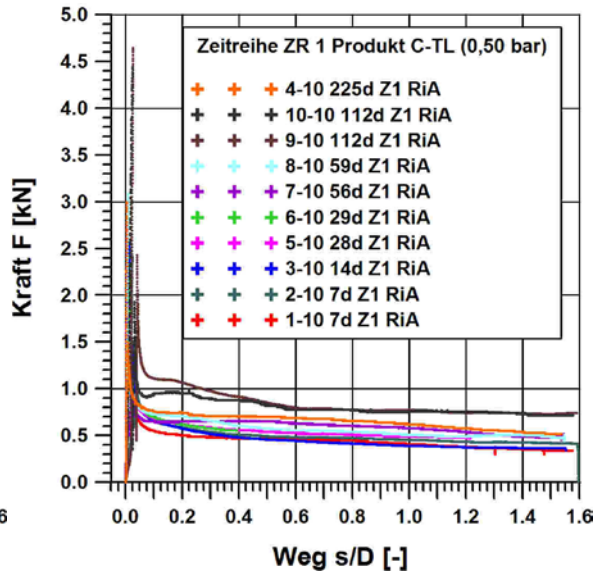
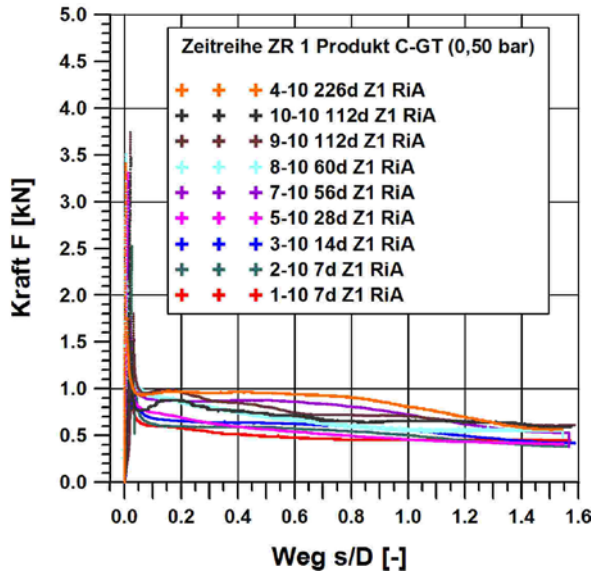


Abbildung 64: Z1 RiA: WKL ZR 1 für Produkt C-GT (links) und Produkt C-TL (rechts) – alle Proben

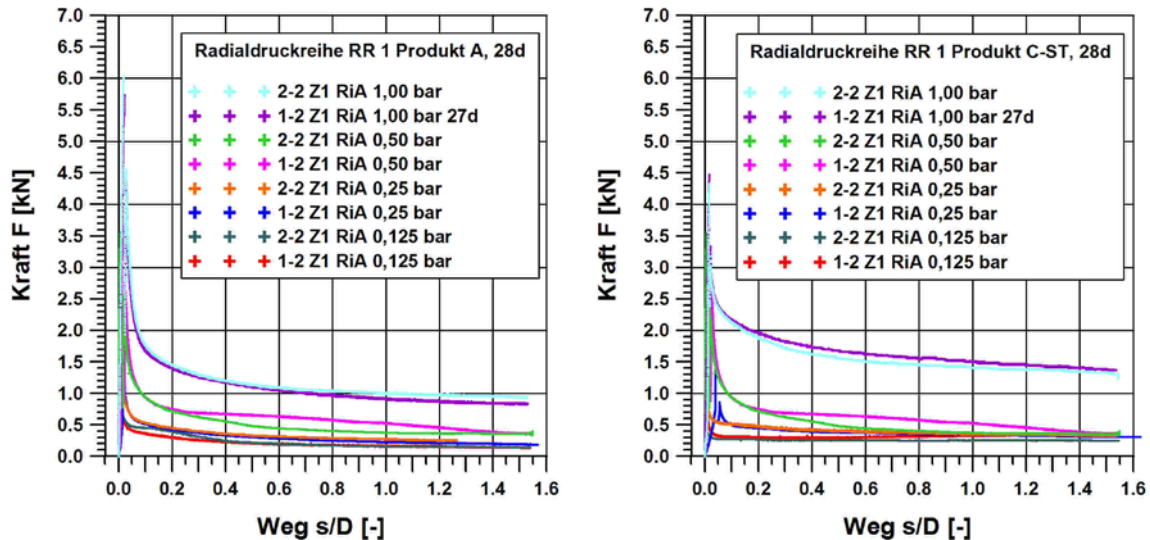


Abbildung 65: Z1 RiA: WKL RR 1 für Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts) – alle Proben

Die WKL zeigen unabhängig vom Probenalter und Radialdruck für alle Proben einen ähnlichen Verlauf. Am Anfang tritt ein sehr steiler Kraftanstieg bei sehr geringem Weg auf. Es schließt sich ein schlagartiger Kraftabfall an, der sich dann kontinuierlich fortsetzt und nach großem Weg ein residuales Niveau erreicht. Bei dem zu Beginn großen Kraftabfall handelt es sich um eine bedeutsame Kontaktentfestigung, die mit zunehmendem Weg rasch abnimmt und schließlich verschwindet. Dass die Probe 8-8 113 d Z1 RiA der ZR 2 für das Produkt C-ST abweicht, liegt daran, dass diese aus einer anderen Materialcharge mit einem deutlich anderem  $w/f$ -Wert stammt. Zudem haben auch Mischvorgänge mit unterschiedlicher Mischtechnik und Mischintensität einen deutlichen Einfluss auf das Materialverhalten.

In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind die Werte von  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  über dem Probenalter für die Zeitreihen ZR 1, ZR 2 und ZR 3 getrennt nach Produkt A und Produkt C-ST aufgetragen. In Abbildung 68 sind die Werte von  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  über dem Probenalter für die Zeitreihe ZR 1 der Produkte C-GT und C-TL aufgetragen. Es handelt sich um Alter-Kraft-Diagramme. In Abbildung 69 sind für die Radialdruckreihe RR 1 die Werte von  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  über dem Radialdruck aufgetragen. Es handelt sich um Radialdruck-Kraft-Diagramme. Der Zusatz Z1 RiA in der Probenbezeichnung bedeutet, dass es sich um den ersten Durchschiebevorgang handelt.

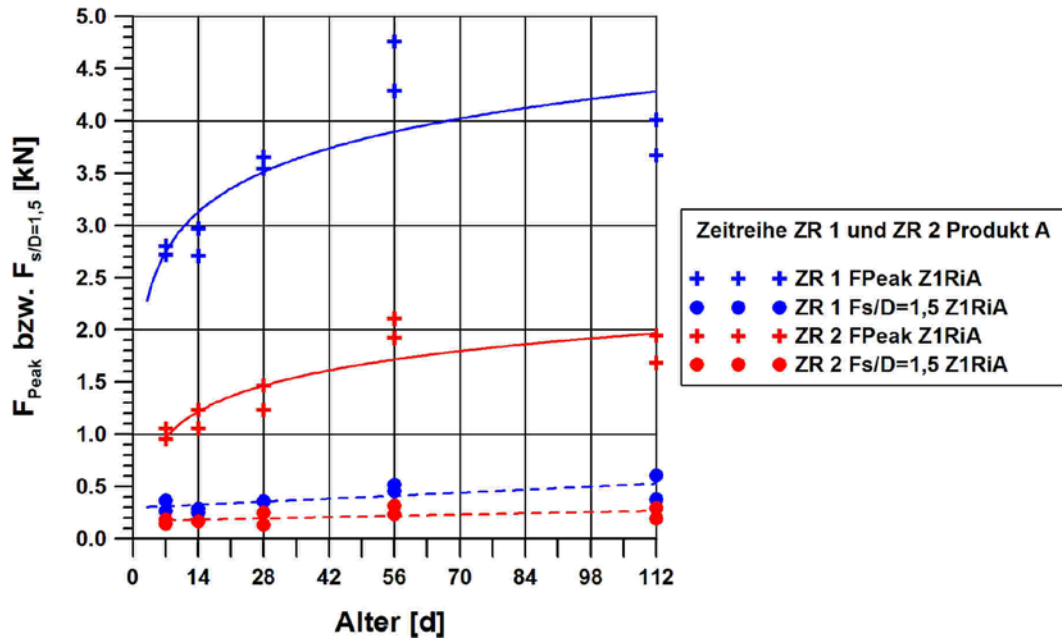


Abbildung 66: Z1 RiA: ZR 1 und ZR 2 Produkt A -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

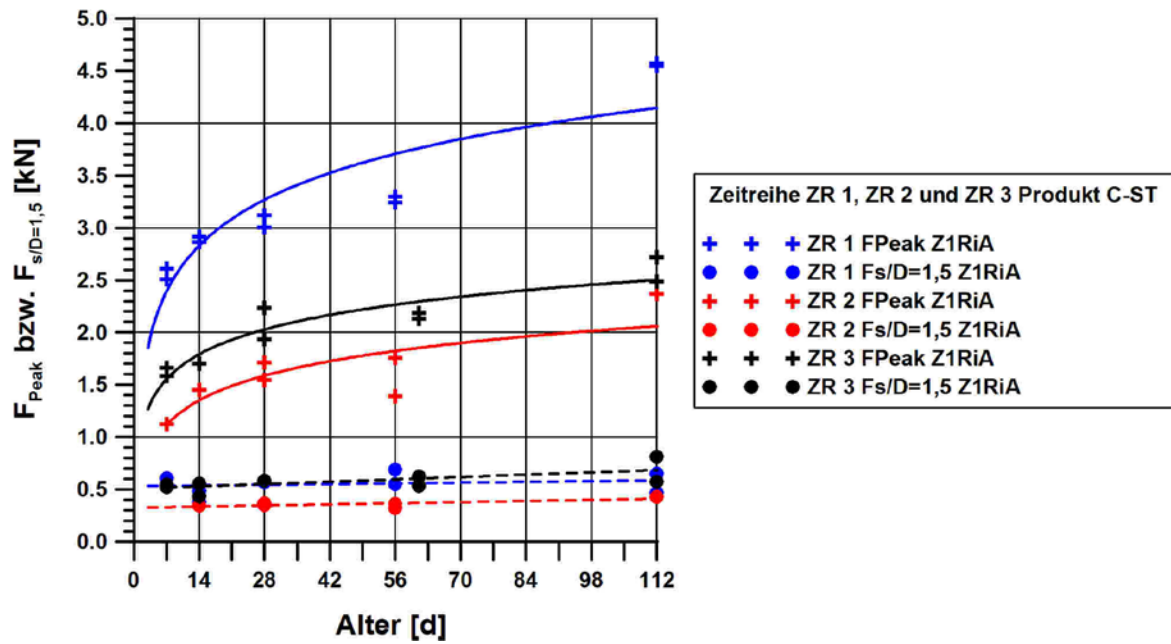


Abbildung 67: Z1 RiA: ZR 1, ZR 2 und ZR 3 Produkt C-ST -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

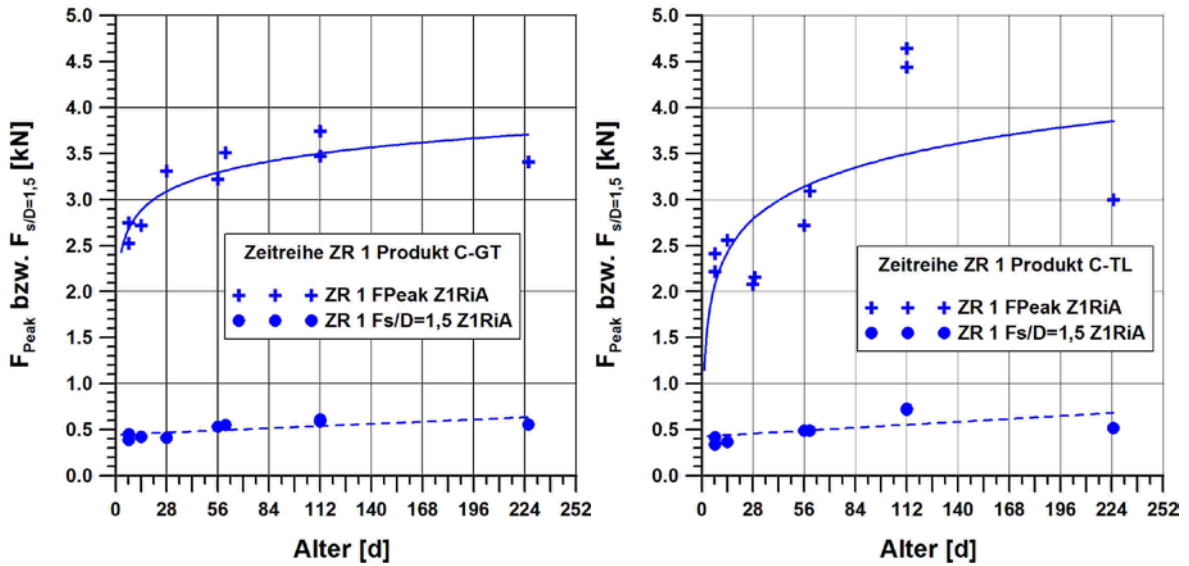


Abbildung 68: Z1 RiA: ZR 1 Produkt C-GT (links) und Produkt C-TL (rechts) -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

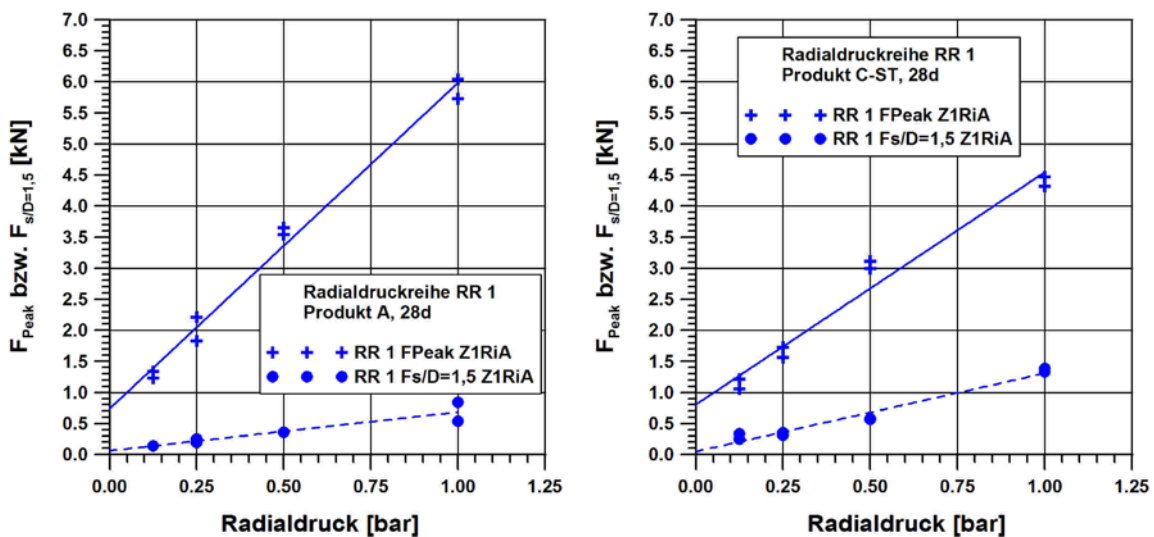


Abbildung 69: Z1 RiA: RR 1 Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts) -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

$F_{Peak}$  hängt vom Probenalter und Radialdruck ab. Die Zeitabhängigkeit lässt sich mit logarithmischen Ausgleichskurven erfassen. Dies bedeutet, dass die  $F_{Peak}$  mit zunehmendem Probenalter immer langsamer ansteigt. Die Radialdruckabhängigkeit folgt einer linearen Gesetzmäßigkeit, wie dies die mit dargestellten Ausgleichsgeraden zeigen.  $F_{s/D=1,5}$  hängt nur geringfügig vom Probenalter, aber deutlich vom Radialdruck ab. Die Radialdruckabhängigkeit folgt einer linearen Gesetzmäßigkeit, wie die mit dargestellten Ausgleichsgeraden zeigen. Dies gilt nach den Versuchsergebnissen im Grundsatz auch für andere Werte  $F_{s/D} > F_{Peak}$ . Die extrapolierte Ausgleichsgerade für  $F_{Peak}$  der Radialdruckreihe R1 ergibt einen Ordinatenabschnitt. Auch ohne Radialdruckbeaufschlagung tritt ein nennenswerter Widerstand auf. Die extrapolierte Ausgleichsgerade für  $F_{s/D=1,5}$  der Radialdruckreihe R1 verläuft näherungsweise durch den Ursprung. Ohne Radialdruckbeaufschlagung tritt ein Widerstand auf, der vernachlässigbar ist.

Abbildung 70 zeigt die WKL der Radialdruckreihe RR 1 für den zweiten Durchschiebevorgang Z1 RiB nach etwa 24 h Wartezeit ab Ende des ersten Durchschiebevorgangs. In Abbildung 71 sind in Radialdruck-Kraft-Diagrammen die zugehörigen Werte von  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  über dem Radialdruck für die Radialdruckreihe RR 1 aufgetragen.

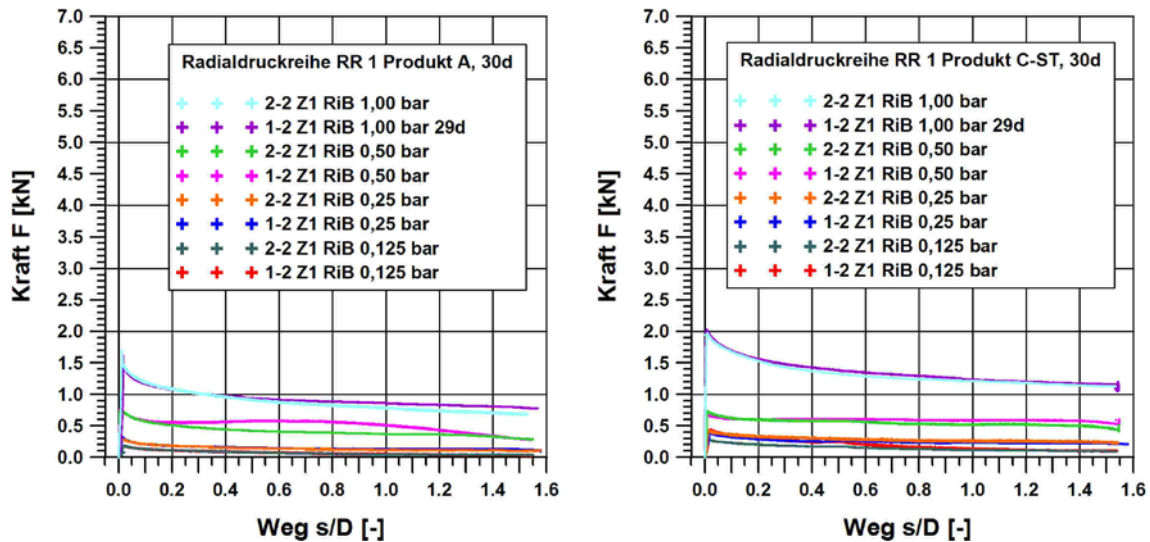


Abbildung 70: Z1 RiB: WKL RR 1 für Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts) – alle Proben

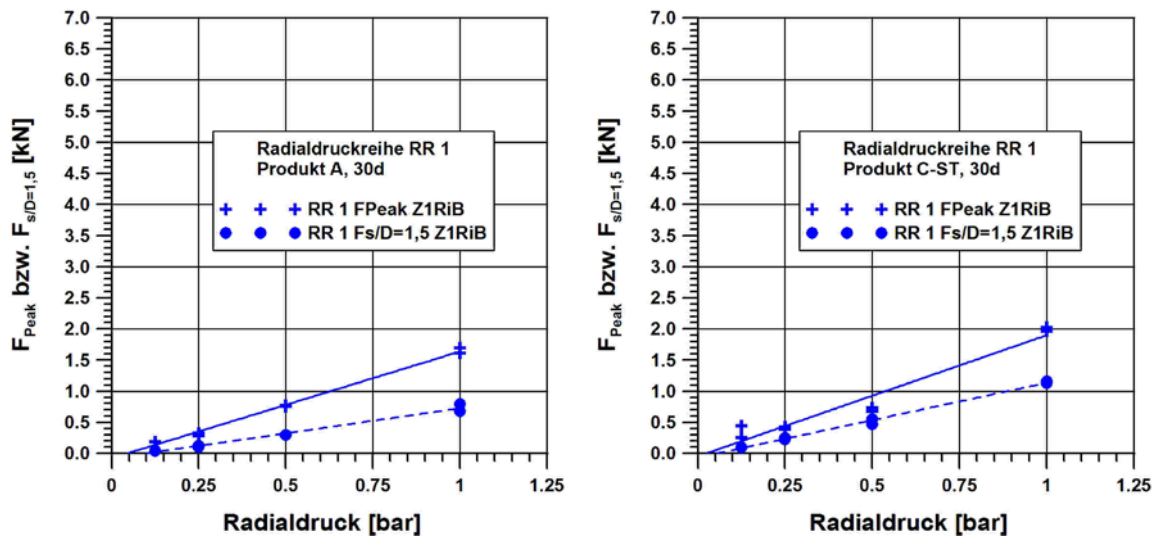


Abbildung 71: Z1 RiB: RR 1 Produkt A (links) und Produkt C-ST (rechts) -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  – alle Proben

Die WKL zeigen unabhängig vom Radialdruck für alle Proben einen ähnlichen Verlauf. Es tritt ein sehr steiler Kraftanstieg bei sehr geringem Weg auf. Es folgt ein kontinuierlicher Kraftabfall, der nach großem Weg ein residuales Niveau erreicht. Ein schlagartiger Kraftabfall wie bei den Z1 RiA-Prüfungen tritt nicht auf.  $F_{Peak}$  ist deutlich geringer als bei den Z1 RiA-Prüfungen. Ein deutlicher Unterschied zwischen  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  beziehungsweise  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D} > F_{Peak}$  tritt nur bei hohen Radialdrücken auf.  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  hängen linear vom Radialdruck ab, wie dies die

Ausgleichsgeraden zeigen. Die extrapolierten Ausgleichsgeraden für  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  verlaufen näherungsweise durch den Ursprung.

### 3.10.5 Folgerungen aus den Laborversuchen

Aus den kontaktmechanischen Untersuchungen folgt:

- Das kontaktmechanische Verhalten von ZFSV zu PE ist systematisch.
- Das kontaktmechanische Verhalten von ZFSV zu PE unterscheidet sich zwischen Erst- und Zweitbelastung erheblich.
- Dem Zeitpunkt der Erstbelastung und damit der Inbetriebnahme nach Verfüllung kommt eine entscheidende Rolle zu.
- Dem Radialdruck und damit der Verlegetiefe kommt eine entscheidende Rolle zu.
- Während der Erstbelastung treten unterschiedliche Kontaktmechanismen auf;  $F_{Peak}$  grenzt die Kontaktmechanismen ab.

### 3.10.6 Kontaktmechanik – Wirkmechanismen und KWAL von ZFSV

$F_{Peak}$  grenzt die während der **Erstbelastung** auftretenden Kontaktmechanismen ab. Der in Unterabschnitt 3.10.4.2 beschriebene Ordinatenabschnitt (Abbildung 69) für  $F_{Peak}$  bei einem Radialdruck von 0,00 bar entspricht Adhäsion. Das Fehlen eines Ordinatenabschnittes bei einem Radialdruck von 0,00 bar nach Überschreitung von  $F_{Peak}$  ist typisch für Reibung und bedeutet, dass die Adhäsion verschwindet.

Die weitere Auswertung der Testergebnisse unter Berücksichtigung der Stauchung des PE-Rohres und damit dem Übergang von den WKL zur KWAL wurde **für die Erstbelastung/ Ersterwärmung des KMR** Im Hinblick auf die Anwendung in der Praxis eine stark vereinfachte trilineare KWAL (Abbildung 72) abgeleitet. In Abbildung 73 ist der qualitative Vergleich der KWAL von Sand und ZFSV dargestellt. Die plastischen Abschnitte können, müssen aber nicht deckungsgleich sein, weswegen die Abbildung beide Fälle darstellt. Die Annahme ist, dass  $\tau_{R,pl,ZFSV} \geq \tau_{R,pl,Sand}$  ist. Selbst wenn  $\tau_{R,pl,ZFSV} < \tau_{R,pl,Sand}$  ist, zeigt die KWAL von ZFSV ein erhebliches Mehrarbeitspotential. Daraus ergeben sich unter Betrachtung der Abbildungen 68 und 69 folgende Punkte:

- Für die Erstbelastung/ Ersterwärmung des KMR kann die KWAL von ZFSV/PE durch eine trilineare KWAL, die elastische, entfestigende und plastische Abschnitte umfasst, vereinfacht werden (Abbildung 72) und sich erheblich von der bilinearen KWAL von Sand/PE unterscheidet (Abbildung 57). Siehe auch Abbildung 73.
- Der elastische Pre-Peak-Abschnitt ist adhäsionsbestimmt.
- Der entfestigende und plastische Post-Peak-Abschnitt sind reibungsbestimmt, wobei bei der Entfestigung ein Einregelvorgang stattfindet.
- Die maximale Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_{R,max}$  beträgt ein Mehrfaches der residualen plastischen Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_{R,pl}$  (siehe Abbildung 69).
- Der maximale Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_{R,max}$  ist zeitabhängig und radialdruckabhängig. (siehe Abbildung 69).
- Die residualen plastischen Kontaktwiderstandsschubspannungen  $\tau_{R,pl}$  sind gegenüber  $\tau_{R,max}$  etwas weniger zeitabhängig und radialdruckabhängig (siehe Abbildung 69).
- Die Kontaktwiderstandsschubspannungen sind in den elastischen und entfestigenden Abschnitten der KWAL wegabhängig.  $w_{R,max}$  und  $w_{R,pl}$  markieren die Grenzwege.



- Die Kontaktwiderstandsschubspannungen sind im plastischen Abschnitt der KWAL vom Weg unabhängig.
- Der Weg  $w_{R,max}$ , bei dem die maximale Kontaktwiderstandsschubspannung  $\tau_{R,max}$  auftritt, ist sehr gering ( $\leq 0,50$  mm).
- Tendenziell gelten diese Feststellungen auch für die KWAL beim Zurückziehen des Versuchsrohrs in B-Richtung (siehe Abbildung 70 und Abbildung 71), wobei sich die Adhäsionsspitzen mit nur noch deutlich geringeren  $\tau_{R,max}$  - Werten einstellen.

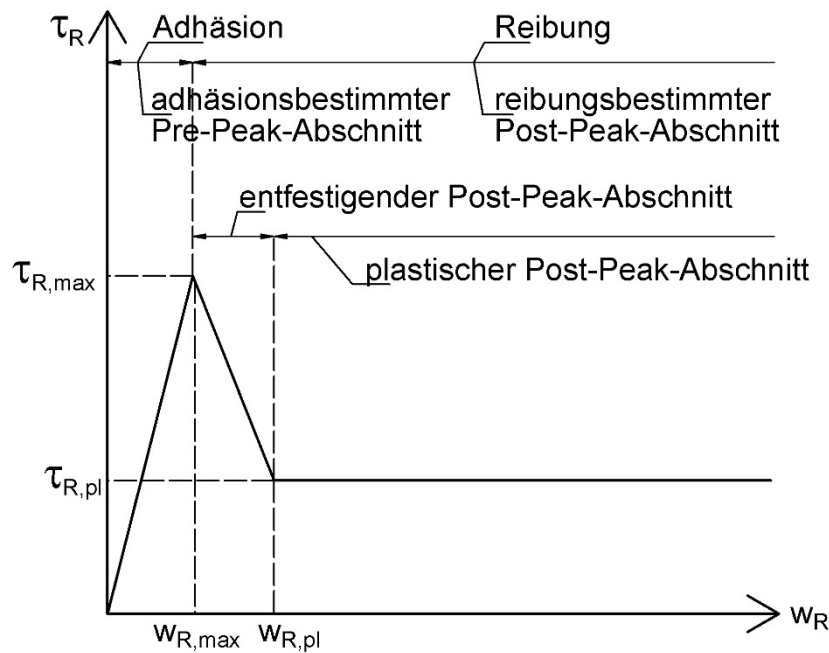


Abbildung 72: Idealisierte trilineare KWAL für ZFSV – Erstbelastung

$\tau_{R,max}$	maximale Kontaktwiderstandsschubspannung im elastischen Abschnitt der KWAL	[kPa]
$\tau_{R,pl}$	plastische Kontaktwiderstandsschubspannung im plastischen Abschnitt der KWAL	[kPa]
$w_{R,max}$	Weg in der KWAL, bei dem $\tau_{R,max}$ erreicht ist	[mm]
$w_{R,pl}$	Weg in der KWAL, bei dem $\tau_{R,pl}$ erreicht ist	[mm]

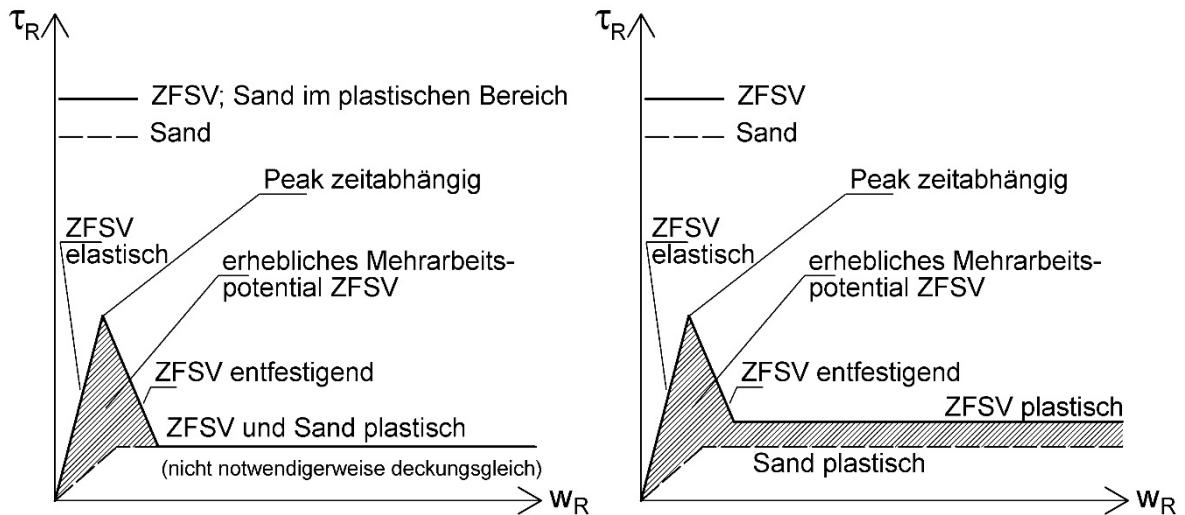


Abbildung 73: Graphischer Vergleich der linear idealisierten KWAL von ZFSV und Sand - Erstbelastung

### 3.10.7 Technikumsversuch - Versuch und Versuchsdurchführung

Mit Technikumsversuchen im großen Maßstab verifiziert man die Ergebnisse der Laborversuche im kleinen Maßstab und überprüft die Versuche auf Maßstabseffekte. Technikumsversuche im großen Maßstab sind als Erddruckprüfung im Sandkasten gängig bei Fernwärmerohren (DIN EN 489:2009-07).

Die Durchführung der Technikumsversuche an der OTH.R erfolgte mit in einem Versuchskasten mit ZFSV verfüllten KMR. Bei dem ausgeführten Versuch drückt oder zieht man die KMR im ungeheizten oder aufgeheizten Zustand mit einer hydraulischen Presse durch die ZFSV-Verfüllung und zeichnet die erforderliche Kraft und den Weg auf. Als Ergebnis erhält man Weg-Kraft-Linien. Die Normalspannung senkrecht zu den Rohrachsen entsteht aus der ZFSV-Verfüllung. Sie lässt sich durch eine weitere Überdeckung dieser mit Sand oder durch das Auflegen großer Gewichte erhöhen. Es handelt sich um einen Stab-Scherversuch wie mit dem Re-SIST, bei dem der Schalungskasten der Versuchsbehälter ist und bei dem die KMR dem Stab entsprechen. Die horizontale Versuchsorientierung und Verschieberichtung ist in diesem Maßstab sehr wirklichkeitsnah.

Die OTH.R, Labor für Geotechnik führt diesen Technikumsversuch in einem modernen Schalungskasten (Abbildung 74) durch.

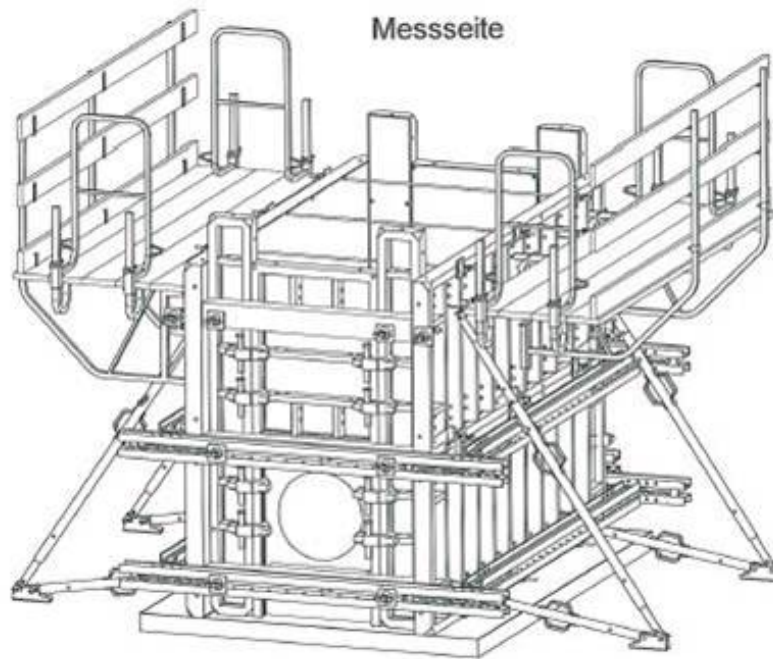


Abbildung 74: Schalungskasten Technikumsversuch – Prinzip (Quelle: Peri-Ausführungszeichnung 08/2011)

Man baut den Schalkasten mit Bodenplatte, Seitenwänden und Stirnwänden in den erforderlichen Abmessungen, hier  $L \times B \times H = 6,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$  auf. Die erforderliche Länge des Versuchskastens richtet sich nach der dem größten Außendurchmesser  $D_A$  der untersuchten KMR, der in den Versuchsserien bei 560 mm lag: Die Einbettungslänge der untersuchten KMR muss mindestens  $10 \cdot D_A$  betragen, um verlässliche Parameter ohne allzu großen Einfluss der Endflächen des Versuchskastens aus den Versuchsergebnissen ableiten zu können.

In die Stirnwände des Versuchskastens setzt man Schalungsplatten mit Ausschnitten für die KMR ein. Den Schalkasten steift man durch ein System aus massiven Riegeln und Gewindestäben anhand Einzelfallüberlegungen und Einzelfalllösungen so aus, dass die Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse durch die Krafteinleitung und Kraftabtragung so weit wie möglich unbeeinflusst bleiben.

Anschließend baut man die KMR mit ungleichen Rohrüberständen in den Schalkasten ein und richtet diese so aus, dass sie sowohl vertikal als auch horizontal gerade sind. Zusätzliche Maßnahmen verhindern, dass sich die KMR während der Verfüllung mit ZFSV durchbiegen, aufschwimmen oder absinken. Die Ausschnitte in den Stirnplatten dichten geeignete Materialien ab.

Sofern gewünscht, lassen sich zusätzliche Messsensoren für zum Beispiel Temperatur auf den KMR anbringen, die mit geeigneter Kompensortechnik gegen das Abscheren geschützt werden müssen, ohne dass dadurch zusätzlicher Widerstand gegen das Durchschieben erzeugt wird. Ist dies erfolgt, ist der Versuch zur Verfüllung mit ZFSV bereit.

Um die KMR aufzuheizen, schweißt man vor dem Einbau in den Versuchskasten beidseitig Enddeckel aus Stahl auf die Mediumrohre auf. In diese oder in die Mediumrohre selbst sind dann Wasseranschlüsse und Entlüftungsventile einzuschweißen. Die Wasseranschlüsse dienen dem Anschluss der Vor- und Rücklaufschläuche zur Warmwasser-Heizungsanlage.

Die OTH.R, Labor für Geotechnik verfügt über eine selbstkonzipierte Heizungsanlage, die Wassertemperaturen zu Zeit bis 120°C und ab Ende 2016 bis zu 160°C ermöglicht.

Die Seite der KMR, auf der die Krafteinleitung mit der hydraulischen Presse (Druck und Zug) erfolgt, versieht man neben den Enddeckeln zusätzlich mit Aussteifungslaschen und einer Anschlussplatte für den Hydraulikzylinder, den man mit einer weiteren Anschlussplatte anbindet. Der endgültige Kraftschluss des Hydraulikzylinders erfolgt mittels eines Steck-Passbolzens durch zwei Laschen an der Anschlussplatte des Hydraulikzylinders und einem Auge im Zylinder. Die beiden Anschlussplatten am KMR entkoppelt man thermisch mittels geeigneter Materialien. Dies ist notwendig, da am Hydraulikzylinder die Kraftmessdose sitzt, welche thermisch unbeeinflusst bleiben muss.

Am Tag der Verfüllung bringt man den extern hergestellten ZFSV wie unter Baustellenbedingungen ein und entfernt rechtzeitig, die Lagesicherung der KMR. Der geeignete Zeitpunkt zum Rückbau Lagersicherung kann z.B. durch begleitende Versuche zur Festigkeitsentwicklung oder durch direktes Messen des Auftriebs erfolgen. Eine Folienabdeckung auf der Oberfläche des ZFSV verhindert die Austrocknung und Rissbildung. Am nächsten Tag bringt man die zusätzliche Auflast (Sand oder Gewichte) auf.

Nach der Wartezeit bis zum gewünschten Prüfalter erfolgt der Anschluss der Pressenhydraulik an das zu prüfende KMR mittels des Steck-Passbolzens und die Installation von Wegsensoren (Seilzuggeber, Messuhren und LVDT) auf beiden Seiten des KMR. Es schließt die computergesteuerte und computergeregelte Versuchsdurchführung mit Messdatenerfassung an. Sofern es sich um einen Versuch im geheizten Zustand handelt, ist die Heizung mit ausreichendem zeitlichem Vorlauf anzuschließen und das Rohr aufzuheizen. Die Temperaturüberwachung sowie Temperatursteuerung und -regelung erfolgt ebenfalls computergestützt mittels Messsensoren im Heizkreis. Folgt auf einen Versuch im geheizten Zustand ein Versuch im ungeheizten Zustand, schaltet man die Heizung ab und wartet das Abkühlen des KMR ab. Durch Anschluss an einen Kaltwasserkreislauf lässt sich das Abkühlen beschleunigen.

Abbildung 75 zeigt einen Blick auf den Versuchskasten von vorne während der Vorbereitung des Großversuches mit dem Produkt C-ST. Abbildung 76 ist die zugehörige seitliche Aufnahme; die Krafteinleitung mittels der hydraulischen Presse erfolgt auf der nicht sichtbaren Kastenstirnseite. Die eingebauten und lagegesicherten KMR zeigt Abbildung 77; links ist die Kastenstirnseite zu sehen, an den dortigen Rohrüberständen erfolgt die Krafteinleitung außerhalb des Kastens, rechts ist die Kastenstirnseite aus den beiden vorhergehenden Bildern zu sehen. Abbildung 78 vermittelt einen Eindruck, wie das Produkt C-ST den Kasten befüllt und die KMR umhüllt. Abbildung 79, die aus einem anderen Forschungsvorhaben stammt, zeigt links die hydraulische Presse mit dem Belastungsrahmen, in dem der Hydraulikzylinder sitzt und wie dieser mittels der Anschlussplatten thermisch entkoppelt an das Rohr anschließt. In der rechten Bildhälfte befindet sich in etwa in der Bildmitte die Heizungsanlage der OTH.R für die Großversuche.

Für die in den Abbildung 75 bis Abbildung 78 dargestellten Versuche waren alle KMR mit der gleichen Überlagerungshöhe von 0,4 m ZFSV und 0,7 m Sandauflast eingebaut, wobei die mittlere Wichte des Sandes 16,9 kN/m<sup>3</sup> betrug und die der ZFSV vom jeweiligen Typ abhängig war. Auch unterhalb des KMR mit dem größten Außendurchmesser verblieben so noch mindestens 0,25 m ZFSV bis Unterseite der Schalung. Die horizontalen Abstände zwischen den Rohren betragen min.  $1 \cdot D_a$ , wobei es sich auch bei den kleinmaßstäblichen Versuchen im ReSiST schon gezeigt hatte, dass dies bei den hier untersuchten ZFSV ausreichend ist.

Anders als der Sand, der aufgrund ausgeprägter Dilatanz zu Brückenbildungen und Verspannungen neigt, ist die Dilatanz bei ZFSV vernachlässigbar gering. Die maximal möglichen Vergusslängen der KMR in den ZFSV wurden so gewählt, dass insbesondere bei den KMR mit den kleinen Durchmessern aufgrund der erforderlichen Druckbeanspruchung nicht die Fließgrenze des Stahls erreicht wurde. Die dazu notwendige Kenntnis des Haftwiderstands beim erstmaligen Durchschieben des Rohrs wurde aus den kleinmaßstäblichen DSV im ReSiSt abgeleitet. War eine Verringerung der Vergusslängen erforderlich, so wurde diese mit Kunststoffhüllrohren sichergestellt, die über einen Teil des KMR vor dem Vergießen mit ZFSV geschoben wurden, so dass das KMR innerhalb der Hüllrohre nahezu reibungsfrei verschoben werden konnte.



Abbildung 75: Versuchsvorbereitung - Blick auf den Versuchskasten von vorne

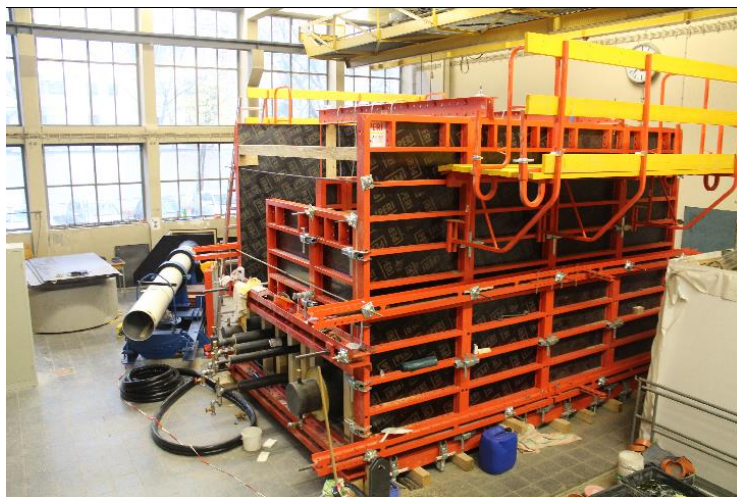


Abbildung 76: Versuchsvorbereitung - Blick auf den Versuchskasten von der Seite



Abbildung 77: Blick in den Versuchskasten mit lagegesicherten KMR



Abbildung 78: Blick in den Versuchskasten bei der Verfüllung mit dem Produkt C-ST



Abbildung 79: Hydraulische Presse mit Rohranschluss (links) und Heizungsanlage (rechts – Bildmitte)<sup>1</sup>

Es handelt sich, wie bei den Laborversuchen, um geschwindigkeitsgeregelte **Constant Rate of Penetration-Versuche (CRPV)**, mit denen das für Böden und insbesondere ZFSV sehr wichtige „Nachbruchverhalten“ erfasst werden kann, was mit einer Kraftsteuerung nicht möglich ist. Die Versuchsgeschwindigkeit ist ebenfalls mit 0,05 mm/min angesetzt, jedoch nur bis  $F_{Peak}$  erreicht ist. Danach wurde diese bei den großen Rohrdurchmessern ( $D_a > 125$  mm) um den

<sup>1</sup> Die Bilder stammen aus einem anderen Forschungsvorhaben (Quelle: OTH.R)

Faktor 10 bis 20 erhöht, da bei den Schiebewegen von bis zu  $1,5 \cdot D_a$  mit max.  $D_a = 560$  mm und dem umfangreichen Versuchsprogramm bereits eine halber Belastungszyklus (z.B. erstmaliges Durchschieben) sonst bis zu  $1,5 \cdot 560$  mm /  $0,05$  mm/min  $\approx 12$  Tage ohne Unterbrechung gedauert hätte.

Der erstmalige Durchschiebevorgang ist, wie bei den Laborversuchen, mit Zyklus 1 Richtung A (Z1 RiA) bezeichnet. Für weitere Durchschiebevorgänge setzt man das System während der Wartezeit kraftfrei, in dem man den Steck-Passbolzen für den Hydraulikzylinder entfernt. Die weiteren Durchschiebevorgänge erhalten die Bezeichnungen Z1 RiB, Z2 RiA und so weiter. Man führt sie wie den Zyklus 1 Richtung A (Z1 RiA) durch, nachdem man den Kraftschluss wiederhergestellt hat. Da der Hydraulikzylinder auf Druck und Zug arbeitet, entfällt ein Seitenwechsel mit Geräteumbau.

### 3.10.8 Versuchsprogramm Technikumsversuche

Bei den **beiden Großversuchen** haben sich die Projektpartner für das **Produkt A** und das **Produkt C-ST** entschieden. Die Beschränkung beim Produkt C auf C-ST musste aufgrund es enormen technischen und zeitlichen Aufwands für Großversuche erfolgen, der sich mit Untersuchung von C-TL und C-GT verdreifacht hätte. Für das Versuchsprogramm haben die Projektpartner die in Tabelle 19 zusammengestellten KMR abgestimmt. Namhafte KMR-Lieferanten haben diese kostenlos so zur Verfügung gestellt, dass sich je Großversuch fünf neue Rohre verwenden ließen. Die Projektpartner bedanken sich dafür.

Tabelle 19: Übersicht über die Dimensionen der im Großversuch eingesetzten KMR,

Nennweite DN [-]	$d_a$ Stahlmediumrohr [mm]	$D_a$ PEHD-Mantelrohr [mm]
20	26,9	90
40	48,3	125
80	88,9	160
150	168,3	280
300	323,9	560

$d_a$  Außendurchmesser des Stahlmediumrohres [mm]

$D_a$  Außendurchmesser des PEHD-Mantelrohres [mm]

Das zwischen den Projektpartnern abgestimmte Versuchsprogramm lautet je KMR wie folgt:

1. Stufe 1
  - a. **Festsetzen des Systems:** Vorspannen mit etwa 30 % der erwarteten Maximalkraft um systembedingte Verformungen zu kompensieren.
  - b. Zyklus 1 Richtung A (Z1 RiA)
  - c. Zyklus 1 Richtung B (Z1 RiB)
2. Stufe 2
  - a. **Aufheizen:** Aufheizen des KMR auf bis zu 120 °C, bis am Mantel  $T > 30$  °C
  - b. Zyklus 2 Richtung A (Z2 RiA)
  - c. **Abkühlen:** Abkühlen des KMR im Kaltwasserkreislauf bis im Mediumrohr  $T \approx 20$  °C bzw. Versuchshallentemperatur über min. 24 h gemessen wird
  - d. Zyklus 2 Richtung B (Z2 RiB)
3. **Stufe 3 – nur DN 40:** Wiederholung der Stufe 2, bis die Messergebnisse gleich bleiben oder sieben Wiederholungen erfolgt sind

Die **Stufe 1** wurde ohne geheiztes Rohr geplant, da die Laborversuche ebenfalls ungeheizt erfolgten. Die **Stufe 2** erlaubt es, den Einfluss der Radialdehnung des KMR (Verspannung - Aufheizen/ Tunneleffekt – Abkühlen) zu erfassen. Die Stufe 3 für das DN 40 hat man ergänzt, um den Einfluss einer zyklischen Beanspruchung zu erfassen.

Das Produkt C-ST hat ein Lizenznehmer des Lieferanten in seiner Mischanlage hergestellt, der das Produkt C im Großraum Regensburg anbietet. Die Fahrzeit von der Mischanlage zur OTH.R beträgt etwa 20 Minuten, so dass die tatsächliche Verarbeitungszeit unterhalb der zulässigen Verarbeitungszeit des Produktes C-ST lag.

Das Produkt A wurde am Tag der Befüllung des Großversuchskastens direkt mittels einer vom Lieferanten bereitgestellten Mischanlage mit zuvor an der OTH.R angelieferter Sackware hergestellt.

### **3.10.9 Versuchsergebnisse Technikumsversuche**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Technikumsversuche mit dem Produkt A dargestellt und diskutiert. Dafür wurden Versuche mit KMR DN 40 und KMR DN 300 ausgewählt, um die charakteristischen Verläufe der Durchschiebewiderstände in Abhängigkeit der Belastungszyklen herauszuarbeiten, aber auch durchmesserbedingte Unterschiede zu verdeutlichen. Die Ergebnisse der Spitzen- und Plateauwerte der ebenfalls untersuchten KMR DN 20, 80 und 150 werden in Abbildung 86 vergleichend dargestellt und finden sich in Anlage 13 als Versuchskurven.

Technikumsversuche mit dem Produkt C-ST\* wurden ebenfalls durchgeführt, mussten jedoch kurz nach dem Start aufgrund eines Defektes in der hydraulischen Belastungsvorrichtung für etwa ein ½-Jahr für aufwändige Reparaturarbeiten unterbrochen werden. Im Sommer 2016 wurde mit Wiederholversuchen begonnen, die erst in 2017 abgeschlossen werden konnten. Die Ergebnisse der Spitzen- und Plateauwerte der ebenfalls untersuchten KMR DN 20, 80 und 150 werden in Abbildung 91 vergleichend dargestellt und finden sich ebenfalls in Anlage 13 als Versuchskurven.

Im Wesentlichen wurden in den Stufen 1 bis 3 die Durchschiebekräfte und die Wege – wie in Abbildung 80 dargestellt - messtechnisch mittels einer elektronischen Kraftmessdose (Genauigkeit < 1% vom Endwert) und mehreren Wegaufnehmer (Genauigkeiten +/- 0,003 mm für  $s < 20$  mm und +/- 0,050 mm für  $s > 20$  mm) erfasst.

In Abbildung 80 sind auf der Druckseite (DS) zwischen der hydraulisch aufgebrachten Kraft  $F$  und dem KMR, die Kraftmessdose (grün) und die thermische Entkoppelung (orange) zu erkennen. Weiterhin wurden auf der Druckseite die axialen KMR-Verschiebungen  $s$  am PE-Außenrohr (schwarz) und am Stahlrohr (blau), wobei die Zunahme des Wegs in Druckrichtung mit  $+s$  bezeichnet ist, da sich die sichtbaren Messtasterlängen der Sensoren vergrößern. Auf der gegenüberliegenden Seite, die bei den Versuchen als Luftseite (LS) bezeichnet ist, wurden die axialen KMR-Verschiebungen  $s$  ebenfalls am PE-Außenrohr (schwarz) und am Stahlrohr (blau) messtechnisch erfasst. Die Zunahme der KMR-Verschiebung in Druckrichtung führen zu einer Verkürzung der sichtbaren Messtasterlängen der Sensoren, weshalb die Aufzeichnungen konsequenterweise mit  $-s$  erfolgten.



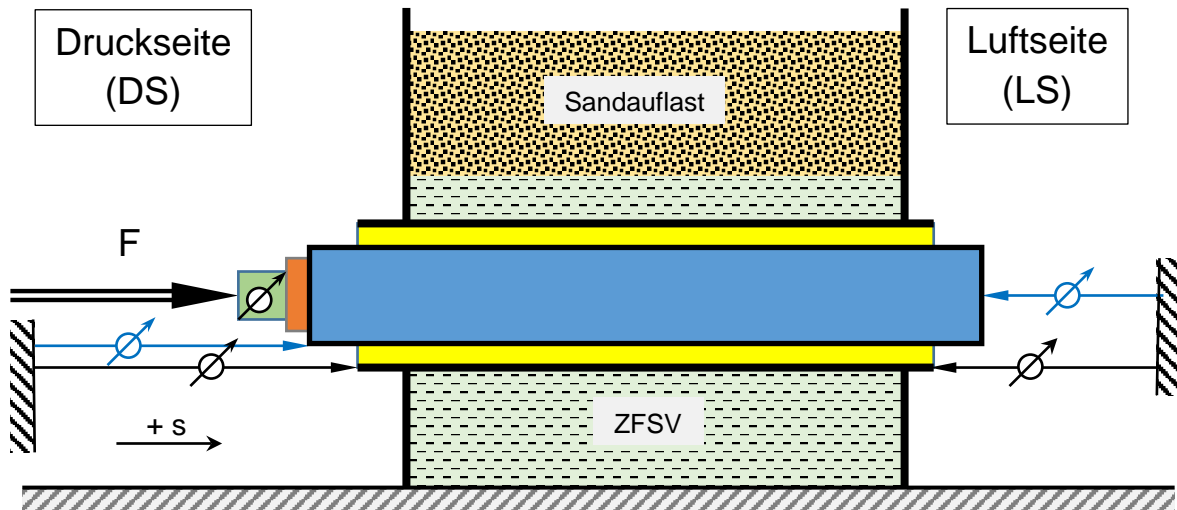


Abbildung 80: Prinzipieller Versuchsaufbau mit Messtechnik

Die Belastung  $F$  des KMR in Form von Druck und Zugkräften erfolgte ausschließlich auf das Stahlinnenrohr, so dass beim Versuch auch indirekt die Scherbeanspruchung des PUR-Schaums an der Oberfläche des Stahlinnenrohrs mit überprüft wurde. Zudem konnten mit den 4 Wegaufnehmern die Relativbewegungen zwischen Druck- und Luftseite sowie zwischen Stahlinnenrohr und PEHD-Mantelrohr mit erfasst und dargestellt werden.

Die vollständigen Ergebnisse der mit KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300 durchgeführten Großversuche mit Produkt A finden sich in der Anlage 13.1. In den Kraft-Weg-Diagrammen der Abbildung 81 und Abbildung 82 sind exemplarisch die Versuchsergebnisse des Produkts A für die Durchschiebversuche mit dem KMR Nennweite DN40 dokumentiert. Wie in allen Diagrammen sind, aus Gründen der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse für die unterschiedlichen Nennweiten, die Verschiebungen  $s$  mit dem Außendurchmesser  $D_a$  des PEHD-Mantels, sowie die Durchschiebkraft  $F$  mit dem Umfang  $U$  des PEHD-Mantels und der eingegossenen Länge  $L$  normiert.

In Abbildung 81 ist auf der Druckseite (rechts) sehr gut zu erkennen, dass sich die Adhäsionsspitze schon bei sehr geringen Verschiebungen  $s/D_a < 0,02$  voll ausbildet und der Durchschiebewiderstand dann mit zunehmender Verschiebung näherungsweise mit einer hyperbolischen Funktion abfällt, ohne jedoch einem erkennbaren Plateau zuzustreben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit  $s/D_a = 1,9$  bereits eine sehr große Verschiebung von etwa 240 mm aufgebracht wurde, wie sie in der Praxis nicht zu erwarten und zu vermeiden ist.

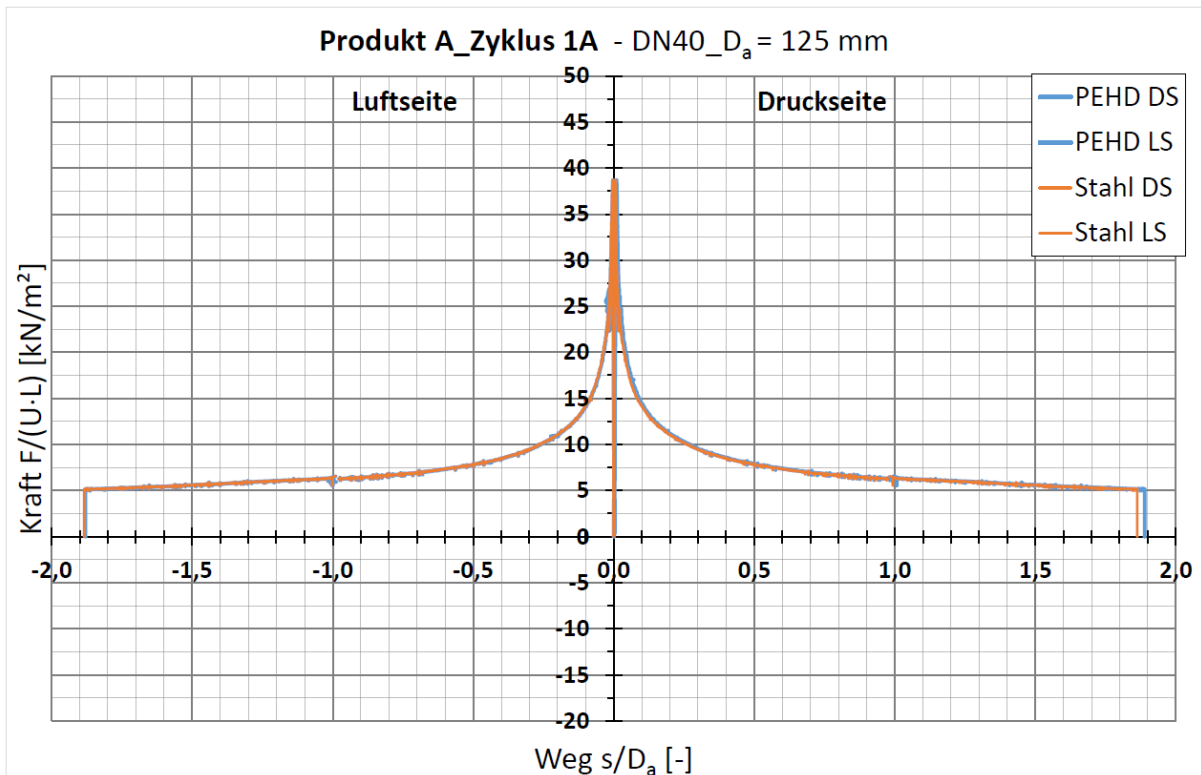


Abbildung 81: Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 40 in Produkts A im Zyklus 1 Richtung A

Die Kurven des PEHD-Außenmantels (blau) und die des Stahlinnenrohrs (orange) sind nahezu deckungsgleich, was auf geringe Differenzverschiebungen zwischen PEHD-Außenmantel und Stahlinnenrohr hinweist. Vergleicht man damit die gemessenen Verschiebungen auf der Luftseite (links), so erscheinen diese wie gespiegelt an der y-Achse des Diagramms. Daraus kann gefolgert werden, dass sich geringe, zumindest jedoch in Abbildung 81 nicht erkennbare Relativverschiebungen zwischen der Druckseite und der Luftseite eingestellt haben. Das KMR wurde anscheinend nur geringfügig gestaucht.

Der Rückgang des Durchschiebewiderstands auf 0 bei  $s/D_a = 1,0$  zeigt das Umsetzen des Hydraulikkolbens an, dessen Hub zum Zeitpunkt dieser Versuche noch auf etwa 125 mm beschränkt war. Hierbei ist hervorzuheben, dass offensichtlich auch Umbaupausen im Stundenbereich mit vollständiger Entlastung ( $F = 0$  kN) zu keinerlei Veränderung des Durchschiebewiderstands führten: Mit einer erneuter Belastung wird genau derselbe Durchschiebewiderstand erreicht, wie vor der Entlastung. Lediglich die Kurven des PEHD-Außenmantels (blau) und die des Stahlinnenrohrs (orange) unterscheiden sich bei der Ent- und Wiederbelastung etwas stärker, um jedoch mit Erreichen des Durchschiebewiderstands wiederum nahezu deckungsgleich zu verlaufen. Die geringen Unterschiede in der Ent- und Wiederbelastungsphase deuten auf ein stärkeres Entspannen des Stahlrohrs (orange) als das im ZFSV gehaltene PEHD-Außenmantels (blau) hin.

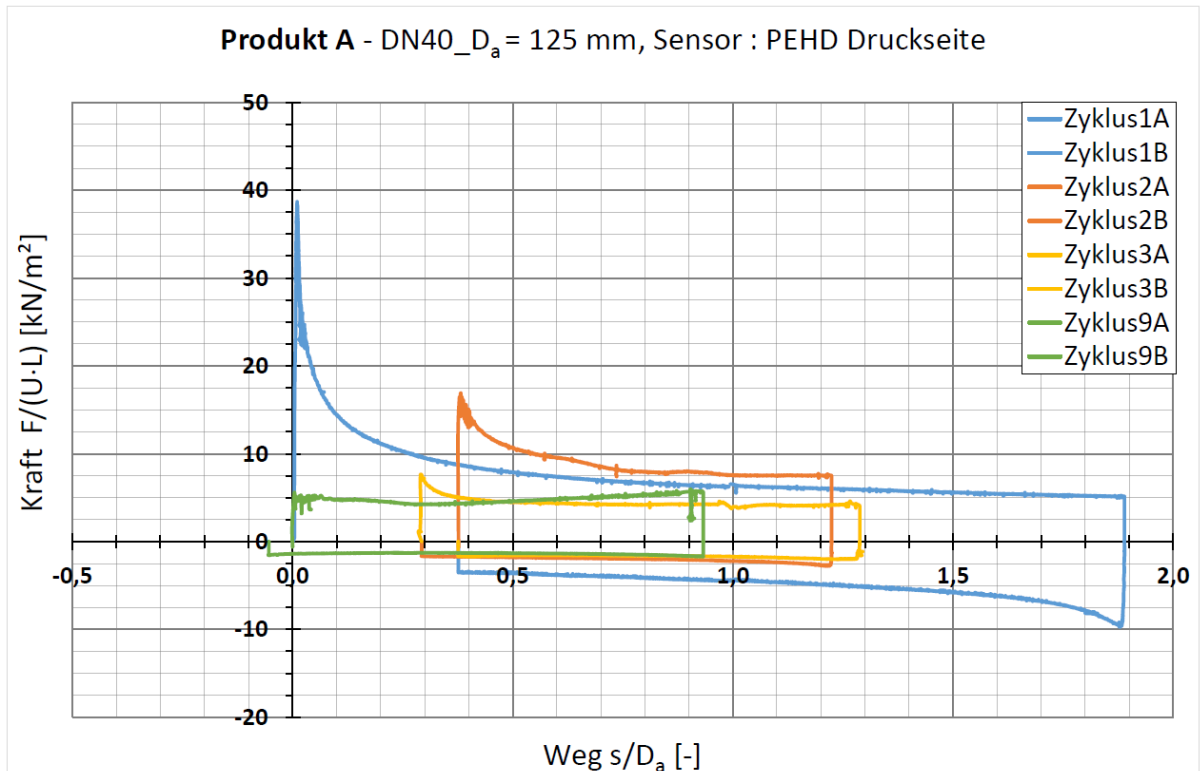


Abbildung 82: Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 40 in Produkt A mit den Zyklen 1A bis 3B sowie 9A und 9B.

Die vollständigen Zyklen 1 bis 3 und 9 sowohl A- als auch B-Richtung sind im Kraft-Weg-Diagramm der Abbildung 82 für die Druckseite dargestellt, wobei die Wegmessung des HDPE-Außenmantels als Bezug dient. Bei der Betrachtung der Kraft-Weg-Kurvenverläufe ist zu beachten, dass – bis auf Zyklus Z1A (blau) – alle Druckbelastungen in A-Richtung mit einer Mediumtemperatur von etwa 120°C und alle Zugbelastungen in B-Richtung mit einer Mediumtemperatur von etwa 20°C durchgeführt wurden. Am Verlauf der Kurve 2A (orange) ist in Abbildung 82 gut zu erkennen, dass sich durch das Aufheizen auf etwa 120°C erneute eine Adhäsionsspitze ausbildet, die jedoch nur noch etwa 40% des Spitzenwerts des Zyklus 1A erreicht. Bei größeren Verschiebungswegen nähern sich die Kurvenverläufe der beiden Zyklen 1A und 2A an. Auch bei Zurückziehen im abgekühlten Zustand Zyklus 1B (blau) entsteht eine Adhäsionsspitze, die nur noch 25% des Maximalwerts in Zyklus 1A erreicht. Von Zyklus zu Zyklus nehmen die Adhäsionsspitzen ab und sind in Zyklus 4 (nicht dargestellt) nahezu vollständig verschwunden; die Durchschiebewiderstände regeln sich bei nahezu konstanten Plateauwerten ein. Beim Durchdrücken im aufgeheiztem Zustand (120°C, Richtung A) liegen die Werte für  $F/(U \cdot L)$  etwa zwischen 6 und 8 kN/m<sup>2</sup> und beim Zurückziehen im abgekühltem Zustand (20°C, Richtung B) nur noch etwa bei 2 kN/m<sup>2</sup>. Anscheinend haben bereits 3 vollständige Zyklen ausgereicht, um die Kontaktfläche PEHD-Außenmantel/ ZFSV weitestgehend einzuregulieren und zu etwa konstanten Widerständen zu führen. Dies rechtfertigt auch, dass an alle anderen KMR nur 2 vollständigen Zyklen durchgeführt wurden. Um hier jedoch abschließende Aussagen zu machen sind hierzu sind vertiefende Untersuchungen mit deutlich mehr Lastzyklen  $N > 100$  erforderlich, wie sie im größeren Umfang nur in kleinmaßstäblichen Versuchen gemacht werden können

In Abbildung 83 ist für alle 9 Zyklen KMR DN 40 die Entwicklung von  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl N dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass sich nach 2 bis 3 Zyklen weder die Spitzenwerte noch die Plateauwerte sowohl beim aufgewärmten Durchdrücken als auch beim abgekühlten Zurückziehen verändern. Vielmehr fallen für  $N > 3$  Spitzenwerte und Plateauwerte zusammen. Bemerkenswert ist zudem, dass ein Restwert von konstant  $\tau_R \approx 2$  kPa beim Zurückziehen mit zunehmenden N verbleibt.

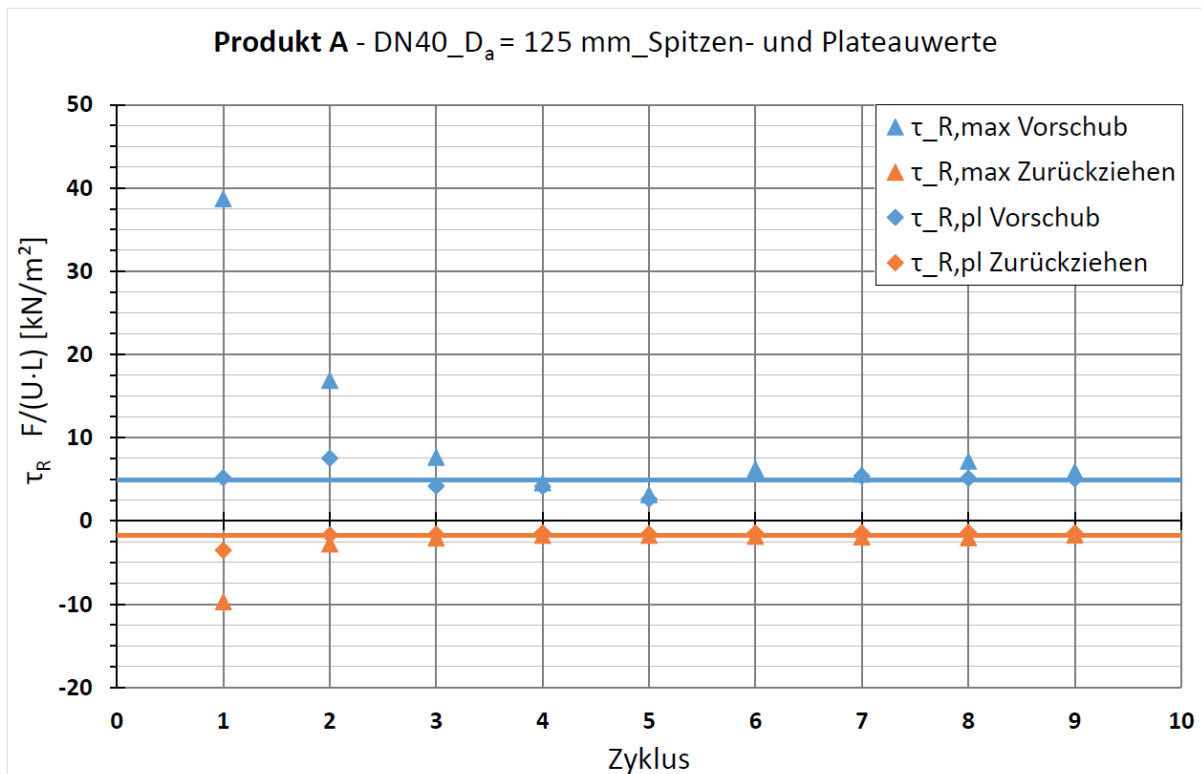


Abbildung 83: Entwicklung von  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl N des KMR DN 40

Der Zyklus 1A (Durchdrücken mit 20°C ungeheizt) des KMR DN 300 mit PEHD-Außenmanteldurchmesser  $D_a = 560$  mm ist in Abbildung 84 dargestellt. Aufgrund der langen Versuchszeiten und den Erkenntnissen aus den zuvor durchgeführten Versuchen mit kleineren Durchmessern, nach dem die Durchschiebekräfte nach dem Überwinden des Adhäsionspeaks monoton fallen, wurde die Verschiebung auf  $s/D_a = 1,0$  begrenzt, zumal so große Verschiebungen in der Praxis aus rohrstatischen Gründen vermieden werden müssen. Qualitativ unterscheiden sich Kurvenverläufe der Weg-Kraft-Diagramme für das KMR DN 40 und das KMR DN 300 kaum; lediglich die Adhäsionsspitze ist beim KMR DN 300 geringer.

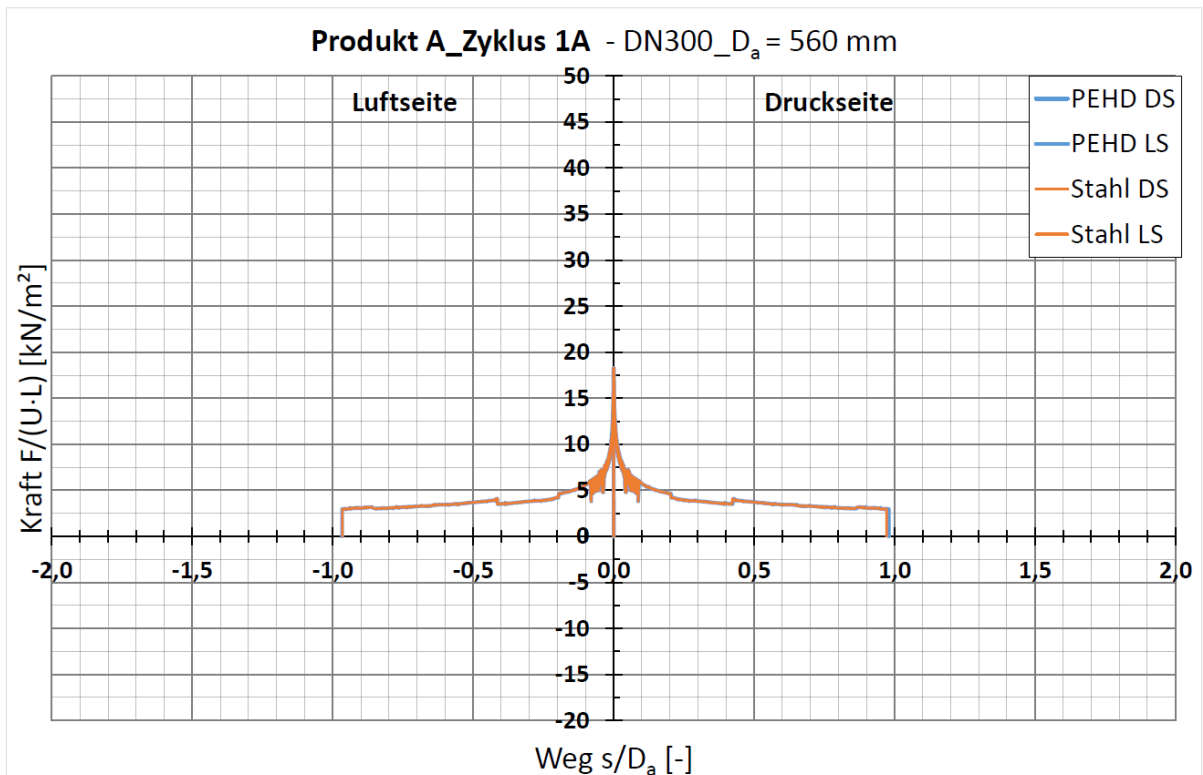


Abbildung 84: Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 300 in Produkt A in Zyklus 1 Richtung A.

Etwas größer sind die Unterschiede im Verhalten der KMR in den ersten beiden Zyklen 1A bis 2b, wie beim Vergleich von Abbildung 82 und Abbildung 85 ersichtlich wird. Zwar bildet sich beim Aufheizen und Durchschieben in Zyklus 2A eine geringere Adhäsionsspitze aus, jedoch sind beim KMR DN 300 die Durchschiebewiderstände bei größeren Verschiebungswegen durchgängig höher als beim KMR DN 40.

Ursache dafür sind, die beim Aufheizen auf 120°C erzeugten Normalspannungen an der Kontaktfläche ZFSV/PEHD-Außenmantel, welche auf die größeren Radialdehnungen des Stahlinnenrohrs KMR DN 300 gegenüber KMR DN 40 zurückzuführen sind. Dies unterstreichen die gemessenen Durchschiebewiderstände beim Zurückziehen des KMR DN 300 nach Abkühlen auf etwa 20°C. Der zweite Zyklus 2B liegt unter dem Zyklus 1B quantitativ und qualitativ vergleichbar den Ergebnissen aus den Weg-Kraft-Diagramme des KMR DN 40 in Abbildung 82.

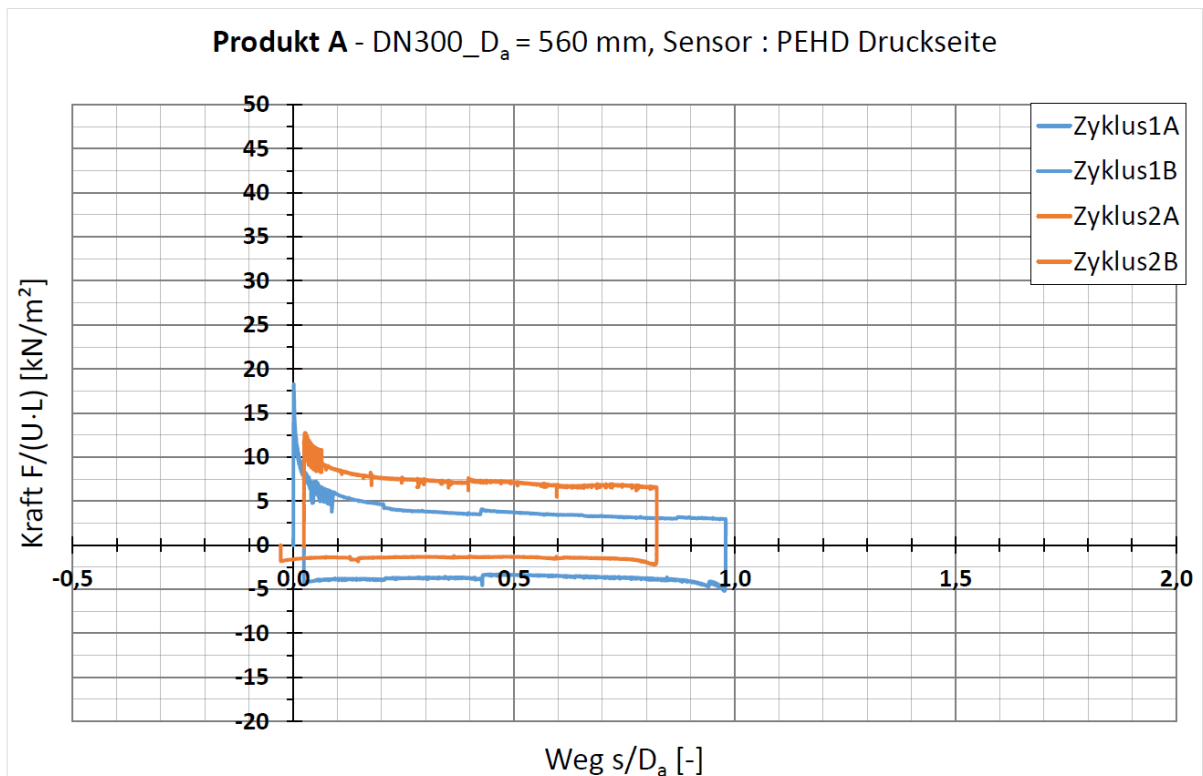


Abbildung 85 Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 300 in Produkt A mit den Zyklen 1A bis 2B.

In Anlage 13 sind die Ergebnisse aller in Produkt A gebetteten KMR DN 20 bis DN 300 dokumentiert. In der folgenden Tabelle 20 sind die Spitzen- und Plateauwerte aus den großmaßstäblichen Durchschiebversuchen der in Produkt A gebetteten KMR DN 20 bis DN 300 zusammengestellt.

Tabelle 20: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse und mit Korrektur der Zeit- und Spannungsabhängigkeit für Produkt A.

DN [ - ]	D <sub>a</sub> [mm]	t [d]	σ <sub>N</sub> [kPa]	τ <sub>R,max</sub> [kPa]	τ <sub>R,pl</sub> [kPa]	τ <sup>*</sup> <sub>R,max</sub> [kPa]	τ <sup>*</sup> <sub>R,pl</sub> [kPa]
20	90	191	9,8	45,8	4,2	32,6	2,4
40	125	150	10,3	38,7	5,2	28,6	3,3
80	160	131	10,5	38,6	6,8	29,2	4,6
150	280	94	11,0	31,4	6,2	24,9	4,8
300	560	53	12,2	22,5	3,8	19,3	3,3

σ <sub>N</sub>	mittlere Normalspannung auf den Rohrmantel	[kPa]
τ <sub>R,max</sub>	maximale Kontaktwiderstandsschubspannung / Adhäsionsspitze	[kPa]
τ <sub>R,pl</sub>	plastische Kontaktwiderstandsschubspannung / Plateauwert	[kPa]
t	Zeitpunkt des Versuchsbeginns nach Eingießen der KMR in Produkt A	[d]
τ <sup>*</sup> <sub>R,max</sub>	Zeit- und spannungskorrigierte Adhäsionsspitze	[kPa]
τ <sup>*</sup> <sub>R,pl</sub>	Zeit- und spannungskorrigierter Plateauwert	[kPa]

Die mittlere, effektive Normalspannung  $\sigma'_N$  auf den KMR-Mantel ergibt sich vereinfacht aus

$$\sigma'_N = \gamma \cdot H \cdot \left( \frac{1 + K_0}{2} \right) = \left[ \gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \left( h_2 + \frac{D_a}{2} \right) \right] \cdot \left( \frac{1 + K_0}{2} \right)$$

Formel 16: Mittlere Normalspannung  $\sigma'_N$  auf den im Versuchskasten einbauten KMR.

wobei H die Höhe der Überdeckung bis zur KMR-Achse und  $\gamma$  die Wichte des überlagernden Bodens bezeichnen. Bei den hier dokumentierten Großversuchen muss  $\sigma'_N$  aus der Summe der überlagernden Bodenschichten berechnet werden, da mit einer Sandauflast ( $h_1 \approx 0,70$  m;  $\gamma_1 \approx 17,0$  KN/m<sup>3</sup>) sowie der Wichte des Produkts A ( $\gamma_2 \approx 1,587$  t/m<sup>3</sup> · 9,81 m/s<sup>2</sup> = 15,6 kN/m<sup>3</sup>) gemäß Abbildung 14, der Scheitelüberdeckung  $h_2 = 0,38$  m und dem Außendurchmesser  $D_a$  des HDPE-Mantels. Der Erdruhedruckbeiwert wird mit Hilfe der Ergebnisse aus Abbildung 56 mit  $K_0 = K_{0,v} \approx 0,1$  für Produkt A angesetzt. Grundsätzlich stellt sich dabei die Frage, ob in ZFSV-gebetteten KMR Formel 16 zur Ermittlung der mittlere Normalspannung  $\sigma'_N$  angewendet werden sollte, zumal z. B. Arsic (2009) durch Messung belegt hat, dass bei ZFSV-Bettung über den Rohrfumfang deutlich gleichmäßigere Druckverteilungen herrschen als bei Sandbettungen. Bis weitere Kenntnis dazu vorliegen, wurde auch für ZFSV-Bettung im Folgenden die Formel 16 angewendet.

Um die Ergebnisse der Großversuche untereinander vergleichbar zu machen, müssen die Zeit t in Tagen [d] und die jeweilige mittlere Normalspannung  $\sigma'_N$  in [kPa] auf die KMR berücksichtigt werden, was mit Hilfe der Ergebnisse der an Produkt A durchgeführten kleinmaßstäblichen Durchschiebversuche bzw. mit Diagramme Abbildung 66 und Abbildung 69 der dem Großversuch zugeordneten Zeitreihe ZR 2 gelingt. Empfohlen werden als Bezugsspannung 0,125 bar = 12,5 KPa und als Bezugszeit t = 28d, da letztere aufgrund der Versuchsanzahl den am besten abgesicherten Werte zugeordnet ist. Für die Bezugsspannung 0,125 bar = 12,5 KPa und als Bezugszeit t = 28d lassen sich für die Spitzen – und Plateauwerte jeweils die Faktoren  $f_{\sigma,max}$  und  $f_{\sigma,pl}$  sowie  $f_{t,pl}$  und  $f_{t,max}$  gemäß Anlage 14 herleiten, die mit folgender Formel zur Spannungs- und Zeitkorrektur herangezogen werden können.

$$\tau^*_{R,max} = \tau_{R,max} \cdot f_{\sigma,max} \cdot f_{t,max} \qquad \tau^*_{R,pl} = \tau_{R,pl} \cdot f_{\sigma,pl} \cdot f_{t,pl}$$

Formel 17: Korrektur der Zeit- und Druckabhängigkeit bzw. Normierung von  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  auf 0,125 bar = 12,5 kPa und t = 28d.

Die mit Hilfe der Formel 17 vorgenommenen Korrekturen ergeben in Tabelle 20 die korrigierten Werte  $\tau^*_{R,max}$  und  $\tau^*_{R,pl}$  mit der zuvor benannten Bezugsspannung  $\sigma'_N = 12,5$  kPa und Bezugszeit t = 28d.

Generell ist für  $\tau^*_{R,max}$  ein mit zunehmenden Außendurchmesser  $D_a$  abnehmendes  $\tau^*_{R,max}$  zu erkennen, was als Maßstabseffekt bezeichnet werden kann. In Abbildung 86 sind die Messwerte Ausgleichsfunktionen angenähert. Vergleicht man nun die Versuchswerte mit denen der kleinmaßstäblichen DSV ( $DA = 40$  mm) fällt, dass  $\tau_{R,max}$  mit 27,8 kPa und  $\tau_{R,pl}$  mit 2,8 kPa etwas unter den Werten der maßstäblichen Großversuche zurückbleibt. Ein Grund dafür ist die glatte PE-RTII- Oberfläche der bei den kleinmaßstäblichen DSV eingesetzten, industriell gefertigten Aluminium-HDPE-Verbundrohre (System Mepla). Dennoch können mit dem Mepla-Rohr relativ genaue Untersuchungen durchgeführt werden, die tendenziell auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefern.

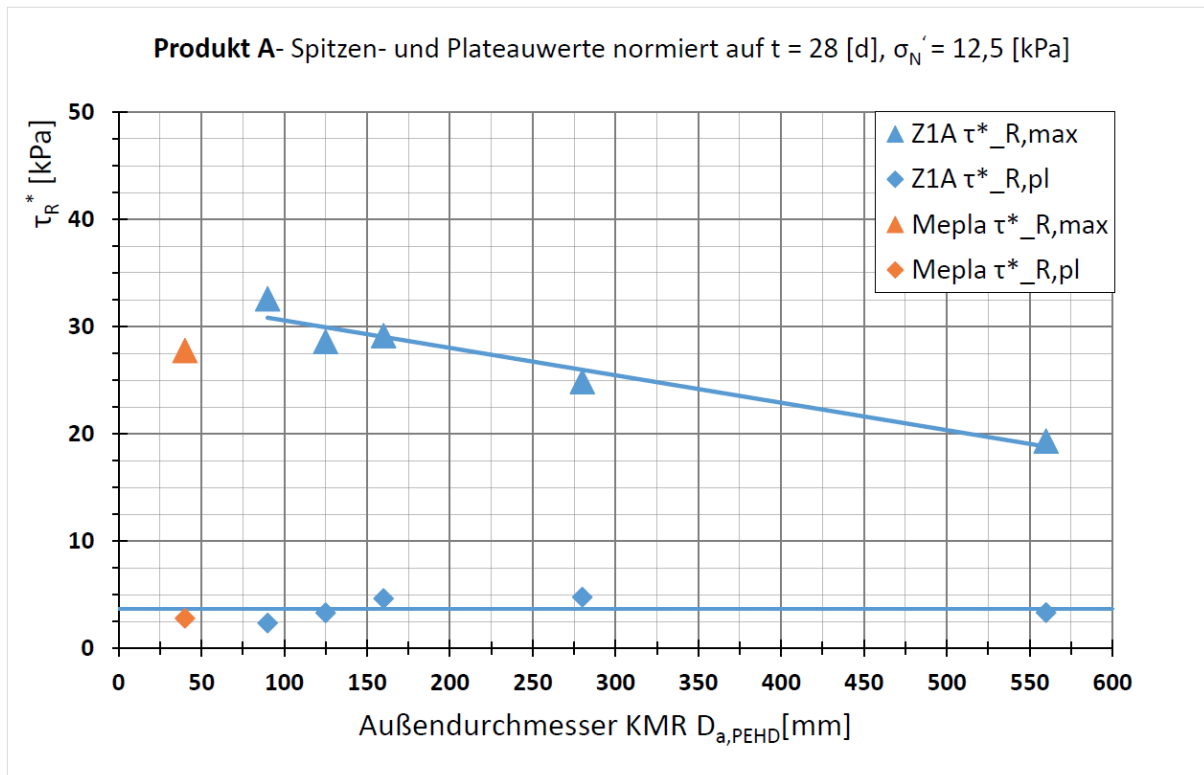


Abbildung 86:  $\tau_{R,max}^*$  und  $\tau_{R,pl}^*$  in Abhängigkeit des KMR- Außenrohrdurchmessers  $D_A$  für Produkt A.

Die vollständigen Ergebnisse der mit KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300 durchgeführten Großversuche mit Produkt C-ST\* finden sich in der Anlage 13.2. Beispielhaft sind in der Abbildung 87 und in der Abbildung 88 Versuchsergebnisse mit Kraft-Weg-Diagrammen der Durchschiebversuche mit dem KMR-Nennweite DN80 und DN 20 dokumentiert.

Wie bei Produkt A ist auch in Abbildung 87 für das in Produkt C-ST\* gebettete KMR DN 80 auf der Druckseite (rechts) gut zu erkennen, dass sich die Adhäsionsspitze schon bei sehr geringen Verschiebungen  $s/D_a < 0,02$  voll ausbildet und der Durchschiebewiderstand dann mit zunehmender Verschiebung näherungsweise mit einer hyperbolischem Funktion abfällt, ohne jedoch einem erkennbaren Plateau zuzustreben. Die Adhäsionsspitze  $\tau_{R,max}$  ist bei Produkt C-ST\* mit etwa 100 kPa deutlich größer als bei Produkt A, was auch so bei allen anderen untersuchten KMR-Nennweiten sowohl für  $\tau_{R,max}$  als auch  $\tau_{R,pl}$  der Fall war. Offensichtlich entwickelt Produkt C-ST\* deutliche größere Durchschiebewiderstände als Produkt A.

In Abbildung 88 mit dem KMR DN 20 sind auf der Druckseite beim Durchschieben geringe Differenzen zwischen dem Verschiebungen des PEHD-Außenmantels (blau) und dem Stahlinnenrohr (orange) zu erkennen, die auf der Luftseite. Hier führt offensichtlich die relativ geringe axiale Steifigkeit (EA) des dünnwandigen Stahlinnenrohrs zu Stauchungen, so dass das KMR DN 20 nicht mehr als näherungsweise „starrs Rohr“ angesehen werden kann. Ähnliche Effekte sind auch beim KMR DN 40 aufgetreten, was die Auswertung der Versuchsergebnisse erschwert. In diesem Zusammenhang wird auf Anlage 13.2 verwiesen.



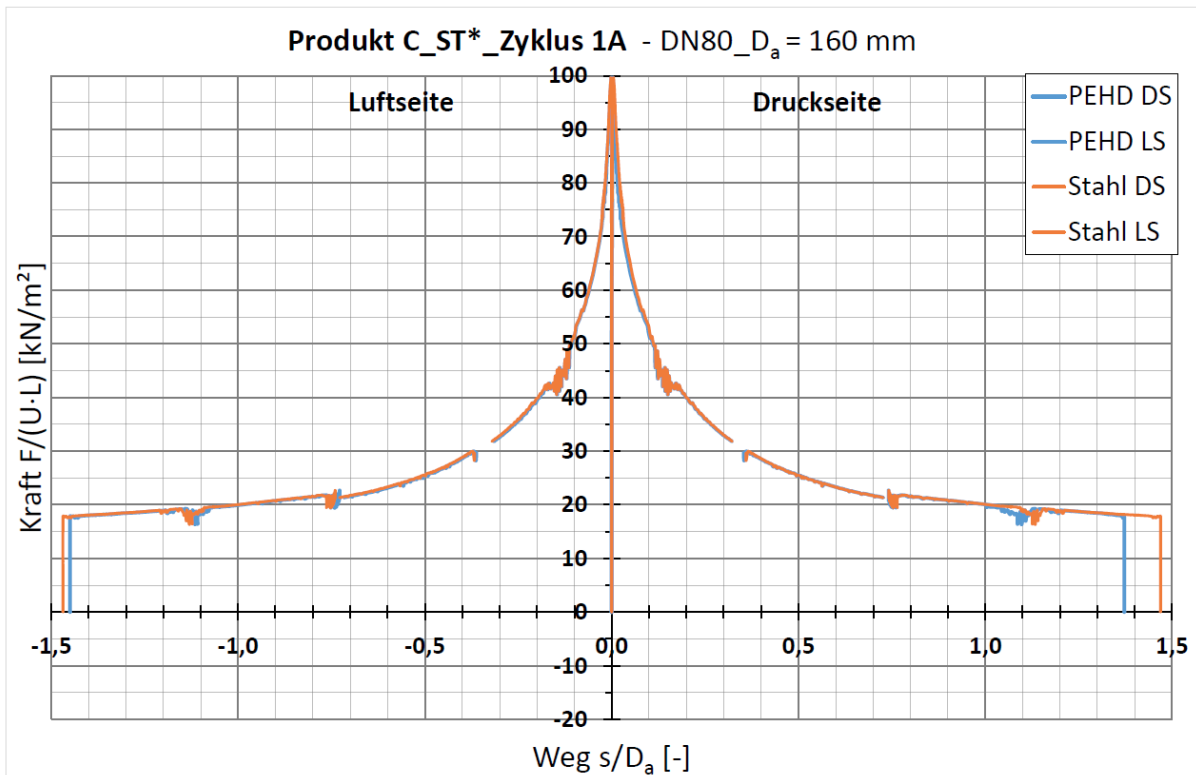


Abbildung 87: Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 80 in Produkt C-ST\* im Zyklus 1 Richtung A.

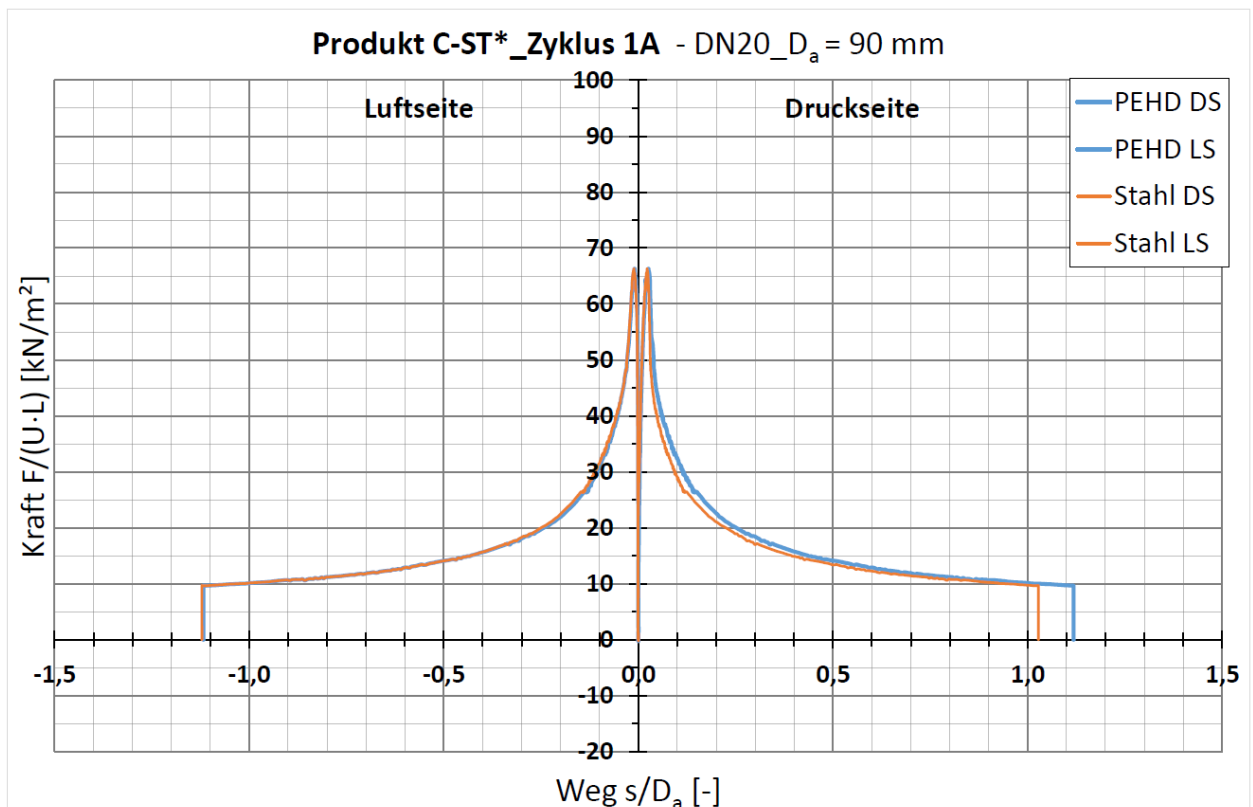


Abbildung 88: Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 20 in Produkt C-ST\* mit den Zyklen 1A.

Bei Produkt C-ST\* konnten die Verschiebewege und die Anzahl der Zyklen aufgrund der im Rahmen der Versuchsserie mit Produkt A gewonnene Erkenntnisse etwas reduziert werden, ohne an Aussagekraft zu verlieren. Beispielhaft dafür sind die Versuchskurven in Abbildung 89, wo bereits nach 4 Zyklen der Versuch beendet wurde, da - analog dem Verhalten des

Produktes A in Abbildung 82 - sich keine wesentlichen Veränderungen des Kraft-Weg-verhaltens für  $N > 3$  mehr einstellen.

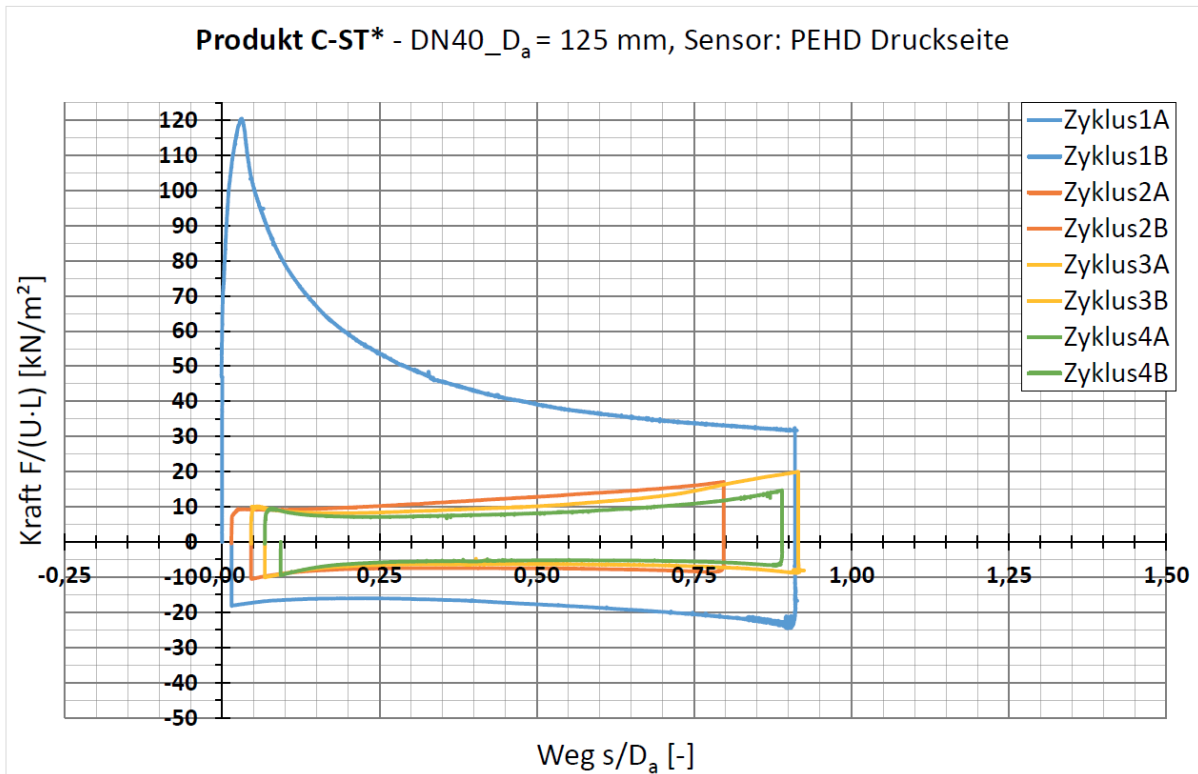


Abbildung 89: Kraft-Weg-Diagramm des KMR DN 40 in Produkt C-ST\* mit den Zyklen 1A bis 4B.

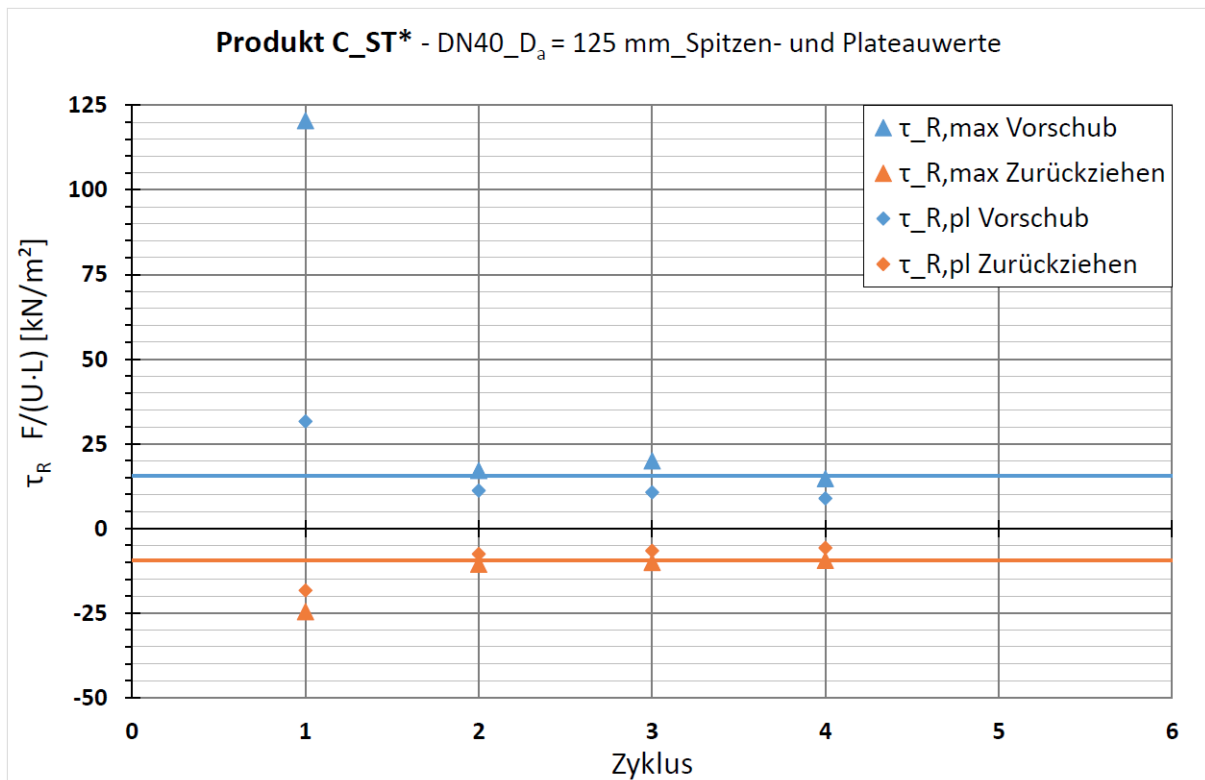


Abbildung 90: Entwicklung von  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl  $N$  des KMR DN 40

Die hohen Durchschiebewiderstände bzw. Dehnungsbehinderung bei Produkt C-ST\* die bei den Wiederholversuchen auftreten, sind der Wartezeit zwischen Verfüllen und tatsächlicher Versuchsdurchführung geschuldet. Diese hohen Durchschiebewiderstände des ZFSV C-ST\* am KMR sind einer lokale Adhäsions-Zunahme am Interface ZFSV/HDPE zuzuschreiben – zum Interface siehe auch Wagner (2017) - und kein Indiz dafür, dass eine allgemeine Verfestigung stattgefunden hat, die eine erschwerte Wiederaushubfähigkeit zur Folge hätte. Hierzu besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf.

In Abbildung 90 ist die Entwicklung von  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl N für alle 4 mit dem KMR DN 40 im Produkt C-ST\* ausgeführten Zyklen dargestellt. Dabei wurden aufgrund des Kurvenverlaufs ab  $N > 1$  für die Ausgleichsgerade zu  $\tau_{R,pl}$  Mittelwerte über die gesamten Verschiebungswege  $s/D_a$  gewählt. Auch bei Produkt C-ST\* ändern sich bereits nach 3 Zyklen die Spitzenwerte noch die Plateauwerte sowohl beim aufgewärmten Durchdrücken als auch beim abgekühlten Zurückziehen kaum noch. Beim abgekühlten Zurückziehen verbleibt mit zunehmenden N dennoch ein Restwert von  $\tau_R \geq 5$  kPa, der somit gegenüber dem Restwert von  $\tau_R \approx 2$  kPa des Produktes A deutlich größer ist.

Die korrigierten Werte  $\tau^*_{R,max}$  und  $\tau^*_{R,pl}$  können auch für das Produkt C-ST\* mit Hilfe von Formel 17 und den in Anlage 14 hergeleitete Faktoren für die Bezugsspannung  $\sigma'_N = 12,5$  kPa und die Bezugszeit  $t = 28d$  ermittelt werden. In der folgenden Tabelle 22 sind die Spitzen- und Plateauwerte aus den großmaßstäblichen Durchschiebversuchen der in Produkt C-ST\* gebetteten KMR DN 20 bis DN300 zusammengestellt.

*Tabelle 21: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse und mit Korrektur der Zeit- und Spannungsabhängigkeit für Produkt C-ST\**

DN [ - ]	$D_a$ [mm]	t [d]	$\sigma'_N$ [kPa]	$\tau_{R,max}$ [kPa]	$\tau_{R,pl}$ [kPa]	$\tau^*_{R,max}$ [kPa]	$\tau^*_{R,pl}$ [kPa]
20	90	42	10,7	66,3	10,1	65,3	10,3
40	125	317	16,1	120,5	31,6	76,6	12,7
80	160	184	11,1	99,6	20	78,8	13,8
150	280	266	11,7	94,9	21,7	70,5	13,5
300	560	300	13,1	64,2	21,1	45,1	9,7

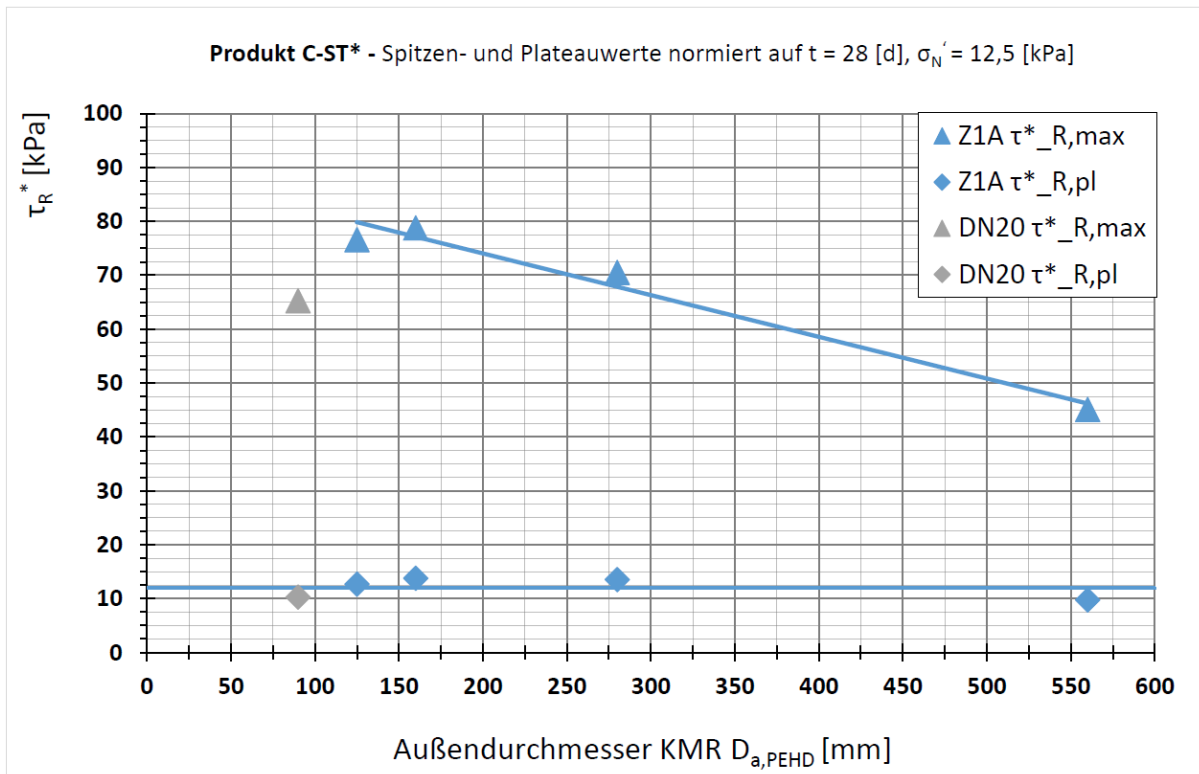


Abbildung 91:  $\tau_{R,max}^*$  und  $\tau_{R,pl}^*$  in Abhängigkeit des KMR- Außenrohrdurchmessers  $D_A$  für Produkt C-ST\*

Auch aus den Großversuchen an Produkt C-ST\* ist für  $\tau_{R,max}^*$  – mit Ausnahme KMR DN 20 – ein Maßstabeffekt abgeleitet werden, da auch für Produkt C-ST\*, wie in Abbildung 91 gut erkennbar,  $\tau_{R,max}^*$  mit zunehmenden Außendurchmesser  $D_a$  abnimmt. Vergleicht man die nun die normierten Ergebnisse für Produkt A in Abbildung 86 mit den normierten Ergebnissen in Abbildung 91 für Produkt C-ST\* fällt auf, dass sowohl  $\tau_{R,max}^*$  als  $\tau_{R,pl}^*$  des Produktes C-ST\* etwa um Faktor 2,5 größer sind als bei Produkt A.

Ähnliche Faktoren zwischen 2,0 und 2,5 sind auch für die weiteren Lastzyklen  $N > 1$  zu z. B. in Abbildung 89 erkennen: Das Produkt C-ST\* bewirkt - mit der eingesetzten und hier untersuchten Rezeptur - einen deutlich größeren Durchschiebewiderstand bzw. eine deutlich größere Dehnungsbehinderung als das Produkt A.

In Abbildung 91 wurde bewusst von der Darstellung der Versuchswerte der kleinmaßstäblichen DSV mit Mepla-Rohr ( $D_A = 40$  mm) abgesehen, da beim Wiederholversuch mit dem Produkt C-ST\* keine kleinmaßstäblichen DSV durchgeführt wurden.

### 3.10.10 Folgerungen aus den Technikumsversuchen

Die Ergebnisse und Folgerungen aus den durchgeführten Technikumsversuchen können wie folgt stichpunktartig zusammengefasst werden.

- Mit den vorliegenden Ergebnissen liegen erstmalig Vergleichsversuche von in einen gleichzeitig in ZFSV eingegossen, 6,0 m langen KMR von DN 20 bis DN 300 vor, die am Rohrscheitel alle dieselbe Überlagerungsspannung aufweisen.
- Auch bei den maßstäblichen Großversuchen bilden sich, wie bei den kleinmaßstäblichen Durchschiebversuchen, an allen KMR eine ausgeprägte Adhäsionsspitze als Widerstand aus, nach deren Überwindung ein Entfestigungsverhalten gemessen wurde, bei dem sich der Widerstand mit dem Verschiebungsweg  $u$  kontinuierlich auf einen Plateauwert von 15 bis 25% der Adhäsionsspitze abbaut. Der Plateauwert wird immer erst nach Verschiebungswegen  $u > D_a$  erreicht.
- Im Allg. genügen 3 bis 4 vollständige Belastungszyklen (Druck/ Zug) bis sich die Widerstands/Weg-Kurven kaum mehr ändern. Sowohl Produkt A als auch Produkt C-ST\* haben sich anscheinend im Kontaktbereich so weit eingeregelt, dass sich der Widerstand kaum mehr verändert.
- Beim Zurückziehen der abgekühlten KMR konnten bei Produkt A im ersten Zyklus Widerstände von im M.  $\tau_{R,max} = 5,3$  kPa, die nach mehreren Zyklen auf 2 bis 3 kPa abfielen, gemessen werden. Ein weiterer Abfall der Widerstände oder gar ein kompletter Verlust der Widerstände konnte auch nach 9 Zyklen am KMR DN 40 nicht beobachtet werden. Dies ist bemerkenswert, da im Sinne eines worst-case-Szenarios erst nach dem vollständigen Abkühlen auf 20°C mit dem Zurückziehen der KMR begonnen wurde.
- Für Produkt C-ST\* wurden in sämtlichen Zyklen und bei allen Rohrdurchmessern etwa um Faktor 2,0 bis 2,5 größere Werte der Adhäsionsspitze  $\tau_{R,max}$  und des Restwerts  $\tau_{R,pl}$  gegenüber Produkt A gemessen.
- Mit Hilfe der Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Durchschiebeversuchen können näherungsweise spannungs- und druckabhängige Korrekturen der Großversuchsergebnisse für  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  sowohl für Produkt A als auch Produkt C-ST\* durchgeführt werden.
- Generell ist sowohl bei Produkt A als auch C-ST\* für die die Adhäsionsspitze  $\tau_{R,max}$  ein mit zunehmenden Außendurchmesser  $D_a$  der KMR abnehmender Spitzenwert festzustellen, was als Maßstabseffekt bezeichnet werden kann. Dieser Maßstabseffekt rechtfertigt auch zukünftige maßstabsgerechte Großversuche.
- Auch nach 9 vollständigen Zyklen mit dem KMR DN 40 konnten bei Produkt A nur vernachlässigbar geringe, bleibenden Differenzverschiebungen zwischen Stahlinnenrohr und HDPE-Außenmantel beobachtet werden, trotz einer relativen großen PUR-Schaumstoffdicke, die sich aus dem Verhältnis  $D_A/d_a = 125 \text{ mm} / 48,3 \text{ mm} = 2,588$  ergibt.
- Bei Produkt C-ST\* wurden aufgrund der hohen Durchschiebewiderstände bzw. der großen Dehnungsbehinderung bei den KMR DN 20 und 40 geringe, bleibende Differenzverschiebungen zwischen Stahlinnenrohr und HDPE-Außenmantel auf der Druckseite gemessen, die auf der Luftseite vernachlässigbar gering waren. Dies deutet auf ein entsprechendes Stauchen des Stahlinnenrohrs. Auch bei Produkt C-ST\* wurde an der Kontaktfläche PUR/Stahlinnenrohr kein Abscheren beobachtet.

## 4 Feldversuche mit Messreihen

Einerseits wird im Forschungsvorhaben zum Thema KMR-Leitungen in ZFSV ein Großteil der Versuchsreihen und Messergebnisse aus den in Abschnitt 3.10.7 beschriebenen Technikumsversuchen gewonnen, die weggesteuert durchgeführt wurden. Andererseits weisen erdverlegte, warmgehende Leitungen im Betrieb innerhalb eines Netzverbundes Wechselwirkungen mit dem Verfüllmaterial auf, die kraftgesteuert erfolgen und sich in Labor- bzw. Technikumsversuchen nur schwer erfassen lassen.

Neben den Laboruntersuchungen sind daher Feldmessungen ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens. Mit Unterstützung der Mainova AG und der Netzdienste Rhein-Main (NRM) konnte die Projektgruppe die anstehende Erschließung und damit einhergehende Erweiterung des Fernwärmenetzes des, derzeit auf ehemaligem Bahngelände entstehenden, Europaviertels in Frankfurt nutzen.

### 4.1 Vorstellung der Versuchsstrecke

Ziel des Feldversuches war es, die unterschiedlichen Dehnungsbehinderungen von Sand und ZFSV unter ansonsten identischen Verlege- und Betriebsbedingungen zu ermitteln. Dazu wurde eine Versuchsstrecke gebaut, die keinerlei Versorgungsaufgaben übernimmt und nur zu Messzwecken dient. Im internen Sprachgebrauch wurde die Versuchsstrecke deshalb "Bypassleitung" genannt.

In einem Strang dieser Versuchsstrecke wird die Leitungszone klassisch mit Sand verfüllt. In dem parallel verlaufenden zweiten Strang wird die Leitungszone mit ZFSV verfüllt. Im Gegensatz zu anderen bereits realisierten Versuchsstrecken soll die Mediumtemperatur in der Bypassleitung gezielt eingestellt werden können.

#### 4.1.1 Ursprünglich geplante Versuchsstrecke „Tel-Aviv-Platz“

Dank der Unterstützung der Mainova AG wurde dem Forschungsvorhaben für die Versuchsstrecke zunächst ein Trassenraum am "Tel-Aviv-Platz" in dem neu entstehenden Stadtgebiet "Europaviertel" in Frankfurt zugewiesen. Die theoretischen Vorüberlegungen zur Konzeption der Versuchsstrecke wurden für den Tel-Aviv-Platz getroffen und für die tatsächlich zur Ausführung gekommene Versuchsstrecke in der Trasse "Römischer Ring" übernommen.

Zur Identifikation einer geeigneten Nennweite für die Versuchsstrecke am Tel-Aviv-Platz werden im Rohrstatikprogramm sisKMR unterschiedliche Nennweiten in Sandbettung gerechnet. Hierbei wird von einer durchschnittlichen Überdeckungshöhe im städtischen Bereich von ca. 1,0 m ausgegangen. Des Weiteren beträgt die maximale Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes bei Höchstlast 120 °C, abgeleitet aus der Heiztemperaturkurve des HKW-Messe, an dessen Verteilnetz die Bypass-Leitung angebunden wird. Damit ergibt sich beim Anfahren der Bypass-Leitung eine maximale Temperaturspreizung von 110 K. Die Druckstufe des Verteilnetzes beträgt PN 16 und aus den örtlichen Gegebenheiten ergibt sich ein bebaubarer Korridor mit einer Länge von ca. 45 m.

Aufgrund des recht kurzen zur Verfügung stehenden Bauraumes wird die Verlegelänge der Leitung künstlich durch Setzen eines Festpunktes am Beginn der Messstrecke verlängert. Der sich beim einfach verfüllten Graben bildende natürliche Festpunkt zwischen den Kompensationen wird durch einen gezielt gesetzten Festpunkt ersetzt und eine Ausdehnung der Leitung in eine definierte Richtung erzwungen. Durch diese Verlängerung der Dehnstrecke ergeben sich durch Aufsummieren der Reibkraft zwischen Leitung und Erdreich über die

Strecke vom Festpunkt (FP) bis zum freien Systemende (FSE) höhere auf die Leitung wirkende Kräfte und daraus resultierend eine größere behinderte Wärmedehnung. Diese ist für die Versuchsreihen eine entscheidende Größe zur Bestimmung der aus dem ZFSV wirkenden Dehnungsbehinderung sowie ggf. deren zeitliche Veränderung im Leitungsbetrieb.

Wird für die Anbindung an die Verteilleitung sowie das Setzen eines Festpunktes ein benötigter Bauraum von ca. 4 m angesetzt, steht für die Versuchsstrecke eine freie Länge von rund 41 m zur Verfügung. Die angesetzten Parameter in der Berechnung/Vorauslegung sind in Tabelle 22 aufgeführt.

Die unbehinderte Wärmedehnung  $\Delta l_0$  eines 41 m langen Stahlstabes berechnet sich nennweitenunabhängig wie folgt dargestellt:

$$\Delta l_0 = \alpha_t * \Delta T * l$$

$$\Delta l_0 = 1,24 * 10^{-5} \frac{1}{K} * 110 K * 41.000 mm$$

$$\Delta l_0 = 56 mm$$

Formel 18: Berechnung der Wärmedehnung

Tabelle 22: Angesezte Parameter für die Berechnung / Vorauslegung der Messstrecke

Randbedingungen / Annahmen	
Max. Vorlauftemperatur	120 °C
Min. Betriebstemperatur	12 °C
Temperaturdifferenz $\Delta T$	110 K
Nenndruckstufe	PN 16
Überdeckungshöhe	1,0 m
Länge l zwischen FP und FSE	41,0 m

Unter diesen Bedingungen dehnt sich ein erdverlegtes KMR DN 100 mit Da 200 (DN 100/200) in Sandbettung um ein max.  $\Delta l$  von 45 mm. Die Differenz zur freien Dehnung von 56 mm ist die Dehnungsbehinderung und beträgt 11 mm oder bezogen auf die freie Dehnung 20 %.

Das Ziel des Feldversuchs ist die Messung der unterschiedlichen Dehnungsbehinderung von Sand und ZFSV. Da aber nur eine kurze Messstrecke von 41 m zur Verfügung steht, kommen nur kleine Nennweiten in Frage. Je größer die Nennweite, desto geringer ist die Dehnungsbehinderung bei gleichbleibender Leitungslänge.

In nachfolgender Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Berechnungen unter den Randbedingungen Überdeckung: 1,0 m, TVL: 120 °C,  $\Delta T$ : 110 °C, Länge FP -> FSE: 41 m, Druckstufe: PN 16,  $\sigma_{ax,zul}$ : 188,0 N/mm<sup>2</sup> und in Sandbettung aufgeführt.

Tabelle 23: Dehnungsbehinderung bei verschiedenen Nennweiten an der Versuchsstrecke Tel-Aviv-Platz

Nennweite	Dämmreihe	zul. Verlege-länge	Stahlquer-schnitt	$\sigma_{ax,vorh}$	Normal-kraft Stahlrohr	Haftbereich	max. $\Delta l$	Dehnungsbehinderung	
DN		[m]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[m]	[mm]	[mm]	[%]
100/200	1	121,0	1252	113,5	142,1	-	45	11	20%
100/225	2	106,6	1252	130,6	163,5	-	43	13	23%
80/160	1	106,4	862	132,3	114,0	-	43	13	23%
80/180	2	93,9	862	150,5	129,7	-	41	15	27%
50/125	1	84,4	523	170,8	89,3	-	39	17	30%
50/140	2	75,0	523	192,4	100,6	-	37	19	34%
40/110	1	69,1	373	208,1	77,6	-	35	21	38%
40/125	2	60,5	373	235,0	87,7	-	32	24	43%
25/90	1	58,2	254	244,0	62,0	-	31	25	45%
25/110	2	47,2	254	273,8	69,5	-	26	30	54%
20/125	3	25,5	156	286,9	44,8	ca. 8	15	41	73%

#### 4.1.1.1 Die Berechnung erfolgt nach (AGFW Arbeitsblatt FW 401)

Hierbei wird die Bodenwichte  $\gamma$  mit 19,0 kN/m<sup>3</sup>, der Bodenreibungswinkel  $\varphi$  mit 32,5 ° sowie ein Ruhedruckbeiwert  $K_0$  von 0,46 angesetzt. Des Weiteren wird der Reibungskoeffizient  $\mu$  für das Anfahren der Leitung mit 0,4 und für das Absenken der Temperatur mit 0,2 gesetzt.

Nach den Berechnungen der Leitung mit den gegebenen Rahmenbedingungen für die Bypass-Leitung Tel-Aviv-Platz bildet sich bei den geprüften Dimensionen lediglich bei Nennweite DN20/125 (Dämmreihe 3) ein Haftbereich aus.

#### 4.1.1.2 Grabenprofil Bypass-Leitung Tel-Aviv-Platz

Die Bypass-Leitung wird ohne Wärmeabnahme und mit zirkulierendem Medium zwei Vorläufe mit näherungsweise gleichen Mediumrohrtemperaturen ausbilden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, eine der Leitungen in Sand, die zweite Leitung in ZFSV zu betten und die beiden Bettungsvarianten miteinander sowie die Messergebnisse der Sandbettung mit den entsprechenden Berechnungsansätzen zu vergleichen.

Die unterschiedlichen Bettungsarten der beiden Leitungen erfordern ein vom Standard abweichendes Grabenprofil, da beide Verfüllmaterialien getrennt voneinander in den Graben eingebracht werden müssen. Des Weiteren sollte eine Trennung der Bettungen während des Betriebes gewährleistet sein, um mögliche Wechselwirkungen ausschließen zu können.

In nachfolgender Abbildung 92 sind zwei mögliche Grabenprofile dargestellt. Favorisiert wird das rechte Grabenprofil, weil es durch den trapezförmigen Keil aus gewachsenem Erdreich eine ebenso zuverlässige Entkoppelung der Rohrverschiebungen in Sand und ZFSV gewährleistet, wie der bautechnisch nur wesentlich aufwändiger herstellbare Rechteckkeil im linken Grabenprofil.



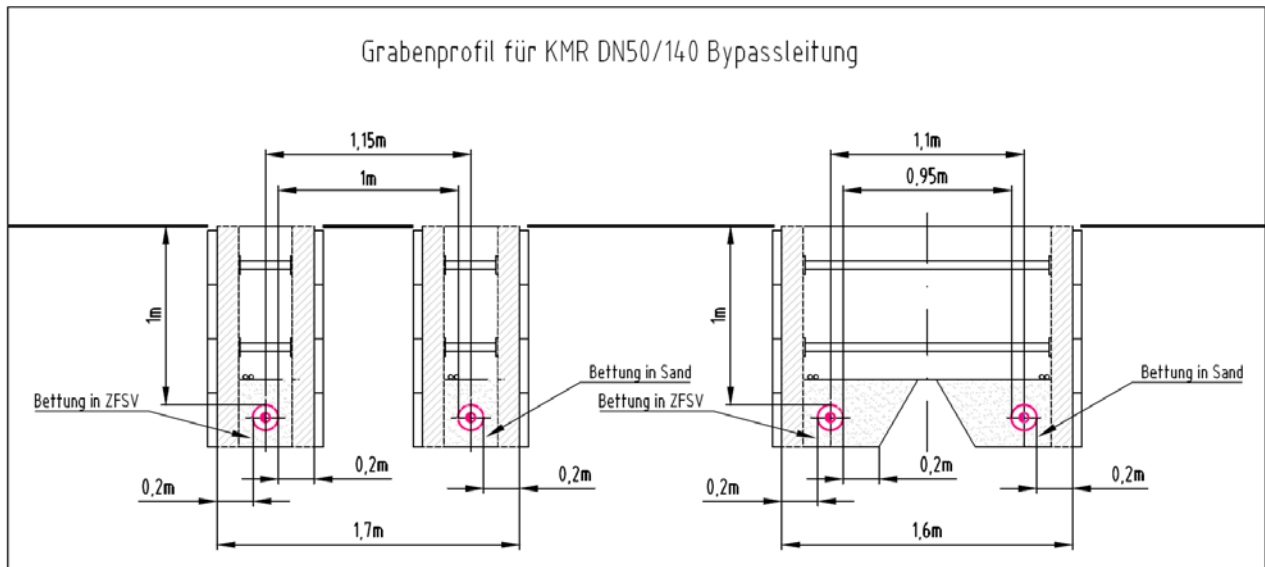


Abbildung 92: Mögliche Grabenprofile

#### 4.1.1.3 Stornierung der Versuchsstrecke

Nach Festlegung einer Nennweite für die Bypassleitung im Tel-Aviv-Platz/Europaviertel Frankfurt sowie der Ausarbeitung der Planunterlagen fanden Planungsgespräche mit den Projektträgern des Baugebietes Europaviertel für eine Feinabstimmung der genauen Trassenlage sowie der Lage der Armaturen- und Messschächte gemeinsam mit dem Netzbetreiber Netzdienste Rhein-Main (NRM) statt. Im Zuge dieser Gespräche stellte sich heraus, dass der Bau und Betrieb einer Bypassleitung im Tel-Aviv-Platz zeitlich begrenzt sein könnte. Grund hierfür sind die derzeit nicht vorliegenden Pläne der Stadt Frankfurt zur genauen Oberflächengestaltung des Tel-Aviv-Platzes im Endausbau. Dieser wird in 2016 fertiggestellt und könnte den unmittelbaren Rückbau der Bypassleitung zur Folge haben.

Die Bypassleitung bietet jedoch die außergewöhnliche Möglichkeit zur Untersuchung von ZFSV im direkten Vergleich zur konventionellen Bettung in Sand. Die Gelegenheit eine ausgiebig messtechnisch überwachte Bypassleitung, die keine unmittelbaren Versorgungsaufgaben übernimmt und zudem über Regelventile im Temperaturverlauf frei steuerbar ist und damit die Simulation beliebiger Netzbetriebssituationen ermöglicht, gilt es auch über die Projektlaufzeit hinaus, längst möglich wahrzunehmen. Die vom AGFW seit Projektende weiterhin durchgeführte Überwachung der Messstelle erzeugt eine umfangreiche Datenbasis, durch die weitere Untersuchungen von ZFSV möglich sind. Die gesammelten Daten können längerfristig für Forschungs- und Messzwecke eingesetzt werden und bieten so das Potential, für anschließende Forschungsvorhaben, beispielsweise zum Langzeitverhalten von ZFSV, Rohdaten bereitzustellen, die anschließend fachkundig ausgewertet werden können.

Der Wunsch, die Leitung auch über das Jahr 2016 hinaus zu betreiben, führte zur Entscheidung, die Versuchsstrecke „Tel-Aviv-Platz“ aufzugeben und im Europaviertel nach einem alternativen Trassenkorridor für die Bypassleitung zu suchen.

#### 4.1.2 Realisierte Versuchsstrecke „Römischer Ring“

Nach erneuter Begehung der Örtlichkeiten sowie eingehender Prüfung der vorliegenden Planunterlagen des Projektträgers zur Oberflächengestaltung, zu Fremdmedien und zur Anschlussmöglichkeit an das Fernwärme-Bestandsnetz der NRM stellte sich eine Trassierung im Bereich Römischer Ring als bevorzugte Variante heraus. Die Bypassleitung kann hier in

einer Grünanlage mit Rad- und Gehweg parallel zur Straße Römischer Ring verlegt werden und wird an eine bestehende KMR DN 300/450 Leitung der NRM angebunden.

Nach Rücksprache mit dem Projektträger und Vorlage einer ersten Entwurfsplanung stellte dieser die Möglichkeit einer Realisierung mit Betrieb über die Projektlaufzeit hinaus in Aussicht.



Abbildung 93: Rad- und Gehweg Römischer Ring (Quelle: GEF)

Die technische Umsetzung der Bypassleitung wird analog zu der bereits für den Tel-Aviv-Platz abgestimmten Ausführungsvariante als KMR-Leitung der Nennweite DN 40 in Dämmreihe 2 mit einem Mantelrohrdurchmesser von 140 mm erfolgen.

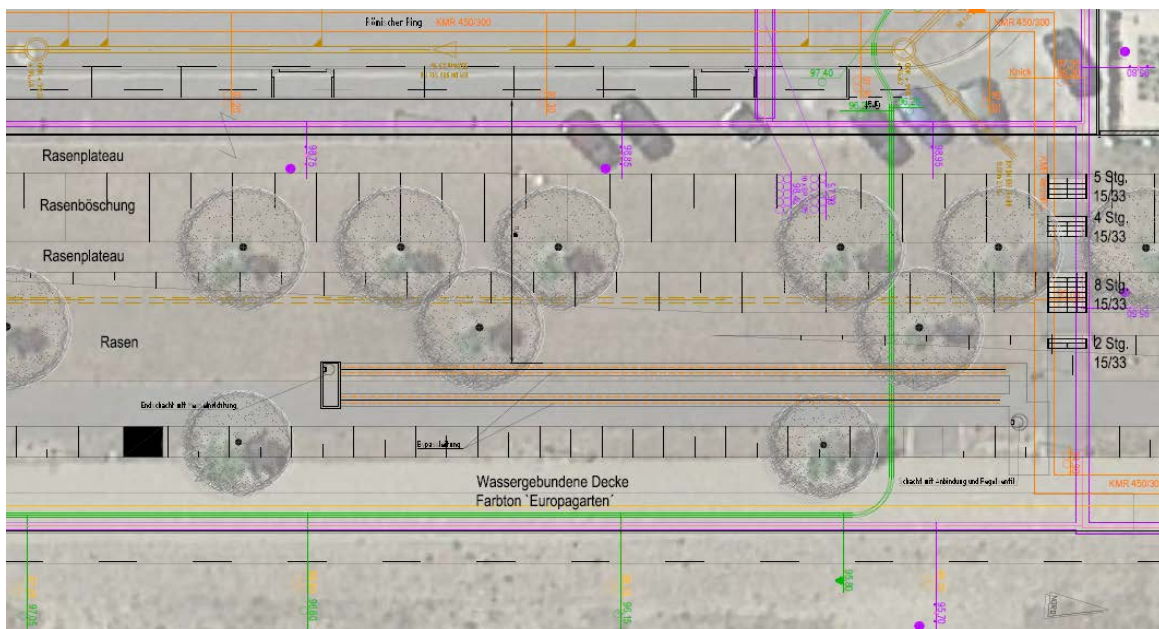


Abbildung 94: Versuchsstrecke zwischen Festpunkt und Messschacht

Aus den örtlichen Gegebenheiten ergibt sich eine Überdeckung der KMR-Leitungen von ca. 1,6 m. Das Grabenprofil für die Bypassleitung Römischer Ring ist in der Abbildung 95 ersichtlich.

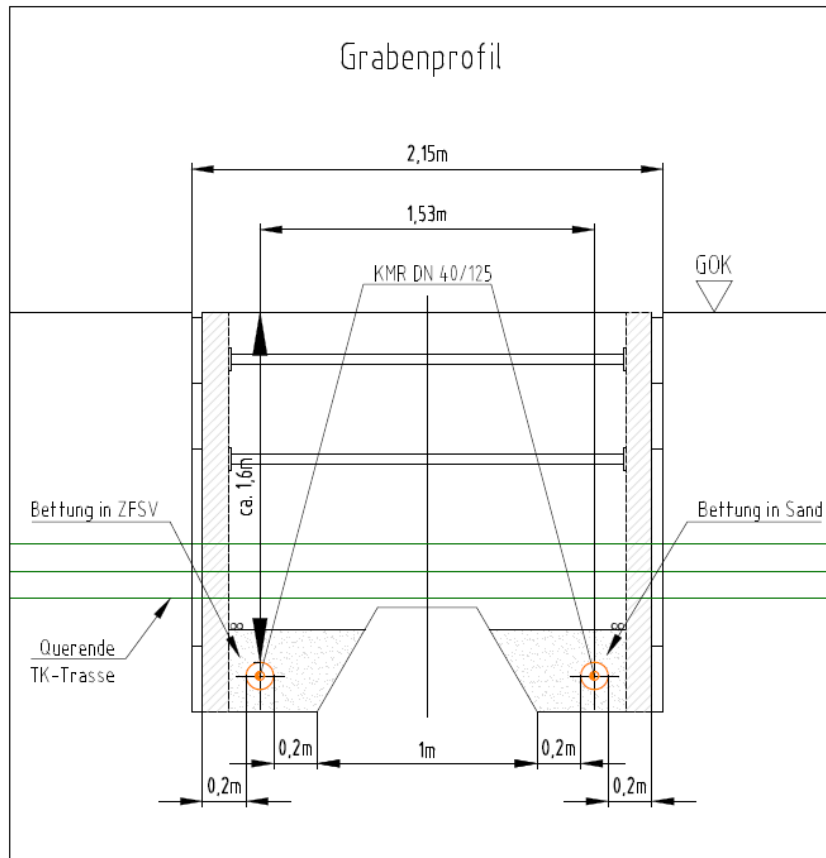


Abbildung 95: Grabenprofil Versuchsstrecke Römischer Ring

Die Länge der Versuchsstrecke beträgt 50 m. Die rohrstatischen Berechnungen für eine 50 m lange Trasse mit Festpunkt (FP) sind nachfolgend aufgeführt.

Die unbehinderte Wärmedehnung  $\Delta l_0$  eines 50 m langen Stahlstabes beträgt, mit den Annahmen aus Tabelle 24, nach Formel 18 nennweitenunabhängig 68 mm:

Tabelle 24: Annahmen zur Versuchsstrecke

Annahmen	
Max. Vorlauftemperatur	120 °C
Min. Betriebstemperatur	10 °C
Temperaturdifferenz $\Delta T$	110 K
Nenndruckstufe	PN 16
Überdeckungshöhe	1,6 m
Länge $l$ zwischen FP und FSE	50,0 m

Die Ergebnisse, der nach AGFW FW 401 in sisKMR berechneten DN 40/125 KMR-Leitung in Sandbettung, sind in Tabelle 25 zu sehen.

Tabelle 25: Ergebnisse der sisKMR Berechnung für KMR-Leitung DN 40/125

Ergebnisse für KMR DN 40/125	
zul. Verlegelänge	60,5 m
Stahlrohrquerschnitt	373,3 mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ax,vorh}$	285,3 N/mm <sup>2</sup>
Freie Dehnung	68 mm
Dehnungsbehinderung	47 mm (69 %)
max. $\Delta l$	21 mm
axiale Reibkraft	3,61 kN/m

Des Weiteren wurde eine Entscheidung getroffen, wie die Anbindung der Bypassleitung an das bestehende Wärmenetz erfolgen soll. Hierbei wird ein Dreileiteranschluss realisiert werden, sodass die Bypassleitung sowohl aus dem Vorlauf als auch aus dem Rücklauf gespeist werden kann. Mittels temperaturgesteuertem Drei-Wege-Ventil können Mischtemperaturen gefahren und auf diese Weise Lastgänge simuliert werden. In Abbildung 96 ist das Schaltschema dargestellt.

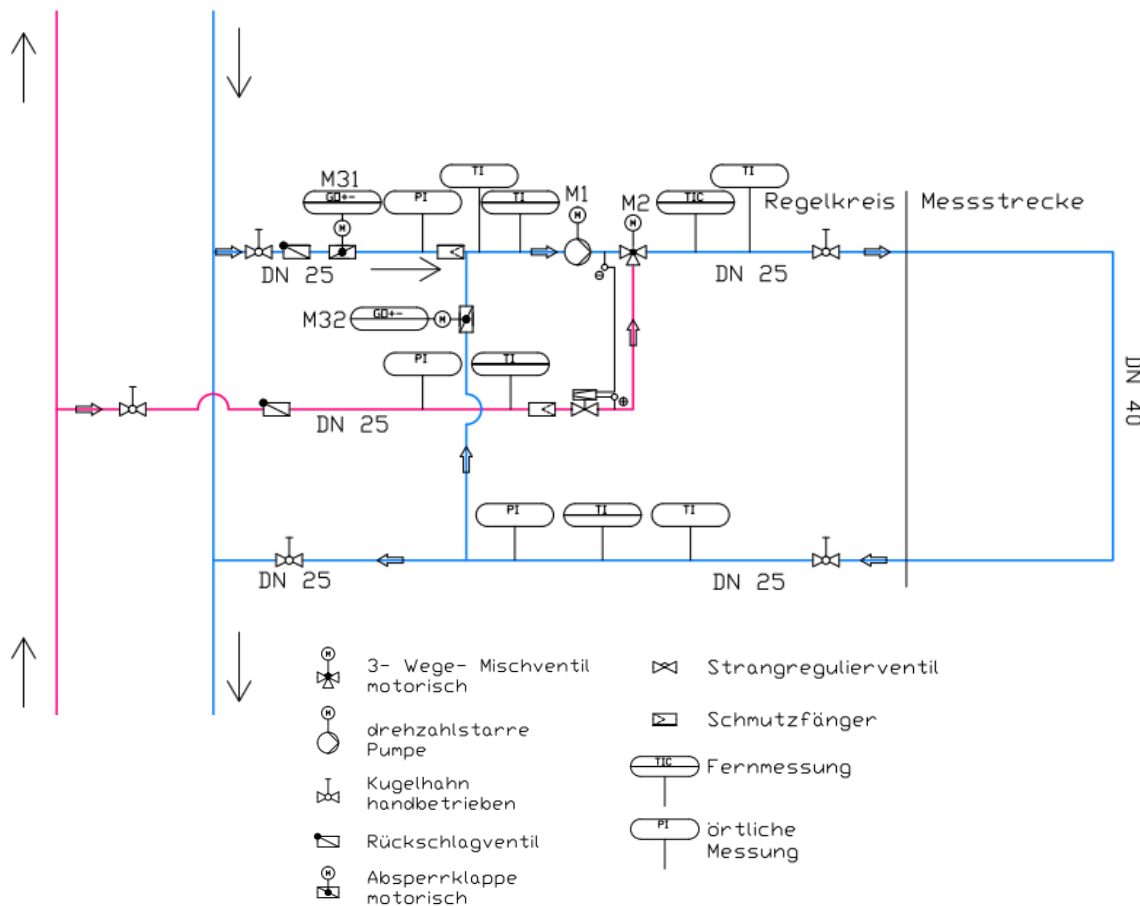


Abbildung 96: R+I Schema der Anbindung Messstrecke

Im Zuge der Abstimmung mit den Ämtern sowie den Bauträgern im Europaviertel wird für die Versuchsstrecke ein Korridor mit einer maximalen Länge von ca. 60 m zur Verfügung stehen. Abzüglich der Anbindung sowie des Messschachtes beträgt die tatsächliche Messstrecke ca. 50 m. Um eine möglichst starke Dehnungsbehinderung zu erreichen, wird zur künstlichen Verlängerung der Messstrecke ein Festpunkt am Beginn der Messstrecke gesetzt (Abbildung 97).

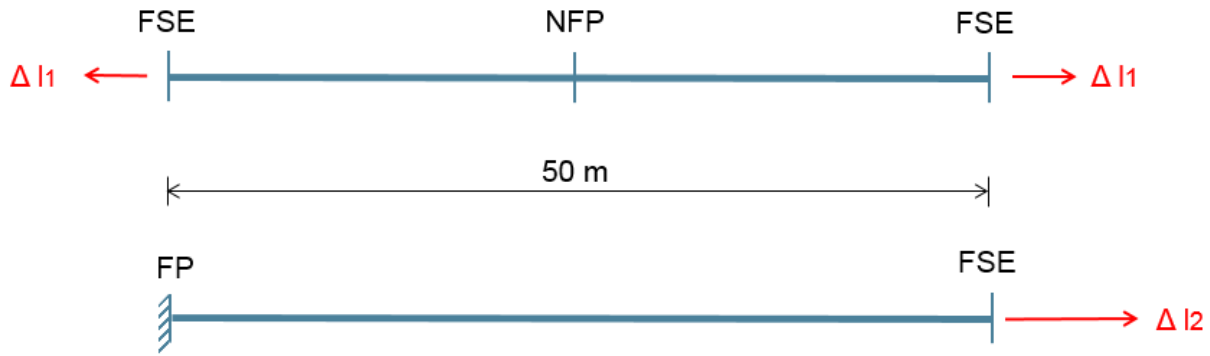


Abbildung 97: Auslegungsvarianten ohne und mit Festpunkt

- FSE: Freies Systemende
- NFP: Natürlicher Festpunkt
- FP: Festpunkt Stahl

Dies entspricht dem rohrstatischen Verhalten einer entsprechend erdverlegten KMR-Leitung mit einer Länge von 100 m und sich in der Mitte der Strecke ausbildenden natürlichen Festpunkt.

Im Zuge dieser Festlegung werden die Ausführungspläne sowie das Leistungsverzeichnis für den weiteren Genehmigungsprozess sowie die Ausschreibung vorbereitet. Des Weiteren wird festgelegt, dass eine Kraftmessung zwischen KMR-Leitung und Festpunkt erfolgen soll. Hierzu werden zwei, im Besitz des AGFW befindliche Kraftmessdosen mit einer jeweiligen maximalen Kraftaufnahme von 500 kN eingesetzt.

Unter den Annahmen aus Tabelle 26 errechnet sich mit Formel 19 die maximal zu erwartende, je Leitung wirkende axiale Kraft, im Zuge der Wärmedehnung der KMR-Leitungen, auf den Festpunkt (bei Einsatz eines Stahlrohrs DN 40 mit 48,3 x 3,2 mm bedingt durch KMR-Lieferant gegenüber 2,6 mm Wanddicke aus Norm) je Leitung

$$F_{max} = \alpha_t * \Delta T * E * A$$

Formel 19: Berechnung der maximal zu erwartenden Axialkraft aufgrund von Wärmedehnung

$$F_{max} = 1,24 * 10^{-5} * \frac{1}{K} * 110K * 213,3 \frac{kN}{mm^2} * 453,39mm^2 \approx 130kN$$

Tabelle 26: Annahmen zur Berechnung der maximalen Axialkraft

Annahmen	
Max. Vorlauftemperatur	120°C
Min. Betriebstemperatur	10°C
Temperaturdifferenz ΔT	110 K
Ausdehnungskoeffizient α <sub>t</sub>	PN16
E-Modul für P235 GH (nach DIN EN 253)	13,3 kN/mm <sup>2</sup>

Die Auslegung des Festpunktes erfolgt mit einem Sicherheitsfaktor von 1,25.

Der Festpunkt ist so auszulegen, dass dieser der Krafteinleitung aus zwei Leitungen mit jeweils 165 kN aufnehmen kann ohne sich dabei zu verschieben. Für die Auslegung der Erdruehdruk anzusetzen.

Des Weiteren ist bei der Auslegung des Festpunktes der Fall einer Torsion, verursacht durch eine asymmetrische Krafteinleitung unterschiedlich stark wirkender Kräfte aus den beiden Leitungen, zu berücksichtigen um eine Verdrehung des Festpunktes zu vermeiden.

Die Lage des Festpunktes mit einer Breite von 2,5 m und einer Höhe und Tiefe von jeweils 2,0 m sowie die Anbindung an das Bestandsnetz werden wie in Abbildung 98 dargestellt realisiert.

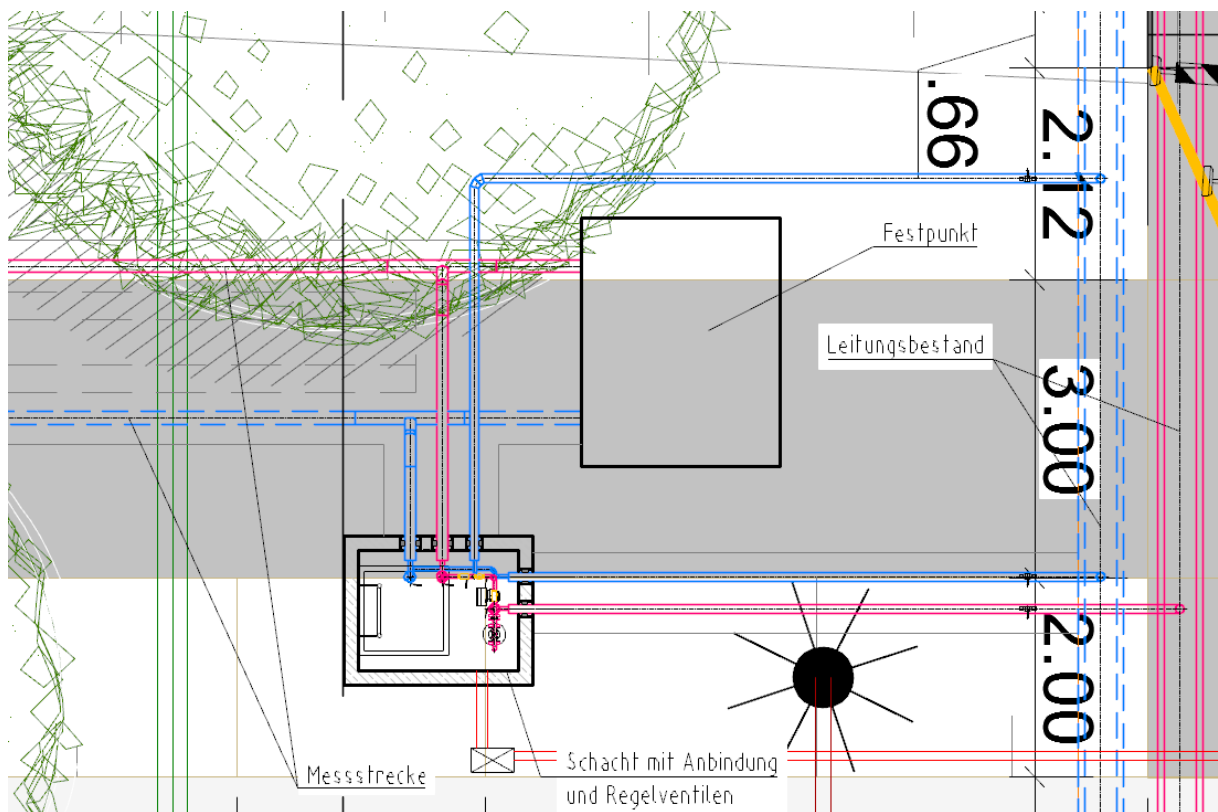


Abbildung 98: Versuchsstrecke am Festpunkt und Anbindeschacht mit Regelventilen

Die medienführenden Leitungen zweigen hierbei unmittelbar vor dem Festpunkt mittels eines T-Abzweiges in Richtung Anbindeschacht ab. Die Kräfte aus der Messstrecke werden über eine entsprechende Konstruktion über die Kraftmessdosen in das Widerlager abgeleitet. Der Einfluss der T-Stücke auf die Messstrecke ist hierbei vernachlässigbar.

Abbildung 99 zeigt die detaillierte Konstruktion zur Einbindung der Kraftmessdose zwischen KMR-Leitung und Widerlager.

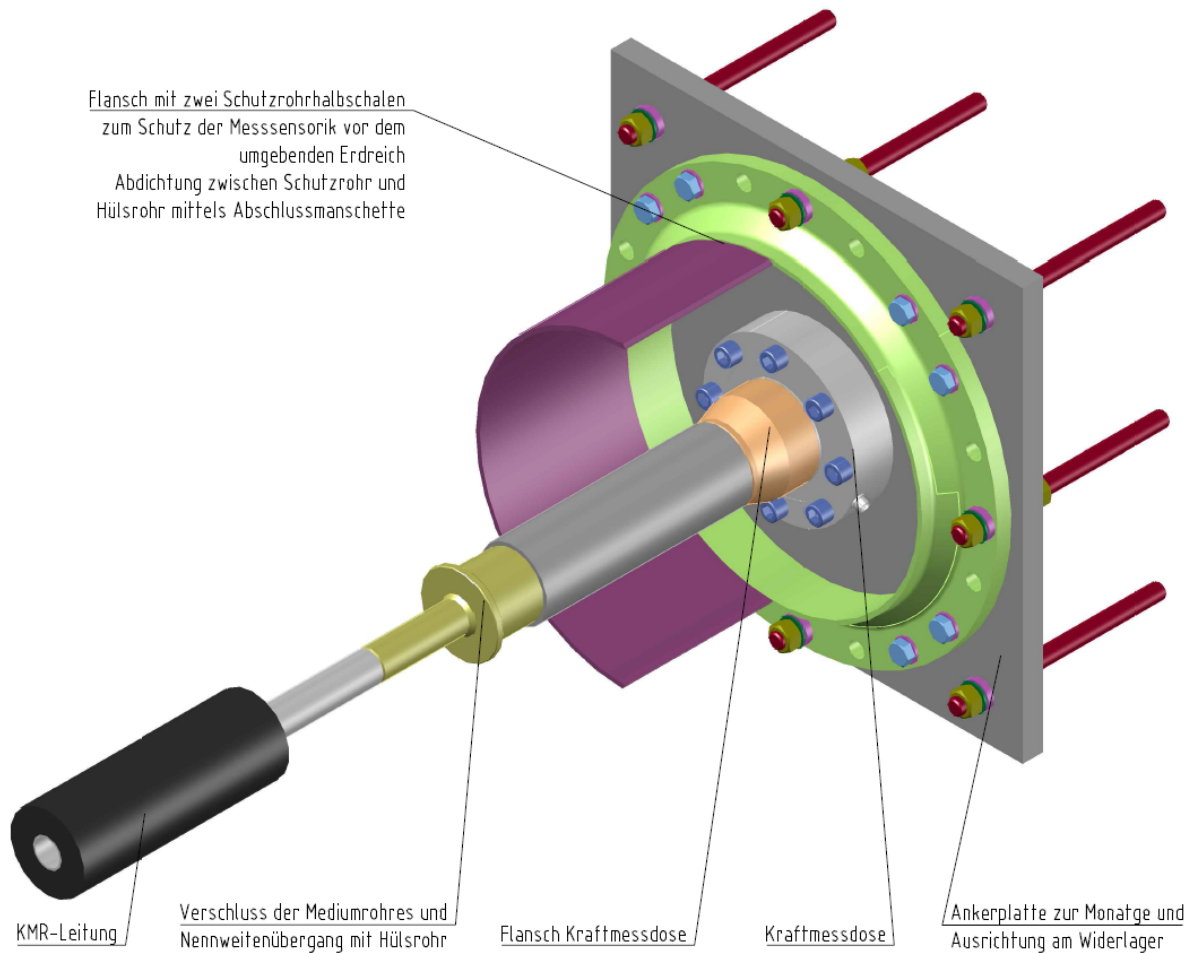


Abbildung 99: Einbindung der Kraftmessdose zwischen KMR-Leitung und Widerlager

Zur Einbindung der Messeinrichtung in das Bestandsnetz der NRM mussten, neben einem Schachtbauwerk, weitere Einzelteile konstruiert werden (siehe Anlage 9- Anlage 12). Für die Trasse einschließlich Baustelleneinrichtung und Verkehrslenkung wurde ein Ausführungsplan erstellt.

Die Abbildung 100 und Abbildung 101 zeigen die Wegaufnehmer im Messschacht sowie die Situation am Festpunkt und Anbindeschacht.

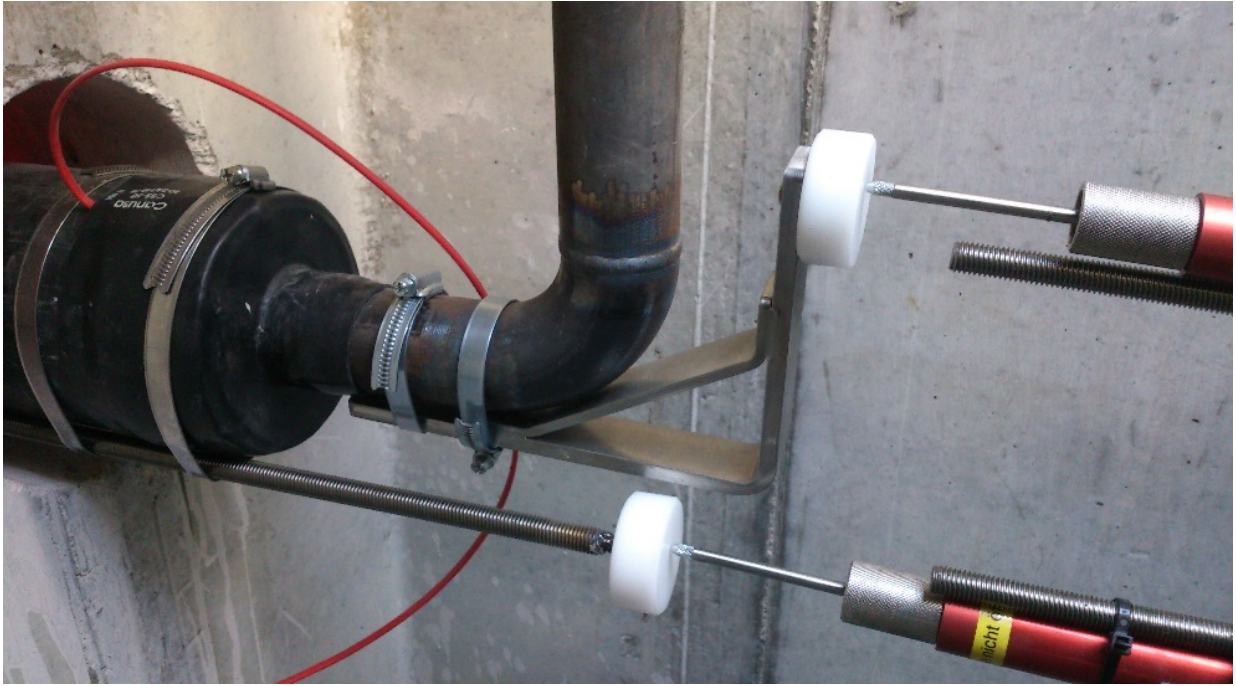


Abbildung 100: Wegaufnehmer Messschacht, (Quelle: GEF)



Abbildung 101: Erdfestpunkt und Anbindeschacht, (Quelle: GEF)

Abbildung 102 und Abbildung 103 zeigen die mit ZFSV zu vergießende Leitung vor und während des Vergusses. Die Leitungszone der zweiten Leitung ist zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits mit Sand verfüllt (unter den Big Packs).





Abbildung 102: Messstrecke vor dem Verguss mit ZFSV (Quelle: AGFW)



Abbildung 103: ZFSV-Verguss im Bereich einer Auftriebssicherung (Quelle: AGFW)

## 4.2 Messkonzept

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben konnten die Planungen zur Messstrecke „Bypassleitung“ im Rahmen des Projektes 2015, im Europavierten in Frankfurt am Main, verwirklicht werden. Ziel war es die Unterschiede zweier, bis auf das Verfüllmaterial in der Leitungszone (einmal bisher üblicher Sand sowie einmal das Produkt C-ST) identischen, unter sonst gleichen Bedingungen geradlinig verlegte KMR-Fernwärmeleitungen (DN 40/  $D_a = 125$  mm) zu erfassen. Dies ist nur durch die Aufnahme konkreter Messgrößen möglich, für die ein individuelles Messkonzept entworfen wurde.

### 4.2.1 Messgrößen, Messtechnik allgemein

Um den Einfluss der Bettung an Leitungsbögen auszuschalten, wurden die Leitungen geradlinig verlegt. An einem Ende münden die Leitungen in einen Messschacht. Mit Eintritt des KMR DN 40 in den **Messschacht** entfällt die Bettung in Sand oder das Produkt C-ST. Die Verbindung zwischen Vor- und Rücklauf wurde so ausgebildet, dass weder eine Behinderung in axialer Richtung noch Biegemomente auf die Rohrenden einwirkten. Am anderen Ende sind die Leitungen an einen künstlichen **Festpunkt** in Form eines Betonfundamentes angeschlossen. Der Festpunkt führt als künstliche Symmetrieachse dazu, dass sich die Leitung mit ihrer ganzen Länge vom Festpunkt ausgehend dehnt. Ohne Festpunkt entsteht eine natürliche Symmetrieachse in der Mitte der Leitung. Von dieser aus dehnt sich die Leitung mit jeweils halber Länge in beide Richtungen. Mit Festpunkt erhält man Messergebnisse für eine größere Leitungslänge. Die Länge der Leitungen beträgt 51,75 m, die Verlegetiefe von der Geländeoberkante bis zur Rohrachse 1,65 m (siehe auch Abbildung 104).

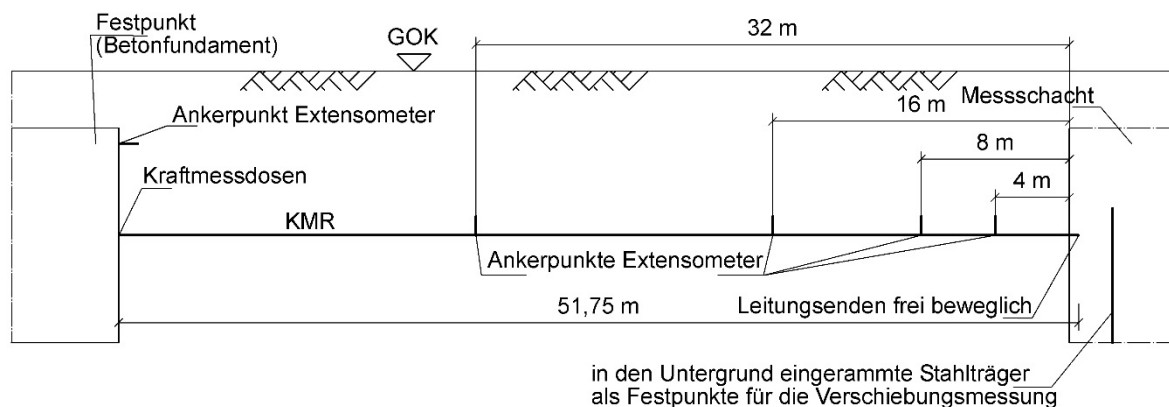


Abbildung 104: Schematischer Längsschnitt der Messstrecke „Bypassleitung“ mit Lage der Extensometer

Im erstmaligen Warmgehen und nachfolgenden Temperaturänderungen des erdbetteten KMR kommt es zur Wechselwirkung zwischen dem KMR und dem umgebenden Verfüllmaterial in der Leitungszone. Die Wechselwirkung behindert die axiale und radiale Temperaturdehnung, was Einfluss auf die axialen und radialen Verschiebungen hat und diese behindert und zu Spannungen im KMR führt.

Die Temperaturänderung des KMR macht nicht an der Außenfläche des PEHD-Mantelrohres halt, sondern erfasst auch das Verfüllmaterial und den umgebenden Boden. **Temperaturänderungen** und die damit gegebenenfalls einhergehenden **Wassergehaltsänderungen** können sich Rückwirkungen auf das KMR ergeben. Neben dem Zustand des KMR muss man daher auch den Zustand des Verfüllmaterials und des umgebenden Bodens mit erfassen. Man hat folgende Messgrößen, für die man geeignete Messtechnik benötigt:

- Bewegungen (axial und radial) / Verschiebungen (axial)
- Kraft
- Temperatur
- Bodenfeuchte

Die weiteren Anforderungen an die Messtechnik lauten:

- bewährt, einfach, robust, langlebig
- geringer Wartungsaufwand
- EDV-gestützte, kontinuierliche Datenerfassung ohne manuelle Messwertablesung

Für die Messgrößen Kraft, Temperatur und Feuchte sind geeignete Standardsensoren sind verfügbar: Für die Kraftmessungen wurden elektronische Kraftmessdosen (KMD System Hottinger siehe Abbildung 105), für die Feuchtemessungen entsprechende elektronische Feuchtesensoren (Trime PICO) und für die Temperatur elektronische Temperatursensoren (Typ PT100) eingebaut.



Abbildung 105: Kraftmessdosen am Festpunkt

Bewegungen und Verschiebungen entlang der Leitung und an den frei beweglichen Leitungsenden im Messschacht zu messen, ist komplexer. Eine Messtechnik, die die obigen Anforderungen erfüllt und aussagekräftige Messergebnisse liefert, sind Extensometer entlang der Leitung mit Linear Variable Differential Transformer (LVDT) an den Extensometerendköpfen und LVDT zum Abgriff der Rohrendverformungen im Messschacht.

Für die konkrete Anwendung bestehen die Extensometer mit LVDT aus einem Ankerpunkt auf dem PEHD-Mantelrohr, einem an dem Ankerpunkt fest angeschlossenen Glasfaserstäbchen in einer Schutzhülle (Abbildung 106) und dem Extensometerkopf im Messschacht (Abbildung 107). Im Extensometerkopf ist das Glasfaserstäbchen an ein LVDT angeschlossen, wobei der Extensometerkopf selbst unverschieblich fixiert ist. Dies erreicht man, indem man ihn an einen lokalen montiert; vorliegend handelt es sich um ausreichend tief in den Untergrund eingerammte Stahlträger. Bewegt sich die Leitung, bewegt sich der montierte Ankerpunkt um das gleiche Maß wie die Leitung an dieser Stelle. Die Glasfaserseele, deren mechanische Dehnungen und Temperaturdehnung vernachlässigbar sind, bewegt sich nahezu reibungsfrei im Schutzrohr um das gleiche Maß, ebenso wie das angeschlossene LVDT, das den Messwert

liefert. Die Extensometer ordnet man punktuell entlang der Leitung an, so dass man die Bewegungen und Verschiebungen an bestimmten Stellen der Leitung erfasst.



Abbildung 106: Ankerpunkt Extensometer am KMR und Glasfaserseele in Schutzhülle



Abbildung 107: Extensometerkopf und Festpunkt im Messschacht

Die Bewegungen und Verschiebungen der frei beweglichen Leitungsenden erfasst man mit **LVDT im Messschacht** (Abbildung 107). Diese sind unverschieblich an den Festpunkt angeschlossen und mit einer ausreichend langen Messspitze versehen. Diese Messspitze stützt sich auf einen Messpunkt am freien Leitungsende ab. Bewegt sich das freie Leitungsende, bewegt sich der Messpunkt und damit die Messspitze um das gleiche Maß. Das LVDT liefert den Messwert.

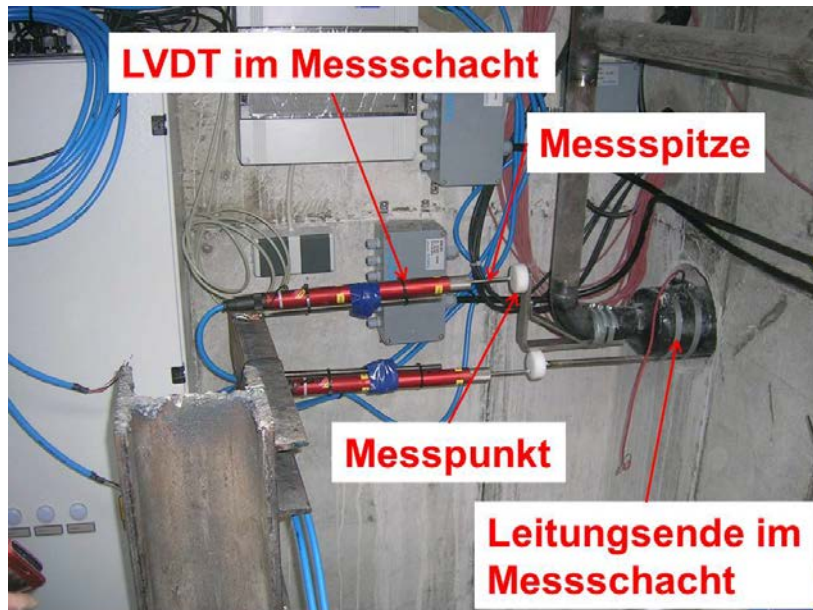


Abbildung 108: LVDT im Messschacht

Es ist bekannt, dass sich KMR auch radial dehnen, wobei deren messtechnische Erfassung am eingegossen KMR schwierig ist. Die OTH.R hat in Zusammenarbeit mit einem namhaften Baumesstechnikerhersteller einen **Radialmesssensor** (Abbildung 109) entwickelt. Man führt ein Drahtseil mehrfach am gewünschten Messort straff um das KMR. Die Glasfaserseele ist mit einem Ende fest an den auf der Leitung sitzenden Messsattel angeschlossen. Das andere Ende der Seele schließt man im Sattel an einen Wegsensor an. Dehnt sich das KMR radial, muss sich die Seele verlängern oder verkürzen. Diese Längenänderungen der Seele erfolgen am Wegsensor, der diese als Messwerte erfasst. Aus diesen errechnet man die radiale Ausdehnung des KMR – Außerrohrdurchmessers  $\Delta D_a$  wie folgt:

$$\Delta D_A = \frac{\Delta u}{n \cdot \pi}$$

Formel 20: Umrechnung der gemessenen Längenänderung in Änderung des Durchmessers.

- |            |   |       |
|------------|---|-------|
| $\Delta u$ | Gemessene Längenänderung des Radialmessensors | [mm]  |
| n          | Anzahl der Wickelungen des Radialmessensors   | [ - ] |



Abbildung 109: Radialmesssensor

## Messquerschnitte

Die Messtechnik ist in 4 Messquerschnitten angeordnet. Jede Leitung ist mit der gleichen Messtechnik ausgestattet.

### Messquerschnitt Festpunkt FP

Der Messquerschnitt Festpunkt FP dient dazu, die Normalkräfte an den in der Nähe des Festpunktes liegenden KMR-Enden zu erfassen. Die Leitungsenden stützen sich über eine Anschlusskonstruktion mit zwischengeschalteten Kraftmessdosen auf den Festpunkt ab. Bewegt sich der Festpunkt, verändern sich die gemessenen Kräfte. Mit Extensometer am Festpunkt lässt sich erfassen, ob sich dieser bewegt.

### Messquerschnitt Radialmesssensoren RS

Im etwa zehn Meter vom Messpunkt in Richtung Messschacht angeordneten Messquerschnitt Radialmesssensoren RS erfassen zwei Radialmesssensoren, ob sich die KMR radial aufweiten oder zusammenziehen.

### Messquerschnitt Feuchtemessung und Temperaturmessung FT

In einem etwa zehn Meter vom Messschacht in Richtung Festpunkt angeordneten Messquerschnitt Feuchtemessung und Temperaturmessung FT erfassen Temperatursensoren und Feuchtesensoren die Temperaturverhältnisse und Feuchteverhältnisse. Abbildung 110 zeigt die Anordnung der Sensoren.

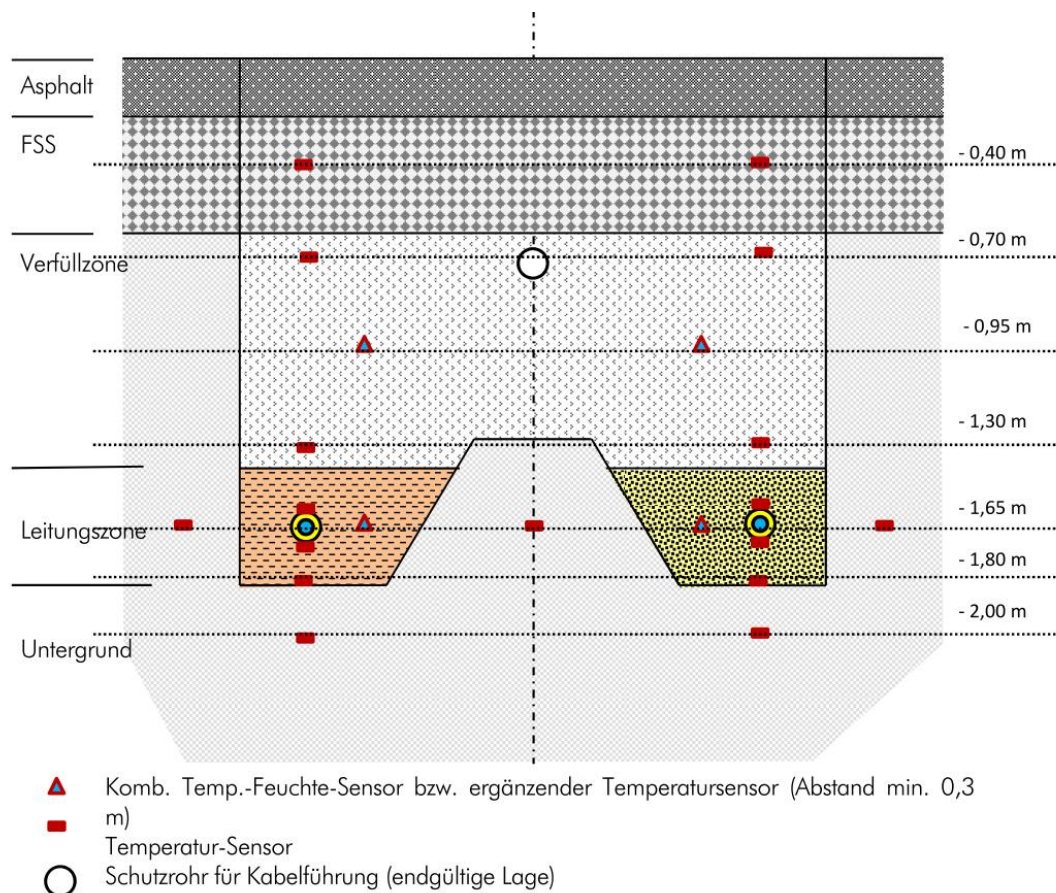


Abbildung 110: Sensoranordnung Messquerschnitt Feuchtemessung und Temperaturmessung FT

### Messquerschnitt Messschacht MS

Im Messquerschnitt Messschacht MS erfassen die LVDT in den Extensometerköpfen und an den freien Leitungsenden im Messschacht punktweise die axialen Bewegungen und Verschiebungen der KMR und des Festpunktes.

Wie in Abbildung 111 zu sehen sind die Extensometer im Abstand von 4 m/ 8 m/ 16 m und 32 m ab der Außenkante des Messschachtes in Richtung des Festpunktes auf dem KMR verankert. Die Extensometer für den Festpunkt sind zentrisch oberhalb der Kraftmessdosen verankert (Abbildung 105). Die Anordnung der LVDT an den Leitungsenden zeigt Abbildung 108.

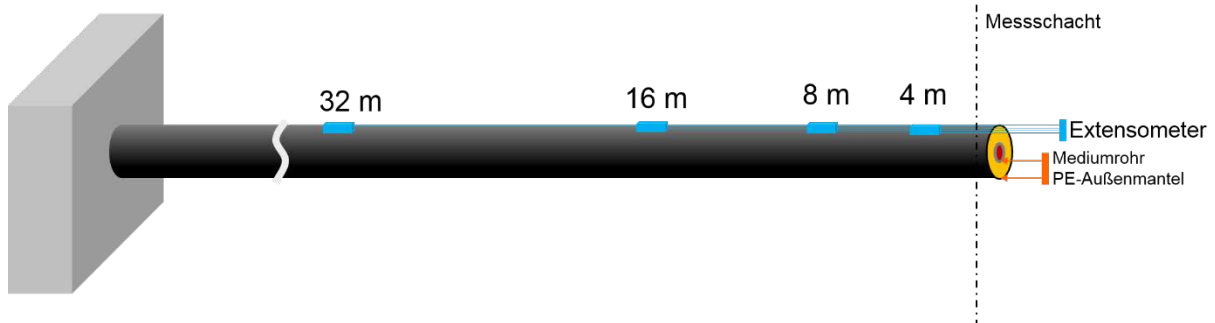


Abbildung 111: Anordnung der Extensometer

### 4.3 Betriebsphasen

Man unterscheidet zwischen dem erstmaligen Warmgehen, nachfolgenden Temperaturänderungen bei gleitender Fahrweise und vollständigem Abfahren von Fernwärmeleitungen. Die nachfolgenden Temperaturänderungen bei gleitender Fahrweise fallen deutlich geringer aus als beim erstmaligen Warmgehen, bei dem eine sehr große Temperaturspreizung auftritt. Das erstmalige Warmgehen ist ein herausgehobener Zustand, der alle weiteren Zustände der Leitung beeinflusst. Weitere herausgehobene Zustände während der Betriebsdauer sind die des vollständigen Abfahrens, bei dem die Leitung vollständig auskühlt. Es treten ebenfalls große Temperaturspreizungen auf.

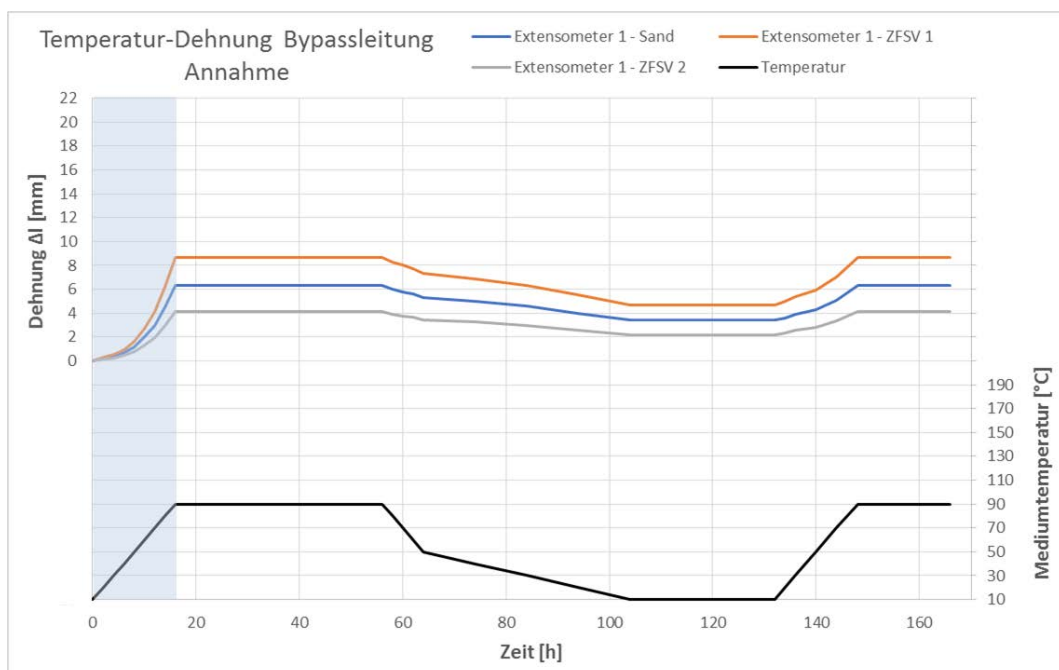


Abbildung 112. Phase 0: Beim Anfahren wird die Leitung mit ca. 5K pro Stunde hochgefahren.

Um dies zu berücksichtigen, existiert ein Betriebsphasenkonzept. Im durchgeführten Forschungsvorhaben stand das erstmalige Warmgehen der Leitungen als Phase 0 im Mittelpunkt, da dies alle weiteren Zustände der Leitung beeinflusst. Die Betriebsphasen erreicht man durch Temperaturänderungen in den Leitungen. Umfangreiche Steuer- und Regelungstechnik stellt sicher, dass diese kontrolliert mit einer durchschnittlichen Temperaturänderungsrate von 5 K/h erfolgen und man ausreichend Messwerte gewinnt. Um das Heizmedium in der Bypassleitung zu erwärmen, ist diese an die Fernwärmeversorgungsleitung im Europaviertel angeschlossen. Die oben genannte Steuer- und Regelungstechnik stellt auch sicher, dass der Betrieb der Bypassleitung unabhängig von der Fahrweise der Fernwärmeversorgungsleitung ist. Lediglich die Temperatur des Heizmediums in der Bypassleitung hängt von der Temperatur des Heizmediums in der Fernwärmeversorgungsleitung ab. Deren Vorlauftemperatur beträgt immer mindestens 90 °C und je nach Außentemperatur bis zu 120 °C. Die dauerhaft sichere Heizmediumtemperatur ist 90 °C. In der Phase 0 sollte das Heizmedium in der Bypassleitung von 14 °C im kalten Befüllzustand auf 90 °C aufgeheizt und bis zum sicheren Abklingen der Leitungsbewegungen beobachtet werden. Die Phase 0 begann am 12.11.2015 gegen etwa 09:00 Uhr. 28 Tage zuvor hatte das ausführende Bauunternehmen die Leitungszone mit dem ZFSV Produkt C-ST beziehungsweise dem Sand verfüllt und anschließend den Graben weiter verfüllt. Bei einer Temperaturänderungsrate von 5 K/h und einer Temperaturänderung von 76 K des Heizmediums von 14 °C auf 90 °C dauerte das erstmalige Warmgehen etwa 15,2 h. Seitdem beträgt die Heizmediumtemperatur in den Grenzen der Steuer- und Regelungstechnik durchschnittlich 90 °C. Seit Beginn der Phase 0 findet die Messdatenerfassung statt.

Daran sollte die Betriebsphase 1' mit einer weiteren Erhöhung der Mediumtemperatur auf 120 °C und nachfolgendem Abfahren anschließen. Wegen des milden Winters 2015/2016 ergab sich kein ausreichend langes Zeitfenster mit einer Heizmediumtemperatur von 120 °C. Die Bypassleitung ließ sich daher dauerhaft sicher nur auf 90 °C aufheizen und in diesem Zustand in der Phase 1 halten.

Aufgrund der zeitlichen Verzögerungen bis zur Inbetriebnahme der Messstrecke und des milden Winters konnten innerhalb der Projektlaufzeit nur die Phase 0 und Phase 1 durchgeführt werden. In Abbildung 112 und Abbildung 113 sind diese Phasen hervorgehoben und die insgesamt erwarteten Messwerte der Extensometer aufgetragen. Die realen Messwerte sind in Abschnitt 4.5 zu finden.



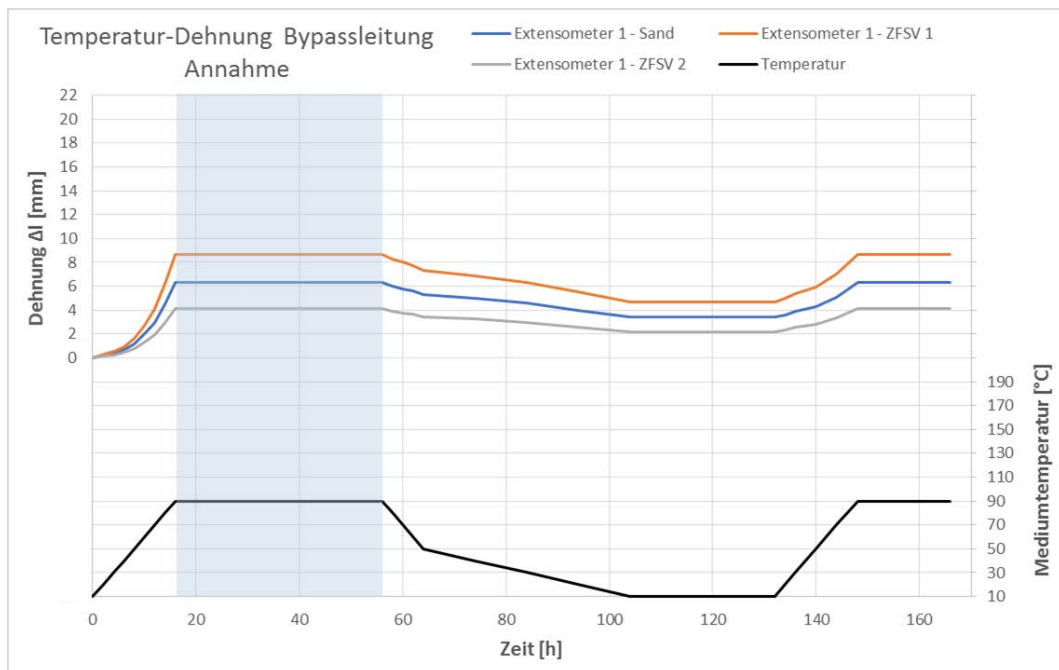


Abbildung 113: Phase 1: Die maximal erreichbare Temperatur wird bis zum vollständigen Abklingen der Leitungsdehnung gehalten

Für weitere Untersuchungen an der Messstrecke wird empfohlen, ggf. durch zusätzliche Maßnahmen, eine Erhöhung der Mediumtemperatur auf 120 °C zu ermöglichen um dadurch ein  $\Delta T$  von 106 K zu ermöglichen.

#### 4.4 Messergebnisse

Abbildung 115 zeigt die Messwerte der Extensometer im Abstand von 4 m zum Messschacht (Abbildung 104) und die Messwerte der LVDT im Messschacht über der Temperaturänderung für beide Verfüllmaterialien. Die Messwerte erfassen die ersten 24 h und damit das erstmalige Warmgehen einschließlich der anschließenden etwa 9 h bei konstanter Temperatur des Heizmediums. Die restlichen Extensometern zeigten innerhalb der Messgenauigkeit keine Verschiebungen.

Die Extensometer sind mit MS\_Sand\_EX-4m und MS\_Prod\_C-ST\_EX\_4m bezeichnet. Die Bezeichnungen der LVDT-Messstellen im Messschacht sind aus Abbildung 114 ersichtlich.

Abbildung 116 zeigt die Messwerte bis zum 03.12.2015 und damit für die ersten 22 d ab dem erstmaligen Warmgehen in halblogarithmischer Darstellung.

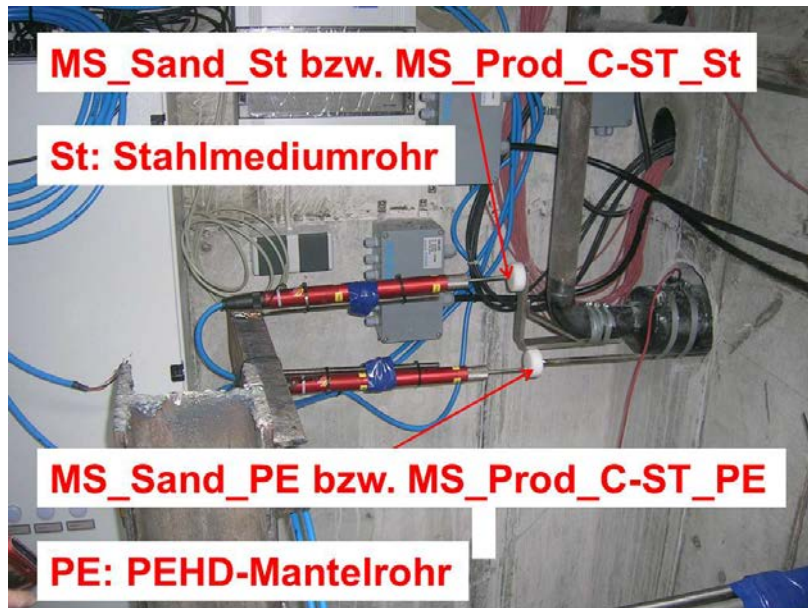


Abbildung 114: Bezeichnung der LVDT-Messstellen im Messschacht

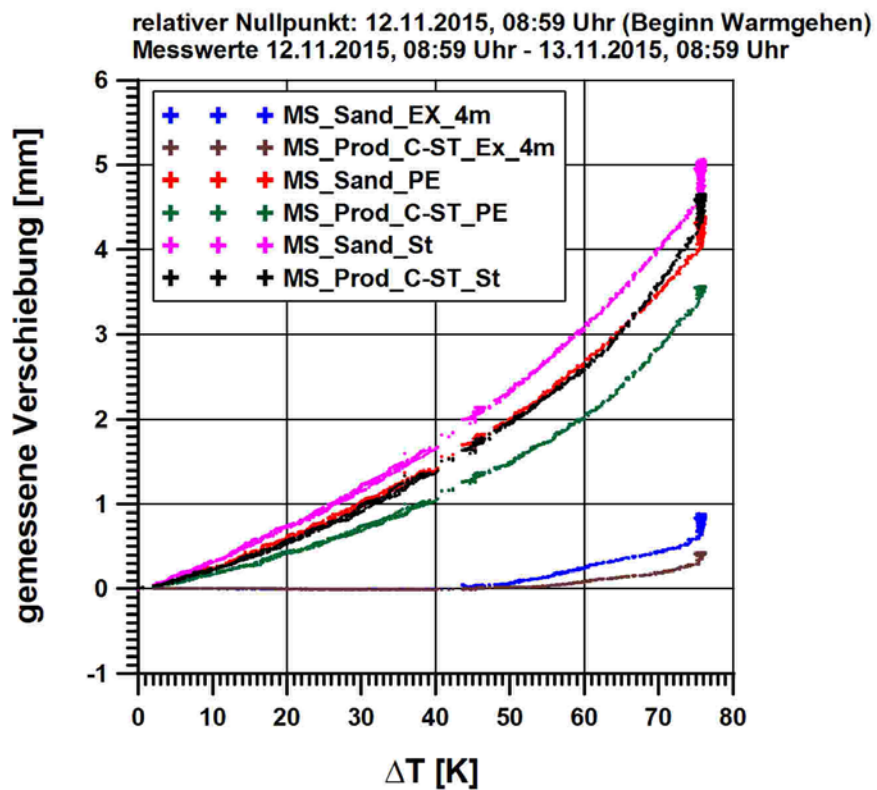


Abbildung 115: Messwerte Extensometer 4 m und LVDT Messschacht für die ersten 24 h

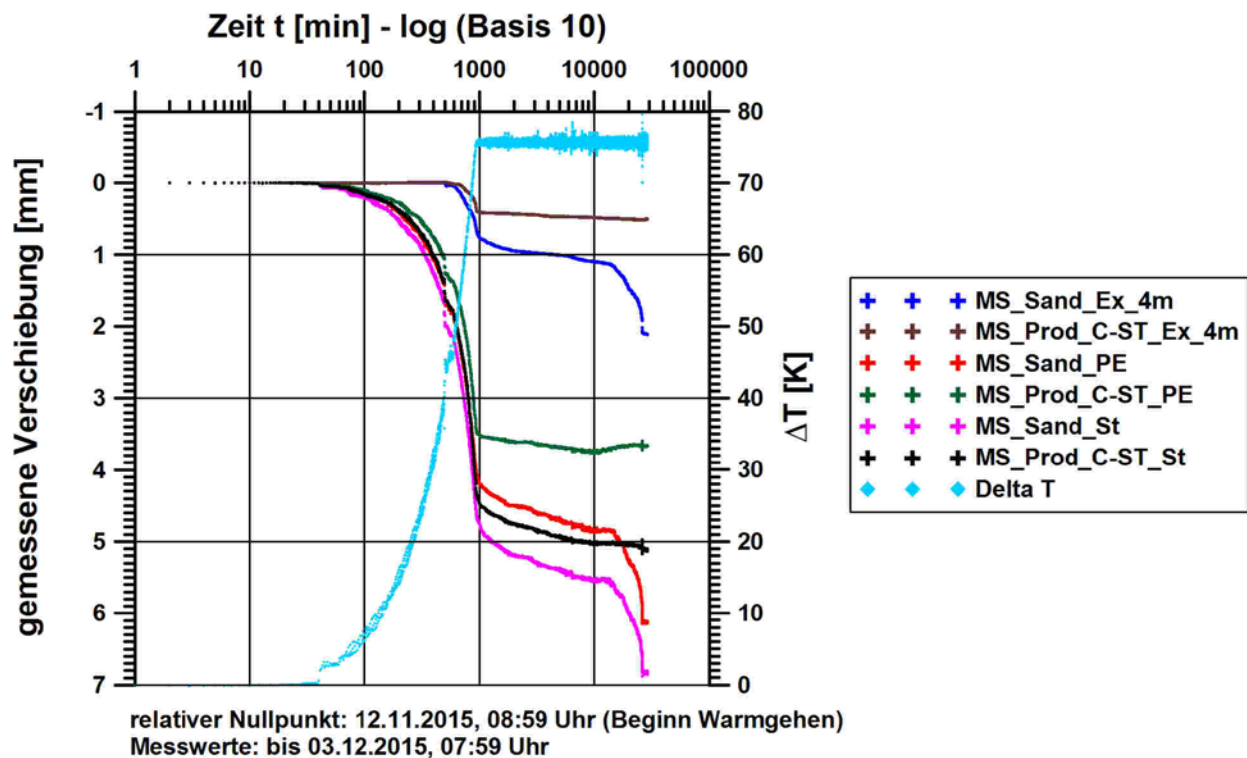


Abbildung 116: Messwerte Extensometer 4 m und LVDT Messschacht für die ersten 22 d

Für die **Erstbelastung** während des **erstmaligen Warmgehens** zeigt Abbildung 73, dass ZFSV gegenüber Sand ein deutliches Mehrarbeitspotential besitzen. Die von der KWAL bestimmte axiale Bettung behindert die thermische Dehnung in ZFSV gebetteter KMR damit stärker als bei in Sand gebetteten KMR. Dadurch verschiebt sich das KMR deutlich weniger, was zumindest für das erstmalige Warmgehen/ Anfahren auf 90°C durch die Messergebnisse bestätigt wird. Die Verschiebungen der Leitungsenden unterscheiden sich bei konstant 90°C im Laufe der Zeit um Faktor 2,38, was auf das Kriechen des KMR in der Sandbettung zurückzuführen ist. Die axiale Bettung durch den ZFSV bleibt im Beobachtungszeitraum aufrechterhalten bzw. konstant; es treten im Verhältnis zum Sand deutlich geringere Kriechverformungen auf. Der ZFSV kann die Temperaturdehnung – zumindest bei der bis dato untersuchten konstanten 90°C Mediumtemperatur - dauerhaft reduzieren.

Für die statische Auslegung von in ZFSV gebetteten KMR sollte das Mehrarbeitspotential z. B. in Form der in Abbildung 72 vorgeschlagene trilineare KWAL berücksichtigt werden, um beim ersten Anfahren/ Warmgehen nicht zu große Verschiebungen zu erwarten. Dadurch ergibt sich ein erster Verschiebungsverlauf und Normalkraftverlauf entlang der Leitung als erster Ausgangszustand.

In Tabelle 27 sind ausgewählte rechnerische und gemessene Werte der Verschiebung am Leitungsende zusammengestellt.

Tabelle 27: Ausgewählte rechnerische und gemessene Werte der Verschiebung am Leitungsende bei  $\Delta T = 76 \text{ K}$ . Mit MS-Sand ST sind die Messergebnisse des Stahlinnerohrs im Messschacht bezeichnet.

Randbedingungen	Verschiebung [mm]
Verschiebung $\Delta l$ des Leitungsendes bei unbehinderter Temperaturdehnung, Leitungslänge $l = 51,75 \text{ m}$ $\alpha_T = 0,0000115 [1/\text{K}]$	45,2
rechnerische Verschiebung für Sand bei behinderter Temperaturdehnung, Messstelle MS_Sand_St, berechnet nach FW 401	10,7
gemessene Verschiebung für Sand, Messstelle MS_Sand_St am 13.11.2015, unmittelbar nach dem erstmaligen Warmgehen	4,5
gemessene Verschiebung für Sand, Messstelle MS_Sand_St am 14.07.2016, 245 Tage nach dem erstmaligen Warmgehen	10,0
gemessene Verschiebung für Produkt C-ST, Messstelle MS_Prod_C-ST_St am 13.11.2015, unmittelbar nach dem erstmaligen Warmgehen	4,2
gemessene Verschiebung für Produkt C-ST, Messstelle MS_Prod_C-ST_St am 14.07.2016, 245 Tage nach dem erstmaligen Warmgehen	5,6

$$\Delta l = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l$$

Formel 21: Berechnung der unbehinderten Temperaturdehnung

$\Delta l$	Verschiebung des Leitungsendes bei unbehinderter Temperaturdehnung	[m]
$l$	Leitungslänge	[m]
$\alpha_T$	Wärmeausdehnungskoeffizient Stahl	[1/K]

In Tabelle 28 sind ausgewählte rechnerische und gemessene Werte der Normalkraft im Stahlmediumrohr am Festpunkt zusammengestellt.

Tabelle 28: Ausgewählte rechnerische und gemessene Werte der Normalkraft im Stahlmediumrohr am Festpunkt

Randbedingungen	Normalkraft [kN]
rechnerische Normalkraft $N$ bei vollständiger Behinderung der Temperaturdehnung, $E = 210.000.000,0 [\text{kN}/\text{m}^2]$ , $A_s = 0,000.373.284 [\text{m}^2]$	68,5
gemessene Normalkraft $N$ für Sand am Festpunkt am 13.11.2015, unmittelbar nach dem erstmaligen Warmgehen	66
gemessene Normalkraft $N$ für Sand am Festpunkt am 14.07.2016, 245 Tage nach dem erstmaligen Warmgehen	59
gemessene Normalkraft $N$ für Produkt C-ST am Festpunkt am 13.11.2015, unmittelbar nach dem erstmaligen Warmgehen	68
gemessene Normalkraft $N$ für Produkt C-ST am Festpunkt am 14.07.2016, 245 Tage nach dem erstmaligen Warmgehen	56

$$N = -E \cdot A_s \cdot \alpha_T \cdot \Delta T$$

Formel 22: Berechnung der Normalkraft im Stahlmediumrohr

$N$	Normalkraft im Stahlmediumrohr	[kN]
$E$	Elastizitätsmodul Stahl	[kN/m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Querschnittsfläche Stahlmediumrohr	[m <sup>2</sup> ]

Im Mittelpunkt des Interesses stehen:

- Der Vergleich der rechnerischen Verschiebungen bei unbehinderter Temperaturdehnung zu den gemessenen Verschiebungen bei behinderter Temperaturdehnung.
- Der Vergleich der rechnerischen Verschiebungen für Sand nach (AGFW Arbeitsblatt FW 401) zu den gemessenen Verschiebungen.
- Der Vergleich der gemessenen Verschiebungen in den beiden Verfüllmaterialien.
- Der Vergleich der rechnerischen Kraft am Festpunkt für volle Behinderung der Temperaturdehnung zu den gemessenen Kräften am Messpunkt.

Es lassen sich folgende Ergebnisse anhand der Abbildung 115, der Abbildung 116, der Tabelle 27 und der Tabelle 28 festhalten:

- Tabelle 27 zeigt, wie die axiale Bettung verhindert, dass sich die Leitungsenden frei verschieben. Durch die axiale Bettung verschieben sich die Leitungsenden je nach Betrachtungszeitpunkt nur zwischen 9,3 % und 22,1 % der freien Verschiebung: Die axiale Bettung wirkt.
- Rechnet man für **Sand** nach (AGFW Arbeitsblatt FW 401), müsste sich das Leitungsende zunächst deutlich mehr verschieben, als die Messergebnisse tatsächlich zeigen. Erst im Laufe der Zeit verschiebt sich das Leitungsende um das Maß, das man errechnet hat; das Rohr kriecht unter der konstanten sekundären Einwirkung Temperatur; über die Zeit gemittelt, kriecht das Rohr mit etwa konstanter Geschwindigkeit für etwa 105 Tage/bis zum 25.02.2016. Danach hat es sich insgesamt nahezu um die in Tabelle 27 angegebenen 10 mm verschoben. Abbildung 116 zeigt, dass der Kriechvorgang unmittelbar einsetzt, nachdem Abbildung 115 das erstmalige Warmgehen beendet ist.
- Das Leitungsende des im **ZFSV** (Produkt C-ST) gebetteten KMR verschiebt sich weniger als das Leitungsende des im Sand gebetteten KMR. Die gilt auch für die Verschiebungen an den weiteren Messstellen, wie Abbildung 115 zeigt. Das im Produkt C-ST gebettete Rohr kriecht, anders als das im Sand gebettete Rohr, kaum, weswegen der Unterschied in den Verschiebungen am freien Leitungsende mit der Zeit zunimmt. Nach 245 Tagen unterschieden sich diese etwa um den Faktor 2,38.
- Die unmittelbar nach dem erstmaligen Warmgehen gemessenen Normalkräfte in den Stahlmediumrohren und die Normalkraft, die sich rechnerisch ergibt, wenn die freie Temperaturdehnung vollständig behindert ist, stimmen sehr gut überein. Der Festpunkt erfüllt seine Aufgabe. Im Messzeitraum bis zum 14.07.2016 zeigen die Normalkräfte in beiden Stahlmediumrohren Schwankungen. Schließlich treten die in Tabelle 28 angegebenen Normalkräfte auf, die bis zu 18 % unter der rechnerischen Normalkraft liegen. Dabei muss man beachten, dass bereits geringste Bewegungen des Festpunktes die Messwerte an den Kraftmessdosen verändern. Schwindet der Beton oder dehnt er sich thermisch, wenn sich die Bodentemperatur ändert, kann dies bereits Bewegungen auslösen, die die Messwerte beeinflussen. Man sollte es daher nicht überbewerten, dass die Messwerte im beobachteten Größenbereich schwanken und abfallen.
- Abbildung 115 zeigt, dass sich bereits etwa 4 m vom freien Leitungsende aus Richtung Festpunkt (MS\_Sand\_EX-4m und MS\_Prod\_C-ST\_EX\_4m) die Leitungen deutlich geringer und erst verschieben, nachdem sich die Temperatur um etwa 43 K geändert hat. Gegenüber dem sich nach AGFW Regelwerk ergebenden Gleitbereich sind die tatsächlichen aufgetretenen Gleitbereiche geringer, wie sich aus den gemessenen

Verschiebungen ableiten lässt. Die Bewegungen der Leitungen sind damit über eine größere Leitungslänge komplett behindert.

## **4.5 Interpretation der Messergebnisse für die statische Auslegung von KMR**

### **4.5.1 Nomenklatur**

Es bestand relativ schnell Übereinstimmung innerhalb der Projektbeteiligten, dass es sich bei den komplexen Phänomenen bezüglich der Dehnungsbehinderung in der Kontaktfläche zwischen ZFSV und PEHD-Mantel nicht nur um Reibung handelt. Bodenmechanisch korrekt wäre wahrscheinlich der Begriff „Scherfestigkeitsspannung in axialer Richtung“. Der Begriff der Scherfestigkeit ist aber in der Fernwärme bereits für die Beanspruchung des PUR-Hartschaumstoffs innerhalb des KMR vergeben. Wenn wir denselben Begriff nun auch für die Kontaktspannungen zwischen ZFSV und PEHD-Mantel verwenden würden, würde dies bei Fernwärmebetreibern zu Verwirrungen führen. Die Dehnungsbehinderung kann sich in der Kontaktfläche ZFSV/ PEHD-Mantel aus Adhäsion, Kohäsion und Reibung zusammensetzen. Innerhalb der Projektbeteiligten hat man sich darauf verständigt, dieses Phänomen als „Dehnungsbehinderung“ oder „Dehnungswiderstand“ zu bezeichnen.

### **4.5.2 Versuchstemperaturen**

Die Leitung wurde am 12.11.2015 mit einem Temperaturgradienten von 5 K/h auf 90 °C hochgefahren. Die Einbautemperatur betrug 14,1 °C. Aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen im vorgelagerten Fernwärmenetz konnten bis zum Abschluss des Forschungsvorhabens keine höheren Temperaturen gefahren werden. Es ist geplant, die Betriebstemperatur der Versuchsstrecke mit Hilfe eines Durchlauferhitzers auf 140 °C anzuheben und diese Temperatur 100 Tage lang im Dauerbetrieb zu fahren.

### **4.5.3 Verschiebungsmessungen**

Ausgewertet werden die Messergebnisse der Versuchsstrecke bis zum Laufzeitende des Projektes (30.06.2016). In Abbildung 117 werden die Messwerte der Extensometer 4 m vor dem Eintritt in den Messschacht (S-MS-W-EX-4-PE: Sand, gelbe Linie und F-MS-W-EX-4-PE: ZFSV, grüne Linie) sowie die Messwerte der Wegaufnehmer am Mediumrohr im Messschacht (S-MS-W-MER-ROS-FRE: Sand, rote Linie und F-MS-W-MER-ROS-FRE: ZFSV, blaue Linie) dargestellt. Zu Vergleichszwecken sind strichliert die rechnerisch in der Auslegung erwarteten Verschiebungen in Sandbettung für beide Orte aufgetragen. 4 m vor dem Messschacht sind nach AGFW FW 401 6,8 mm zu erwarten (gelbe strichlierte Linie). Nach EN 13941 sind an diesem Ort 7,0 mm und nach modifiziertem ASME-Code 5,9 mm zu erwarten. Am Ort des Wegaufnehmers im Messschacht beträgt die rechnerisch in der Auslegung in Sandbettung erwartete Verschiebung 10,7 mm (rote strichlierte Linie). ①, ②, ③ und ④ sind Punkte auf der Zeitskala, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

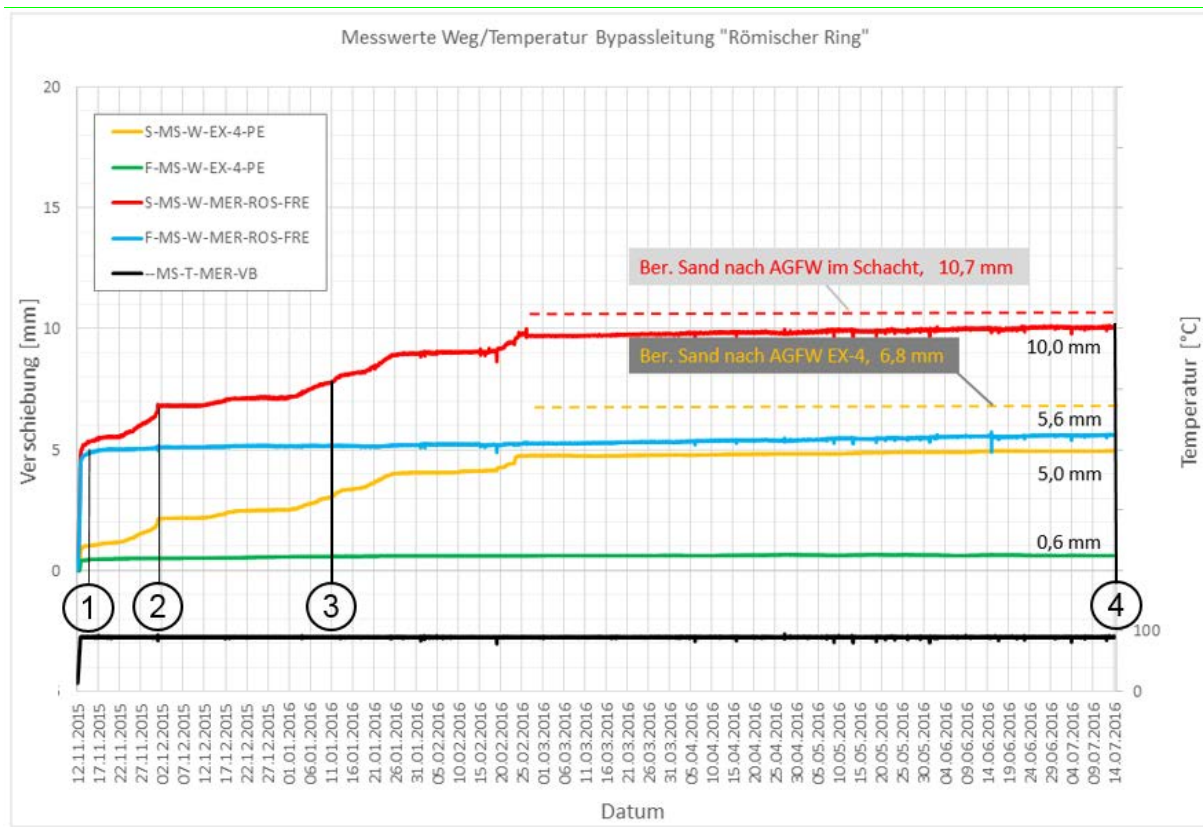


Abbildung 117: Maßgebliche Verschiebungen

Bei der Sandbettung ist ein langsames Kriechen in Richtung der berechneten Verschiebungen zu beobachten, das auch nach mehr als 6 Monaten Halten der Temperatur von 90 °C noch nicht abgeschlossen ist. Auch bei der in ZFSV gebetteten Leitung ist dieses Kriechen am Leitungsende feststellbar (blaue Linie), wenngleich auch in wesentlich geringerem Umfang als bei Sand. Alle Verschiebungen, somit auch die Kriechverschiebungen, sind am Leitungsende am größten. Die Kriechverschiebungen der in ZFSV gebetteten Leitung haben den Messpunkt 4 m vor dem Schacht bisher noch nicht erreicht. Dort verharrt die Verschiebung seit mehr als 6 Monaten bei 0,6 mm (grüne Linie).

Es wird deutlich, dass die zur Zeit geltenden Berechnungsverfahren die Berechnung eines Auslegungszustandes (Endzustandes) erlauben, aber nicht in der Lage sind, die komplexen und instationären Zustände beim ersten Anfahren einer erdverlegten KMR-Leitung zu beschreiben.

In Tabelle 29 sind die gemessenen Verschiebungen 4 m vor Eintritt in den Messschacht zu den Zeitpunkten 1 bis 4 ausgelesen und mit den Auslegungswerten der Regelwerke

- (AGFW Arbeitsblatt FW 401)
- (DIN EN 13941:2010-12)
- mod. ASME

verglichen.

Tabelle 29: Gemessene und berechnete Verschiebungen bei  $T_{\text{Mediumrohr}}=90^{\circ}\text{C}$ , 4 m vor Messschacht

Zeitpunkt	Bemerkung	Gemessene Verschiebung [mm]		Berechnete Verschiebung [mm]		
		Sand	ZFSV	FW 401	EN 13941	Mod. ASME
1	Anfahren von 14,1°C auf 90°C	0,9	0,4	6,8	7,0	5,9
2	Halten bei 90°C	2,2	0,5	6,8	7,0	5,9
3	Halten bei 90°C	3,6	0,6	6,8	7,0	5,9
4	Halten bei 90°C	5,0	0,6	6,8	7,0	5,9

Die Verschiebung der sandgebetteten Leitung nähert sich am Wegaufnehmer im Messschacht (rote Linie) asymptotisch dem berechneten Wert. An der Messstelle 4 m vor dem Messschacht ist sie vom 25.02.2016 bis 30.06.2016 lediglich von 4,9 mm auf 5,0 mm angestiegen. Rechnerisch erwartet werden an dieser Stelle 6,8 mm.

Die Dehnungsbehinderung in ZFSV-Bettung ist bei der Ersterwärmung von ca. 14 °C auf 90 °C wesentlich höher als in Sandbettung.

#### 4.5.4 Resultierende PUR-Scherspannung

Die im PUR-Hartschaumstoff wirkende Scherspannung ist nicht direkt messbar, sondern wird aus der wirkenden Dehnungsbehinderung berechnet. In ZFSV-Bettung wird die Dehnung im Westlichen durch Adhäsion behindert, in Sandbettung durch Reibung. Erfahrungen zeigen, dass die resultierenden PUR-Scherspannungen im KMR bei fachgerechter Auslegung/Rezeptur im langjährigen Betrieb sowohl in Sand- als auch in ZFSV-Bettung unterhalb des zulässigen Langzeitwertes von 0,04 MPa liegen.

Beim ersten Anfahren einer Leitung lässt sich aber die Dehnungsbehinderung nicht über ein elastisches Materialgesetz beschreiben. Hier treten in den ersten Tagen und Wochen wesentlich höhere Dehnungsbehinderungen auf, die dann im Laufe der Zeit auf ein stationäres Niveau absinken.

Für die Punkte ① bis ④ wurde nun die Dehnungsbehinderung solange gesteigert, bis sich die geringen gemessenen Verschiebungen rechnerisch ergaben. Dazu wurde im Programm **sisKMR** die Überdeckungshöhe iterativ erhöht. Sobald die gemessenen Verschiebungen mit der angesetzten Dehnungsbehinderung erreicht wurden, wurden die zugehörigen, resultierenden PUR-Scherspannungen erfasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Resultierende PUR-Scherspannungen

Gemessene Verschiebung am Extensometer 4m vom Messschacht entfernt				
Bettung	Zeitpunkt 1	Zeitpunkt 2	Zeitpunkt 3	Zeitpunkt 4
Sand	0,9 mm	2,2 mm	3,6 mm	5,0 mm
ZFSV	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,6 mm
Resultierende PUR Scherspannung				
Bettung	Zeitpunkt 1	Zeitpunkt 2	Zeitpunkt 3	Zeitpunkt 4
Sand	0,076 MPa	0,049 MPa	0,036 MPa	0,029 MPa
ZFSV	0,108 MPa	0,12 MPa	0,085 MPa	0,085 MPa



Die durch die verstärkte Dehnungsbehinderung beim ersten Anfahren der Leitung auf 90 °C (Punkt 1) auftretenden Scherspannungen im PUR-Schaum betragen bei der sandgebetteten Leitung 0,076 MPa. Die derzeit gültigen Berechnungsvorschriften liefern keinen vergleichbaren, zulässigen Kurzzeitwert für 90 °C. Der Kurzzeitwert nach DIN EN 253 beträgt für 20 °C 0,12 MPa und für 140 °C 0,08 MPa. Eine Interpolation für Zwischentemperaturen sehen die Berechnungsvorschriften nicht vor. Würde man linear interpolieren – was nicht gerechtfertigt ist –, so würde man auf einen fiktiven „zulässigen Kurzzeitwert“ von 0,097 MPa kommen. Dieser fiktive zulässige Kurzzeitwert wurde beim Anfahren der sandgebetteten Leitung nicht überschritten. Beim Kriechen der sandgebetteten Leitung in Richtung berechneter Endverschiebung nimmt die resultierende PUR-Scherspannung weiter ab und liegt ab Punkt 3 unter dem zulässigen Langzeitwert von 0,04 MPa.

Bei der in ZFSV gebetteten KMR-Leitung wird der fiktive zulässige Kurzzeitwert von 0,097 MPa kurzzeitig mit einer resultierenden PUR-Scherspannung von 0,108 MPa überschritten. Diese verringert sich jedoch mit dem minimalen Kriechen der Endverschiebung im ZFSV auf den derzeit gehaltenen Wert 0,085 MPa, welcher unterhalb des fiktiven zulässigen Kurzzeitwertes liegt, jedoch den zulässigen Langzeitwert nach (AGFW Arbeitsblatt FW 401) von 0,04 MPa überschreitet.

#### **4.5.5 Bezug zum GEF-Forschungsvorhaben "Qualitätssicherung zukünftiger Kunststoffmantelrohre"**

Innerhalb des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Kennzeichen 03ET1080 A-C geförderten Forschungsvorhabens "Qualitätssicherung für zukünftige Kunststoffmantelrohrsysteme in der Fernwärmeversorgung" (Thieme et al. 2016) fand in Teilprojekt 1 die bisher größte Untersuchung zum Alterungsverhalten von KMR statt.

In diesem Gemeinschaftsvorhaben der gesamten Fernwärmebranche wurden unter Beteiligung des AGFW sowie aller wesentlichen PUR-Schaumstoffhersteller, KMR-Hersteller und zahlreicher erfahrener Fernwärmeversorgungsgesellschaften wurden Alterungsprüfungen an 188 KMR-Rohrstangen mit einer Gesamtlänge von 1.128 m durchgeführt. Dabei wurden folgende, grundsätzliche Erkenntnisse zur Scherfestigkeit der KMR gewonnen, die auch für die Beanspruchung in ZFSV-Bettung von Bedeutung sind:

- Die Scherfestigkeit wird bereits nach kurzer Alterungsdauer abgemindert. Dieser Festigkeitsverlust verändert sich im weiteren Alterungsprozess zunächst nicht wesentlich, es existiert ein Plateaubereich. Die Dauer der Alterungsphase 1 „Plateau“ und dessen Niveau hängt wesentlich von der Alterungstemperatur und der Sauerstoffbelastung des Schaumstoffkernes der KMR ab. Danach ergibt sich ein weiterer Festigkeitsverlust, der dann relativ schnell zum Erreichen des Alterungskriterium  $\tau/\tau_0 = 0,25$  und danach zum vollständigen Versagen des Haftverbundes führt (s. Abbildung 118).

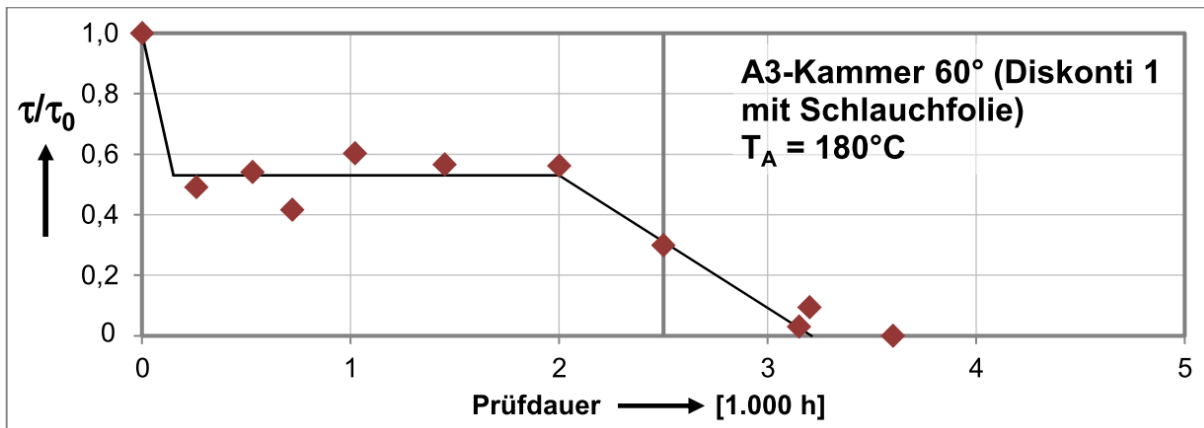


Abbildung 118: Typischer Verlauf einer zeitraffenden Alterung (Thieme et al. 2016)

- Die Höhe des Plateaubereiches  $\tau/\tau_0$  nimmt im Alterungstemperaturbereich von 110 bis ca. 160 °C stetig von etwa 0,9 bis 0,6 ab. Im Bereich der Alterungstemperaturen 160 bis 190 °C ergibt sich für die Abminderung der Scherfestigkeit dagegen ein „konstantes“ Niveau von ca. 50 % der Ausgangsfestigkeit (s. Abbildung 119). Das Alterungsverhalten der verschiedenen KMR-Varianten in der Alterungsphase 1 unterscheidet sich nicht grundsätzlich, auch zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Intensivierung der Oxidationsbelastung. Lediglich bei der Variante A3 ergibt sich die Abminderung der Scherfestigkeit auf etwa **50 % der Ausgangsfestigkeit** bereits ab einer Alterungstemperatur von ca. 130 °C.

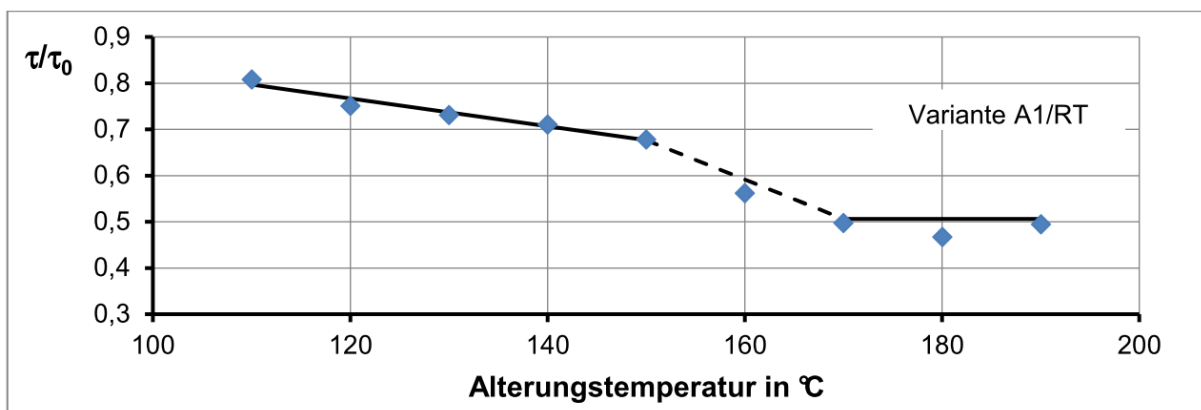


Abbildung 119: Plateauniveau in Abhängigkeit der Alterungstemperatur, (Thieme et al. 2016)

Die Ausgangsscherfestigkeit  $\tau_0$  wurde an rd. 900 Rohrproben ermittelt. Der Maximalwert liegt bei 0,60 MPa, der Minimalwert beträgt 0,12 MPa. **Der kleinste Mittelwert einer 6 m langen Rohrstanze beträgt 0,217 MPa.**

Überträgt man diese aktuellen Erkenntnisse nun auf die erhöhte Dehnungsbehinderung der KMR beim ersten Anfahren in ZFSV, so kann man die im vorherigen Abschnitt durch lineare Interpolation zweier Normwerte gebildete „fiktive zulässige Kurzzeitscherfestigkeit“ durch eine „experimentell abgesicherte Kurzzeitscherfestigkeit“ ersetzen, die sich folgender, konservativer Abschätzung ergibt:

Es wurde unterstellt, dass nicht die minimale Ausgangsscherfestigkeit innerhalb einer Rohrstange, sondern die mittlere Ausgangsscherfestigkeit einer Rohrstange das maßgebende Versagenskriterium ist, denn man kann als These davon ausgehen, dass die Abschnitte mit höherer Festigkeit eine „Stützwirkung“ auf die Rohrabschnitte mit geringerer Festigkeit ausüben werden. Somit liegen wir auf der sicheren Seite, wenn wir aus diesem breit angelegten Untersuchungsprogramm eine „experimentell abgesicherte Kurzzeitscherfestigkeit  $\tau_{zul}$ “ bei 130 °C von 50 % von 0,217 MPa = 0,11 MPa ableiten.

„Experimentell abgesicherte Kurzzeitscherfestigkeit“ bei 130 °C:  $\tau_{zul} = 0,11$  MPa.

Die resultierende PUR-Scherspannung beim ersten Anfahren (vgl. Tabelle 24) lag mit 0,108 MPa unter der experimentell abgesicherte Kurzzeitscherfestigkeit  $\tau_{zul}$  bei 130 °C. Zudem betrug die Temperatur in dieser Versuchsphase lediglich 90 °C.

#### 4.5.6 Auswirkungen auf die KMR-Statik

Entscheidend für die sichere rohrstatische Auslegung von KMR ist, dass langfristig ein minimaler Dehnungswiderstand gewährleistet ist, der auch nach beliebig vielen Lastwechseln nicht unterschritten wird. Für diesen minimalen Dehnungswiderstand müssen alle Kompensationselemente dimensioniert werden.

Höhere Dehnungswiderstände, wie sie beim ersten Anfahren in Sand und in ZFSV auftreten, sind für die langzeitige Auslegung der KMR irrelevant, sie müssen aber als PUR-Scherspannungen vom Kunststoff-**Verbund**mantelrohr ertragen werden können.

Solche kurzfristig auftretenden, hohen Dehnungsbehinderungen „dehnen einfach heraus“, wenn sie nicht mehr wirken.

#### 4.6 Abgleich mit den Ergebnissen aus Schmitt et al. a.

Im Unterabschnitt 2.2 sind die aus Sicht dieses Forschungsvorhabens wichtigsten Ergebnisse eines Forschungsvorhabens, das sich ebenfalls mit ZFSV beschäftigt, zusammengefasst. Es handelt sich um (Schmitt et al. 2014). Die Forschungsvorhaben unterscheiden sich wie folgt: (Schmitt et al. 2014) zeigen stichpunktartig auf, dass ZFSV grundsätzlich technisch und wirtschaftlich für den Fernwärmeleitungsbau geeignet sind.

Das hier dokumentierte Forschungsvorhaben vertieft zunächst die Aspekte des Einsatzes von ZFSV beim Fernwärmeleitungsbau, erweitert diese anschließend und geht insbesondere mit systematischen Untersuchungen im Labor und Feld sowie daraus abgeleiteten Ergebnissen weit darüber hinaus. Dies geschieht mittels konkreter mechanischer und kontaktmechanischer Untersuchungen an und mit bundesweit verfügbaren ZFSV. Weiterhin mittels eines Feldversuches mit direktem Vergleich zwischen Sand und ZFSV. Insgesamt erweitert diesen Forschungsvorhaben den konkreten Erkenntnisstand zum Materialverhalten, Materialkontaktverhalten und zu den Auswirkungen auf die Rohrstatik und das Verschiebungsverhalten der Leitungen. Gleicht man die Ergebnisse ab, erhält man:

- Das hier dokumentierte Forschungsvorhaben bestätigt, dass es möglich und sinnvoll ist, KMR in ZFSV zu verlegen. Die ZFSV umhüllen das KMR dabei vollständig.
- Bettet man KMR in ZFSV, treten größere tangentielle Reaktionsschubspannungen auf, als bei Sand. Es handelt sich jedoch nicht um rein reibungsbedingte Reaktionsspannungen oder, wenn man diese in Umfangsrichtung aufintegriert, reibungsbedingte Reaktionskräfte. Ein Teil der Reaktionsschubspannungen ist durch

Adhäsion bedingt. Erst nach dem Überwinden der Adhäsion danach treten reibungsbedingte Reaktionsspannungen auf.

- Die Verfasser erachten es als nicht notwendig, bei ZFSV-Bettung höhere Sicherheiten als bei Sand-Verfüllung vorzusehen. Voraussetzung dafür ist der Einsatz geeigneter ZFSV, deren Eignung in sog. Eignungsprüfungen festgestellt wird, ein ordnungsgemäßer Planung und insbesondere Ausführung.

Es ist zutreffend, dass die statische Auslegung mit den gebräuchlichen Berechnungsmodellen prinzipiell im Sinne einer unteren und oberen Grenzwertbetrachtung möglich ist, weil ZFSV wie Sand zu einer behinderten Temperaturdehnung führen und die Temperaturdehnung nicht sofort vollständig oder gar nicht behindern. Für genauere Betrachtungen und Berechnungen wird empfohlen, die gebräuchlichen Berechnungsmodelle so anzupassen, dass sie das Mehrarbeitspotential der KWAL von ZFSV zutreffend berücksichtigen. Details hierzu finden sich in Abschnitt 4.5.

## **5 Vorgaben für die Ausführungstechnik**

Zielsetzung war es, aus den Ergebnissen der Versuchsreihen Vorgaben für die Ausführungstechnik abzuleiten. Dabei sollte es um die erforderlichen Abbindezeiten und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Bauablauf sowie die technischen Grundvoraussetzungen für das Einbringverfahren gehen. Hierbei wurde eine möglichst vollständige Verfüllung des Grabens mit ZFSV über die Leitungszone hinaus angestrebt.

### **5.1 Erarbeitung der Vorgaben**

ZFSV im erdverlegten Rohrleitungsbau werden derzeit bei warmgehenden Leitungen überwiegend dort eingesetzt, wo die örtlichen Gegebenheiten ein gleichmäßiges und den Vorgaben entsprechendes Verdichten der Sandbettung nicht möglich ist. Dies sind beispielsweise Bereiche mit einer sehr hohen Dichte an querenden Fremdmedien, Vertikalversprünge vor Schachteintritten oder zu verfüllende Kanäle und Schutzrohre, in denen neue KMR-Trassen auf kleinen Abschnitten eingezogen werden sollen.

Hier spielen ZFSV derzeit ihre Vorteile aus. Es ist kein händisches oder maschinelles Verdichten nötig und somit entsteht kein mechanischer Eintrag auf Erdreich und Rohrleitung. Des Weiteren ist kein Personal- und Geräteeinsatz im Graben zum Verdichten notwendig. In sensiblen Bereichen sind Setzungen so gut wie ausgeschlossen.

Hierdurch kann, übertragen auf die Linienbaustelle der gesamten Trassierung, der Rohrgraben schmaler ausgeführt werden, da Arbeitsräume nach (DIN 4124:2012-01) entfallen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Rohrleitungen im sogenannten Pipeline-Verfahren eingebracht werden. Das bedeutet, dass sämtliche Arbeiten zum Herstellen der Rohrverbindungen (Schweißen, Prüfen, KMR-Muffenmontage) außerhalb des Rohrgrabens erfolgen und die Rohrstränge anschließend in den Rohrgraben eingehoben oder eingezogen werden. Es darf kein Personaleinsatz innerhalb des schmaleren und nicht der (DIN 4124:2012-01) entsprechenden Rohrgrabens stattfinden.

#### **5.1.1 Aus den Technikumsversuchen abgeleitete Vorgaben**

Die Zeit zwischen der Verfüllung der Leitungszone mit ZFSV und dem ersten Anfahren der Leitung sollte mindestens 28 Tage betragen, da sich ab diesem Zeitpunkt das Materialverhalten sich nicht mehr so stark verändert. Die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung ist nach 28 Tagen nur relativ gering. Sollten Zeitpunkte vor 28 Tage für die Untersuchungen relevant sein, müssen die Veränderungen der Materialeigenschaften und insbesondere die Festigkeitsentwicklung während der langen Versuchsdauer über Tage ggf. Wochen bei der Versuchskonzeption und Ergebnisauswertung berücksichtigt werden.

#### **5.1.2 Aus dem Feldversuch abgeleitete Vorgaben**

Ziel des Feldversuchs war es, die unterschiedlichen Dehnungsbehinderungen von Sand und ZFSV unter ansonsten identischen Verlege- und Betriebsbedingungen zu ermitteln. Dies wurde mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen Versuchsaufbau mit Festpunkt und Doppelgraben erreicht. Somit konnten keine Ergebnisse über einen zeit- und kostenoptimalen Leitungsbau erzielt werden. Trotzdem können einige Ergebnisse aus der Versuchsstrecke abgeleitet werden.

#### **Auftriebssicherung**

Beim Verfüllen der Leitungszone mit ZFSV stehen die Rohre bis zum Verfestigen des ZFSV unter Auftrieb und müssen entsprechend gesichert werden. Berechnungsmethoden hierzu

werden in der Literatur beschrieben, z. B (Pecher et al. 2010). Für diesen Feldversuch wurden hilfsweise folgende Betrachtungen angestellt. Die Berücksichtigung der durch die Suspension beim Verfüllen auftretenden, auftriebswirksamen Fließgrenze  $\Delta\tau_f$  zu berücksichtigen, ist zur vereinfachten Berechnung mithilfe des Archimedischen Prinzips durch eine Erhöhung der Suspensionsdichte möglich.

#### a) Zu berücksichtigende Kräfte

Die Auftriebssicherung muss die Differenz zweier entgegen gerichteter Kräfte aufnehmen (siehe Abbildung 120):

- die Auftriebskraft des Rohres im ZFSV, die nach oben gerichtet ist
- die Gewichtskraft des Rohres, die nach unten gerichtet ist

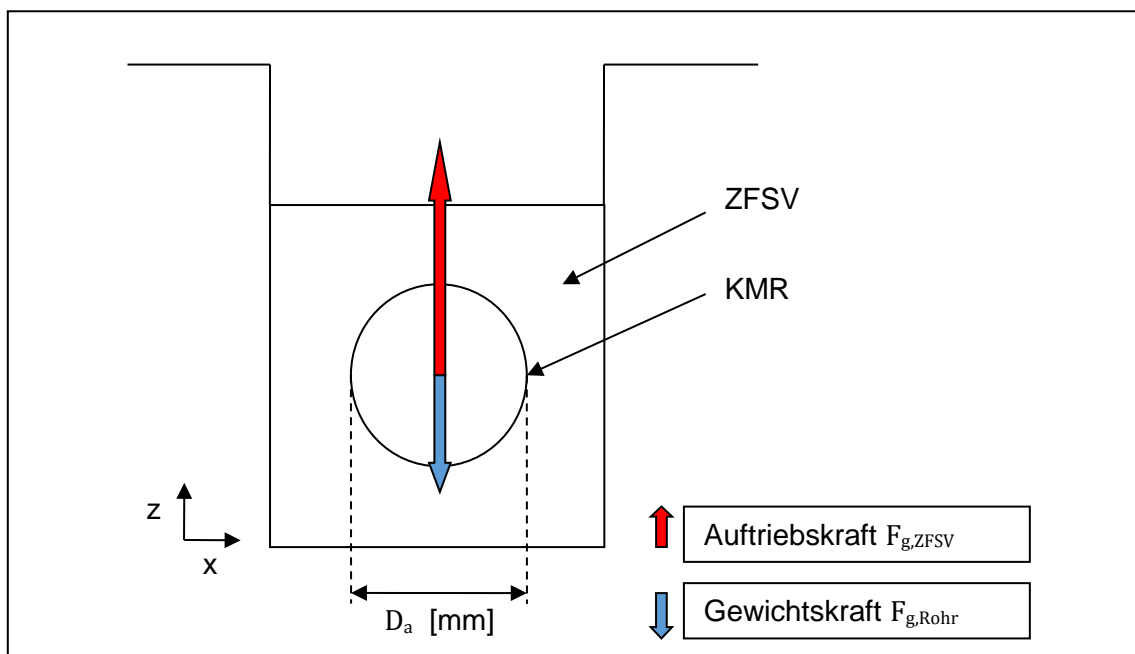


Abbildung 120: Auf das KMR wirkende Kräfte unter Auftrieb

#### b) Ermittlung der Auftriebskraft

Bei einer vollständigen Umhüllung des Rohres mit ZFSV entspricht die Auftriebskraft dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit. Durch einsetzen der Variablen aus Tabelle 31 in Formel 23 erhält man die Auftriebskraft  $F_{g,ZFSV}$ .

$$F_{g,ZFSV} = A * \rho_{ZFSV} * g$$

Formel 23: Berechnung der Auftriebskraft pro m Rohr

Tabelle 31: Annahmen zur Berechnung der Auftriebskraft Variante B:

Annahmen /Randbedingungen		
Rohraußendurchmesser	$D_a$	125 mm = 0,125 m
Rohrquerschnittsfläche	A	$\pi * (D_a/2)^2 \approx 0,0154 \text{ m}^2$
Dichte des Flüssigbodens	$\rho_{ZFSV}$	2100 kg/m <sup>3</sup>
Erdbeschleunigung	g	9,81 m/s <sup>2</sup>

$$F_{g,ZFSV} = 253 \frac{N}{m}$$

**c) Ermittlung der Gewichtskraft des Rohres**

Durch die Annahmen aus Tabelle 32, eingesetzt in Formel 24, ergibt sich eine Gewichtskraft des Rohres von -46,8 N/m. Diese Kraft ist negativ, weil sie nach unten gerichtet ist.

$$F_{G,Rohr} = -G * g$$

Formel 24: Gewichtskraft pro m Rohr

Tabelle 32: Annahmen zur Bestimmung der Gewichtskraft pro m Rohr

Annahmen /Randbedingungen		
Gewicht des Rohres (Herstellerangabe)	G	4,77 kg/m
Erdbeschleunigung	g	9,81 m/s <sup>2</sup>

**d) Resultierende Kraft**

Durch die Summierung der Gewichtskraft des Rohres ( $F_{g,Rohr}$ ) und der Auftriebskraft ( $F_{g,ZFSV}$ ) ergibt sich die resultierende Kraft  $F_{gesamt}$  pro m Rohr.

$$F_{gesamt} = 253 \frac{N}{m} - \left( 4,77 \frac{kg}{m} * 9,81 \frac{N}{kg} \right) \approx 206 \frac{N}{m} = 0,206 \frac{kN}{m}$$

**e) Ermittlung der maximalen Länge zwischen zwei Auftriebssicherungen**

Die relevanten Größen für die Dimensionierung infolge der maximalen Spannung auf dem Rohr sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: relevante Größen zur Bestimmung des maximalen Abstandes zwischen zwei Auftriebssicherungen

Annahmen /Randbedingungen		
maximale PUR-Spannung, die ein Rohr ertragen kann	$\sigma_{PUR}$	0,3 N/mm <sup>2</sup>
Fläche, auf die die Haltekraft einwirkt (horiz. Projektion)	$A_{Halt}$	0,0125 m <sup>2</sup>
resultierende Kraft (Auftrieb und Gewicht des Rohres)	$F_{gesamt}$	0,206 kN/m

Wenn man  $F_{max}$  als die maximale Kraft bezeichnet, die ein Teil des Rohres ertragen kann, so errechnet sich diese Kraft mit Formel 25

$$F_{max} = \sigma_{PUR} * A_{Halt}$$

Formel 25: Berechnung der vom Rohr ertragbaren Maximalkraft

Mithilfe dieser Kraft lässt sich die maximal zulässige Länge  $L_{max}$  ermitteln, die zwei Auftriebssicherungen voneinander entfernt sein dürfen.

$$F_{max} = F_{gesamt} * L_{max}$$

$$L_{max} = \frac{\sigma_{PUR} * A_{Halt}}{F_{gesamt}}$$

Formel 26: Berechnung der maximal zulässigen Länge

Um die zulässige PUR-Spannung auf einem Rohr mit einer Nennweite DN 40 einzuhalten, darf nach Formel 26, die Länge zwischen zwei Auftriebssicherungen 18,2 m nicht überschreiten.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist die Verformung des Rohres zwischen zwei Auftriebssicherungen unter Auftriebslast. Ein kleiner Wert für die Länge L ermöglicht nicht nur eine niedrigere Spannung auf dem Rohr, sondern limitiert auch die Biegung zwischen zwei Auftriebssicherungen.

Um die Biegung zwischen zwei Auftriebssicherungen und die Spannung auf dem Rohr mit einer Nennweite von DN 40 gering zu halten, wurde eine Länge L = 6 m zwischen den Auftriebssicherungen gewählt.

Mit einer Länge L von 6 m beträgt die Spannung auf der wirksamen Fläche:

$$\sigma = \frac{L * F_{gesamt}}{A_{Halt}} = \frac{6 \text{ m} * 0,206 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{0,0125 \text{ m}^2} \approx 0,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 0,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} (= \sigma_{PUR})$$

Formel 27: Spannungsberechnung auf der wirksamen Fläche

## 5.2 Baustellenablauf

Bei der Versuchstrecke wurde zunächst die Leitungszone der sandgebetteten Leitung verfüllt. Auf dieses so entstandenen Planum wurde nun alle 6 m ein Stahlträger, der bis über die parallel verlaufende Leitung, die mit ZFSV vergossen werden soll, hinausragt, gelegt und mit einem Big Pack gesichert (siehe Abbildung 121).



Abbildung 121: Stahlträger mit Big Packs für Auftriebssicherung (Quelle: AGFW)



Von diesem Stahlträger aus kann die Höhenlage der Leitung über eine höhenverstellbare Gewindestange, die über ein Sattelblech auf einen Sandsack wirkt, exakt eingestellt werden (siehe Abbildung 122).



*Abbildung 122: Höhenjustierbare Auftriebssicherung (Quelle AGFW)*

Diese Art der Auftriebssicherung ist nicht auf die üblichen KMR-Verlegesituationen übertragbar.

### Grabenverfüllung mit ZFSV

Die Leitung wurde auf Sandsäcken verlegt und anschließend mit ZFSV vergossen (siehe Abbildung 123).

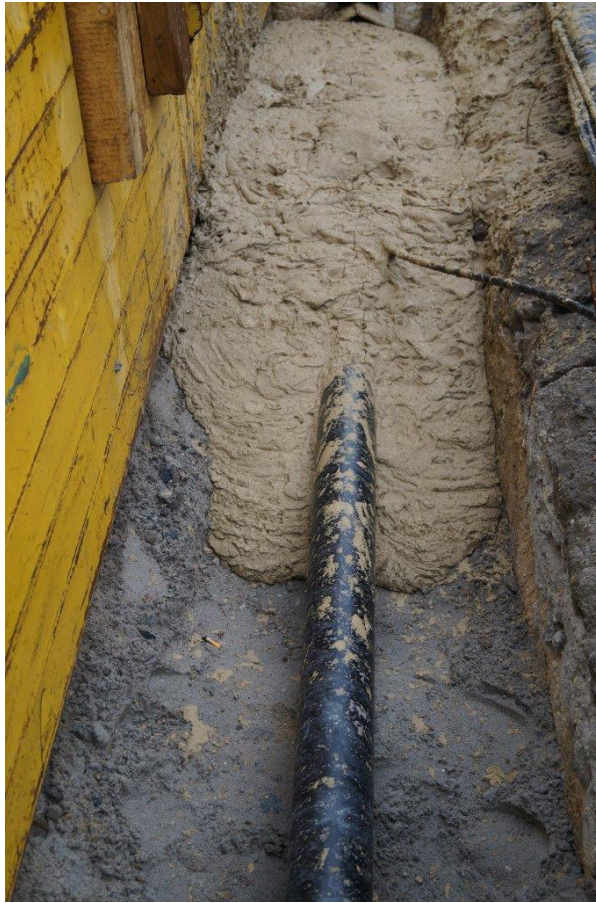


Abbildung 123: Grabenverfüllung mit ZFSV (Quelle AGFW)

Wichtig ist, dass der Grabenverbau nach dem Verguss mit ZFSV gezogen wird, solange die Vergussmasse noch fließfähig ist. Dies ist in Abbildung 124 (im Bild links oben) zu sehen.



Abbildung 124: Ziehen des Grabenverbaus nach Verfüllung (Quelle AGFW)

## 6 ZFSV – Qualität

Qualität ist das Maß, indem ein Produkt die bestehenden Anforderungen erfüllt. Qualitätsanforderungen spezifizieren die bestehenden Anforderungen an die Qualität. Anforderungen sind Erfordernisse oder Erwartungen, die man festlegt, die man voraussetzt oder die verpflichtend sind. Man kann diese an konkreten Merkmalen als kennzeichnende Eigenschaften festmachen.

Für konventionelle Sandverfüllung sind die Anforderungen bekannt, definiert, geregelt und prüfbar. Details hierzu finden sich (AGFW Arbeitsblatt FW 401), insbesondere Teil 12 und 17. (AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 12) führt zum Beispiel an, dass in der Leitungszone Natursande 0/2 mm entsprechend TL Min StB beziehungsweise DIN 4226 mit einem Größtkorn von 4 mm zu verwenden sind. In der Leitungszone ist ein Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} \geq 97\%$  zu erzielen. Es handelt sich um erdbautechnische Merkmale und Anforderungen für diesen körnigen Baustoff.

ZFSV sind keine körnigen Baustoffe. Durch die Zugabe von Zement und/oder Bentonit funktionieren sie anders als Sand und verhalten sie auch anders, weshalb die erdbautechnischen Anforderungen an Sand ungeeignet oder nur bedingt geeignet sind. Daher sind andere erdbautechnische Anforderungen erforderlich.

### 6.1 Qualitätsanforderungen

Die generellen Qualitätsanforderungen an das Produkt erdverlegte KMR für erdverlegte Fernwärmenetze bleiben unverändert.

Für die Qualitätsanforderungen an ZFSV gilt in einem ersten Schritt:

- **Gleichbleibende Eigenschaften der Einzelkomponenten:** Boden oder Baustoffe, die man verwendet, um ZFSV herzustellen, unterliegen natürlichen Schwankungen; diese gelten nicht als Abweichungen von deren gleichbleibenden Eigenschaften, solange die Eigenschaften des ZFSV gleichbleiben
- gleichbleibende Eigenschaften des ZFSV
- **Raum- und Strukturbeständigkeit:** Das Material darf weder im fließfähigen Zustand noch während des Ansteifens, Erstarrens und Erhärten und darüber hinaus übermäßig schwinden oder schrumpfen; die sich durch Ansteifen und Erstarren einstellende Struktur darf sich nicht übermäßig verändern
- **Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit:** Dies stellt sicher, dass man das Material ohne Zusatzaufwand verfüllt und das man die Rohre hohlraumfrei verfüllen kann
- **Ansteifen, Erstarren und Erhärten gemäß den projektspezifischen Vorgaben:** In der Regel geht man davon aus, dass das Material 24 h nach dem Einbau so angesteift/erstarrt ist, dass man es betreten kann
- **Geeigneter Kontaktschubspannungsbereich während der gesamten Betriebsdauer:** Dies stellt sicher, dass die berechneten Verschiebungen des KMR und Normalkräfte im KMR und zugehörige Größen wie zum Beispiel Spannungen im PUR-Schaum im zulässigen Bereich bleiben
- **Aushubfähigkeit:** Falls man nach der Verfüllung das KMR nochmals freilegen muss, darf der Aushub des Materials keinen übermäßigen Aufwand verursachen; insbesondere darf der Aushub nicht den Einsatz von Pressluftschlämmern, Baggermeißeln oder Felsfräsen erfordern

## 6.2 Qualitätsmerkmale

Für die gleichbleibenden Eigenschaften der Einzelkomponenten und der ZFSV sind die konkreten Merkmale in Abhängigkeit des verwendeten ZFSV zu vereinbaren. Üblicherweise betreiben die Lieferanten von Einzelkomponenten, wie zum Beispiel Zement oder Bentonit aber auch bei Fertigmischungen, Qualitätssicherung. In diesen Fällen ist es zweckmäßig und sinnvoll, auf diese Qualitätssicherung zurückzugreifen und die darin vereinbarten Merkmale heranzuziehen. Dies gilt auch für nachfolgende Schritte in der Qualitätskette zur Zusicherung der Qualität. Bei ZFSV, die Aushub von der Baustelle oder zwischengelagerten Aushub verwenden, ist es zweckmäßig, im Rahmen der Eignungsprüfungen einen Kornverteilungsbereich bzw. ein Kornverteilungsband festzulegen, in dem sich der Aushub bewegen darf, ohne dass sich dies auf die Eigenschaften des ZFSV auswirkt. Als Anmischwasser ist Trinkwasser einzusetzen.

Die gleichbleibenden Eigenschaften der ZFSV erfordern eine Rezeptur. Insbesondere bei Fertigmischungen, denen man nur noch das Anmischwasser zugibt, ist es möglich, dass die Mengen der Einzelkomponenten je Raumeinheit frischen ZFSV ein Betriebsgeheimnis ist. Die Einzelkomponenten sind aber zu benennen.

Die weiteren Anforderungen im vorhergehenden Abschnitt lassen sich in einem ersten Schritt an folgenden Merkmalen festmachen, die Tabelle 34 auflistet. Es ist insbesondere bei Fertigmischungen, denen man nur noch das Anmischwasser zugibt, möglich, dass die Lieferanten im Rahmen ihrer Qualitätssicherung eigene, fertigmischungsspezifische Prüfmethode einsetzen. Es ist dann zweckmäßig, diese anzuwenden. Größenwerte der Merkmale sind projektspezifisch festzulegen. Der tabellarische Anforderungskatalog an ZFSV (siehe Anlage 4) erlaubt es, sich zu orientieren.

Tabelle 34: Merkmale der Qualitätsanforderungen

Anforderung	Merkmale	Beispielhafte Prüfmethode / Hinweise
Raum – und Strukturbeständigkeit	Wasserabsonderung	Absetztest
	Volumenstabilität (Kurzzeit)	Absetztest
	Volumenstabilität (Langzeit)	Volumenverlustmessung an zylinderförmiger Probe
	Grenzspannung des „Strukturbruchs“	eindimensionaler Kompressionsversuch DIN 18135
Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit	Konsistenz	Ausbreitmaß
Ansteifen, Erstarren und Erhärten	Verfestigung	einaxiale Druckfestigkeit DIN 18136 Fallkegelversuch (Entwurf DIN EN ISO 17892-6:2015-02) Flügelscherversuche DIN (DIN 4094-4:2002-01)
Kontaktschubspannungsbereich	Kontaktwiderstandsarbeitslinie	Prüfung mit dem Re-SIST, Technikums- oder Feldversuch
Aushubfähigkeit	Verfestigung	Einaxiale Druckfestigkeit DIN 18136

### 6.3 Qualitätskontrollmaßnahmen

Es wird empfohlen, bei der Verfüllung der Leitungszone mit ZFSV die H-ZFSV der FGSV zu beachten. Erdverlegte KMR werden im Gültigkeitsbereich des AGFW-Regelwerks verlegt. Sofern die Verlegung im Straßenbereich erfolgt, sind die Anforderungen des FGSV-Regelwerks zu beachten.

In den (H ZFSV 2012) ist die Fernwärme in den Abschnitten 2.1.7, 5.2 und 7.3.4 direkt benannt. Abschnitt 7.3.4 beschäftigt sich mit dem großmaßstäblichen Verschiebeversuch zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten Bettung/ Rohr in Anlehnung an die Sandkastenprüfung nach (DIN EN 489:2009-07). Er lässt sich auch auf ZFSV übertragen (siehe Abschnitte 3.10.7 und 3.10.8 dieses Berichts), ist allerdings zeit- und kostenaufwändig. Mit dem Re-SIST (siehe Abschnitt 3.10.2 dieses Berichtes) steht eine kostengünstige und wesentlich zeitgünstigere Alternative zur Verfügung, mit der Druck- und Zeitreihenuntersuchungen durchgeführt werden können.

Quantifizierung der Dehnungsbehinderung in der Kontaktfläche zwischen KMR und ZFSV. Damit können die in Abschnitt 2.1.7 der H-ZFSV gegebenen qualitativen Hinweise nun mit konkreten Anforderungen an die Dehnungsbehinderung hinterlegt werden (siehe Abschnitt 7.2 dieses Berichtes). Die Anforderungen an die Dehnungsbehinderung sollten im Vorfeld in Laboruntersuchungen bzw. Eignungsprüfungen (siehe Abschnitt 3.10) und bei Bedarf in einem Feldversuch überprüft werden.

Abschnitt 3.2 der (H ZFSV 2012) nennt die grobkörnigen Böden zur Herstellung von ZFSV. Nach den Erfahrungen im Projekt sind diese u. U. unwirtschaftlich bis ungeeignet, um mit ihnen ZFSV herzustellen, mit denen man erdverlegte KMR verfüllt. Nach derzeitigem Kenntnisstand führen Recyclingstoffe aus/ mit Beton und/ oder Ziegel dazu, dass ZFSV infolge der Bestandteile der Recyclingmaterialien nacherhärten, deshalb ist es nicht zu empfehlen ZFSV mit solchen Recyclingmaterialien im Fernwärmeleitungsbau einzusetzen. Die (H ZFSV 2012) geben im Abschnitt 7 einen guten Überblick zu Qualitätskontrollmaßnahmen, die Eignungsprüfungen, Eigenüberwachungsprüfungen und Kontrollprüfungen umfassen. Einige Prüfverfahren sind in Tabelle 34 dieses Berichtes in Verbindung mit der Anlage 4 bereits benannt. Sie unterscheiden sich von den in Tabelle 3 der (H ZFSV 2012) genannten Prüfverfahren, weswegen folgende Zeilen beziehungsweise Prüfverfahren der Tabelle 3 nicht anzuwenden sind:

- Zeile 1.6: stoffliche Zusammensetzung bei RC-Baustoffen
- Zeile ---: Probenherstellung, -lagerung, Prüfkörperformen
- Zeile 3.2.2: Druckfestigkeit oder CBR-Wert
- Zeile 3.2.3: Nachweis der Volumenstabilität (Langzeit), Schwellmaß oder Setzdehnungsmessung oder Schwindrinne

Konsequenterweise wurde die Tabelle 3 der (H ZFSV 2012) unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse an die Belange der Fernwärme angepasst und in Anlage 15 aufgenommen. Bis zu einem eigenen Regelwerksbaustein des AGFW empfiehlt es sich, gemäß dieser Anlage zu verfahren.

## 6.4 Darstellung zur möglichen Erfüllung der Anforderungen

Wie in den vorliegenden Abschnitten schon mehrmals beschrieben und erläutert, handelt es bei ZFSV um herstellerspezifische und/ oder projektspezifische Baustoffe, die auf die jeweilige Maßnahme angepasst werden müssen. Aus diesen Gründen kann für ZFSV keine universelle Rezeptur angegeben werden, die für jede Verlegung von KMR in ZFSV geeignet ist. Wie bei solchen Baustoffen und im Erdbau üblich, werden in solchen Fällen Anforderungen und Grenzwerte definiert, die das Produkt – hier ZFSV - erfüllen muss. Das Erreichen der Anforderungen und das Einhalten der Grenzwerte wird durch ein planungs- und baubegleitendes System an Untersuchungen, Prüfungen und Überwachungsmaßnahmen sichergestellt. In Anlehnung an das im Erdbau bzw. Verkehrswegbau üblichen Systemen werden 4 Prozesse empfohlen:

- A) Eignungsuntersuchungen und –prüfungen zumeist vor der Baumaßnahme im Rahmen der Entwurfs- oder Ausführungsplanung
- B) Eigen- und Fremdüberwachung der Hersteller/Lieferanten
- C) Eigenüberwachung des Auftragnehmers auf der Baustelle und ggf. im Nachgang
- D) Kontrollprüfungen des Auftraggebers auf der Baustelle und ggf. im Nachgang

Diese 4 Prozesse finden prinzipiell in dieser Form auch bei Sand als Bettungsmaterial statt, wobei aufgrund der langjährigen Erfahrungen Prozess A entfällt, da geregelt z. B. in FW 401, und Prozess B zumeist durch eingeführte Qualitätssysteme beim Lieferanten abgesichert ist. Im Prozess C werden im W. nach Einbau die im Bettungssand erzielten Verdichtungsgrade  $D_{Pr}$  und im Prozess D ggf. kontrolliert, ob nach der Verdichtung die nach FW 401 geforderte Kornverteilungskurve z. B. hinsichtlich Feinanteilen eingehalten wird.

Auch die Tabelle 3 in (H ZFSV 2012) ist nach den o. g. 4 Prozessen aufgebaut, weshalb im Folgenden aus dem Forschungsprojekt abgeleiteten, fernwärmespezifischen Anforderungen, Grenzwerte und Randbedingungen benannt werden, die von Tabelle 3 abweichen oder darüber hinaus gehen. Grundsätzlich ist bei allen Versuchen und Untersuchungen das Aus-/Absieben größerer Körner oder Aggregate zum Einhalten der im Folgenden festgelegten geometrischer Vorgaben nicht zulässig, sofern nicht durch vergleichende Reihenuntersuchungen und statischer Auswertung der Versuchsergebnisse belegt wird, dass das Aus-/Absieben keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat.

### **Zulässiges Größtkorns $d_{max}$ :**

Die Festlegung eines zulässigen Größtkorns muss sich u. a. an den Abständen zwischen und unter den Rohren beziehen, so dass ein gesichertes Umfließen und vollständiges Umschließen der KMR möglich ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ZFSV grundsätzlich ohne Verdichtung bzw. Rütteln eingebracht werden, weshalb empfohlen wird, das Größtkorn  $d_{max} \leq a_{min} / 5$  zu beschränken, wobei  $a_{min}$  den minimalen Abstand bezeichnet, durch den das ZFSV fließen soll. Bei dem üblichen Abstand KMR-Unterseite zu Grabensohle von 10 cm, führt dies zu einem zulässigen Größtkorn  $d_{max} \leq 20$  mm. Dies gilt genauso für Haufwerke aus bindigen Böden, aus denen ZFSV hergestellt werden. Auch hier muss die maximale Aggregatsgröße („Klumpengröße“)  $d_{max} \leq a_{min} / 5$  gewährleistet sein. Eine Abweichung von der Vorgaben auf  $d_{max} \leq a_{min} / 3$  ist möglich, wenn durch Aufgraben in den Prozessen A, C und D gezeigt wird, dass damit ein gesichertes Umfließen und um vollständiges Umschließen der KMR gewährleistet ist. Die Ermittlung von  $d_{max}$  und dessen Masseprozentanteil erfolgt in den Ausgangsstoffen und im ZFSV im Zweifelsfall nach DIN 18123.

### **Raum – und Strukturbeständigkeit:**

Zur Sicherstellung der Raum- und Strukturbeständigkeit von ZFSV sind mehrere Versuche und Prüfungen notwendig. Zunächst muss überprüft werden, dass das ZFSV nicht zum Entmischen neigt, was zum einen durch Überprüfung der Wasserabsonderung („Bluten“) des frischen ZFSV in Anlehnung an DIN EN 445 mittels Absetztest in einem  $h = 10 \cdot d_{\varnothing} \geq 20$  cm hohen zylindrisches Standrohr erfolgt, dessen Durchmesser  $d_{\varnothing} \geq 5,0 \cdot d_{\max}$  entsprechend muss. Die Wasserabsonderung, die sich als freies Wasser auf der ZFSV-Oberfläche einstellt, sollte nach 3 h stets geringer als 2% des Probenvolumens bleiben. Nach 24 Stunden wird an derselben Probe noch die Volumenstabilität (Kurzzeit) beurteilt, in dem überprüft wird, dass das sich das ZFSV-Volumen nicht mehr als 3% verringert hat. Im Zusammenhang mit diesem Versuch ist beim Ausbau der ZFSV zu prüfen, ob es zu einem Absinken der Körner und Anreicherung der gröberen Kornfraktionen im unteren Bereich des zylinderförmigen Standrohrs gekommen ist. Dies erfolgt am einfachsten, indem in die säulenförmige Probe in 10 Scheiben  $\Delta h = d_{\varnothing}$  zerlegt wird und optisch beurteilt wird. Im Zweifel können die Korngrößenverteilungen der scheibenförmigen Proben nach DIN 18123 ermittelt werden.

Die Überprüfung der Volumenstabilität (Langzeit) erfolgt als Volumenverlustmessung zweckmäßigerweise an den zylinderförmiger Proben, die z. B. für die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit angefertigt werden, kurz nach dem Ausbau der Proben aus dem Probegefäßen durch Ausmessen der Proben z. B. mittels Schiebelehren. Hier sollte stets weniger als 3% Volumenverringering auch nach  $\geq 56$  Tagen gemessen werden. Die Zeitdauer von 56 Tagen ergibt sich aus den Anforderungen des H ZFSV zur Beurteilung der Nacherhärtung mittels einaxialen Druckversuchen. Führt man z. B. nach 3, 7, 14 und 28 d Zwischenmessungen zur Volumenermittlung an, darf auch auf Basis der Entwicklung der Volumenveränderung auf Zeiträume  $\geq 56$  d zurückgeschlossen werden.

Sind genauere Untersuchungen zur langzeitlichen Raum- und Strukturbeständigkeit erforderlich, empfiehlt es sich, diese als eindimensionaler Kompressionsversuch nach DIN 18135 durchzuführen. Dieser Versuch ist bereits ausführlich in Abschnitt 3.7 beschrieben und lässt sich sehr einfach, neben der Beurteilung des Last-Verformungsverhaltens, auch zur Beurteilung des Schwindens/ Schrumpfens und Schwellen/ Quellen von ZFSV einsetzen, zumal die Proben auch langfristig auf dem gewünschten Spannungsniveau gehalten und dabei kontrolliert bewässert/ befeuchtet oder getrocknet werden können. Auch dabei sind die Abmessungen der scheibenförmigen Probe  $h \geq 5,0 \cdot d_{\max}$  und  $d_{\varnothing} \geq 3,0 \cdot h$  unbedingt einzuhalten. Insbesondere gelingt es mit dem Kompressionsversuch auch die Grenzspannung des „Strukturbruchs“ zu ermitteln.

### **Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit:**

Die Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit der ZFSV wird – sofern vom Hersteller/ Lieferanten nichts anderes vorgegeben - mittels Ausbreitmaß ermittelt, das in Anlehnung an (DIN EN 12350-5:2009-08) jedoch ohne Stößelausgleich mit Anstoßen am Anschlag ermittelt. Das Anstoßen („Schocken“) ist erforderlich, falls Bentonite oder andere wasseranlagernde Mineralien/ Stoffe mit thixotropen Eigenschaften eingesetzt werden. Bei dem hier untersuchten Produkten C haben sich Ausbreitmaße von 50 bis 60 cm bewährt. Bei Produkt A wurde dazu nach Herstellerangabe alternativ die Fließfähigkeit mittels Ziehmaß ermittelt (Abschnitt 3.6.1.1).

Auch das Ausbreitmaß ist neben dem Einhalten von  $d_{\max}$  ein wichtiges Kriterium für ein gesichertes Umfließen und vollständiges Umschließen der KMR und muss jeden Tag bei den ersten 3 Chargen sowie 1-mal gegen Mittag und bei der letzten arbeitstäglischen Charge im

Prozess B und C zwingend überprüft werden. Im Zweifelsfall sind alle Chargen vor dem Eingießen zu überprüfen.

Innerhalb eines ZFSV-spezifischen Zeitraums nach dem Beginn des Mischvorgangs kommt es aufgrund der Reaktionen der eingesetzten Bindemittel zum Ansteifen/ Plastifizieren der ZFSV. Zwar kann durch Zugabe und Einmischen von weiterem Wasser das Ausbreitmaß wieder auf die gewünschte Größe gebracht werden, jedoch bleibt der Verfestigungsverlauf deutlich unter den Zielgrößen zurück. Nach unseren Erfahrungen dürfen die eingesetzten Produkte A und C nicht länger als 2,0 h nach Beginn des Mischens eingesetzt bzw. in den Graben eingegossen werden. Auch diese zeitliche Obergrenze der Verarbeitbarkeit ist mit den Herstellern/Lieferanten abzustimmen und in den Prozessen B bis D zumindest auf den Lieferscheinen zu überprüfen.

### **Prüfkörperform, Probenahme und Probelagerung:**

Es sind bevorzugt zylinderförmige Prüfkörper einzusetzen, wobei  $h$  die Zylinderhöhe und  $d_{\varnothing}$  den Durchmesser des Zylinders bezeichnen. Bewährt haben sich Kunststoffdosen oder dünnwandige Stahlrohre mit luft- und wasserdicht abschließenden Kunststoffendkappen. Beim Einsatz von Metallen ist auf Korrosionsschutz zu achten, da sich ZFSV aufgrund der zugegebenen Zemente basisch verhalten und pH-Werte  $\geq 12$  aufweisen können.

Die Probenahme auf der Baustelle muss stets als Schöpfprobe direkt aus dem verfüllten Graben erfolgen, da sich durch den Verfüllvorgang bzw. das Eingießen ggf. Veränderungen im ZFSV einstellen können. Nach der Entnahme und dem Einbringen der ZFSV in die Probezylinder sind diese unmittelbar mit Kunststoffendkappen zu verschließen und abzudichten.

Insbesondere auf der Baustelle entnommene Proben sind vor Frost, Wasserverlust, Austrocknung, Sonneneinstrahlung, etc. geschützt zu lagern. Die Proben dürfen erst dann stoß- und vibrationsgeschützt transportiert werden, nachdem sie ausreichend verfestigt sind, was im Allg. nach einigen Stunden bis 24 Stunden der Fall und mit dem Hersteller/ Lieferanten abzuklären ist.

Sofern nicht eine besondere Einbausituation vorliegt, sind reine Materialproben nach der Lagerungsbedingung „Gesättigtes System“ (siehe Abschnitt 3.6.2.4) zu lagern.

### **Verfestigung und Wiederaushubfähigkeit:**

Untersuchungen zum Ansteifen, Erstarren und Erhärten in den ersten Stunden nach dem Eingießen der ZFSV in Graben sind im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung des Auftriebs und der Steifigkeit ( $E_S$ ,  $E_{V1/2}$ ,  $E_{VD}$ ) von Interesse und sollten – falls erforderlich - im Prozess A bei der Rezepturermittlung im Labor mit untersucht und ggf. im Prozess C überprüft werden.

Von zentralerem Interesse ist die Beurteilung der Wiederaushubfähigkeit, die mittels einaxialer Druckfestigkeitsuntersuchungen nach DIN 18136 und Beurteilung der Ergebnisse gemäß Abbildung 11 und Formel 3 erfolgt. Die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt zeigen, dass beim Einsatz von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau, bereits bei den Eignungsuntersuchungen im Prozess A ZFSV-Rezepturen mit einaxialen Druckfestigkeiten  $q_{u,56d} \leq 0,3 \text{ N/mm}^2$  nach 56 d  $f_z(7 - 56d) < 0,10 \text{ N/mm}^2$  eingesetzt werden sollten, womit nach H ZFSV langfristige Wiederaushubfähigkeit zu erwarten ist.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist insbesondere bei der Ermittlung von  $q_u$  der auf die Einhaltung folgender Festlegungen zu achten. Zur versuchstechnischen Ermittlung die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  sind ausschließlich zylinderförmige Prüfkörper mit  $h/d_{\varnothing} = 1,9 - 2,5$  und  $d_{\varnothing} \geq 5,0 \cdot d_{\text{max}}$  zu untersuchen, wobei die Zylinderhöhe und  $d_{\varnothing}$  den Durchmesser des



Zylinders bezeichnen. Vor dem Einbau in die Versuchspresse sind die Endflächen mittels Gips abzugleichen. Das Verhältnis  $h/d$  darf den Wert 1,9: 1,0 und den Wert 2,5: 1,0 nicht unterschreiten. Die Versuche müssen geschwindigkeitsgeregelt nach den Vorgaben der DIN 18136 für mit  $v = 0,002 \cdot h_0/\text{Minute}$  durchgeführt werden, da ZFSV im Allg. Bruchdehnungen  $< 4\%$  aufweisen. Für eine Probe mit der Anfangshöhe  $h_0 = 200 \text{ mm}$  bedingt diese Vorgabe eine Vorschubgeschwindigkeit von  $v = 0,4 \text{ mm/Minute}$ .

Versuche bis 56d können im Allg. nur beim Prozess A und im Nachgang bei den Prozessen C und D durchgeführt werden.

### **Dehnungsbehinderung und Kontaktwiderstandsarbeitsline**

Solange keine auseichende Datenbasis für die unterschiedlichen ZFSV vorhanden ist, sollte die Ermittlung der Dehnungsbehinderungswiderstände  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  erfolgen sinnvollerweis mittels kleinmaßstäbigen Durchschiebversuchen im ReSiST-Behälter. Damit können insbesondere bei den Eignungsuntersuchungen A mit relativ geringem Aufwand Zeit- und Druckreihenversuche durchgeführt werden, die sich an den Vorgaben der Entwurfs- oder Ausführungsplanung richten. Wünschenswerte Technikums- oder Feldversuche sind zumeist zu aufwändig.

Ein möglicher Ausschreibungstext, für den Einsatz von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau, ist in Anlage 16 zu finden.

## 7 Berechnungsverfahren und Berechnungsempfehlungen

### 7.1 Veränderte Berechnungsannahmen

ZFSV können nur dann zur Verfüllung der KMR-Leitungszone eingesetzt werden, wenn bestimmte Ober- und Untergrenzen des Dehnungswiderstands eingehalten werden (siehe Abschnitt 7.2). Überschreitet der Dehnungswiderstand die Obergrenze, so besteht die Gefahr, dass die zulässige PUR-Scherspannung überschritten wird und der Verbund verloren geht. Unterschreitet der Dehnungswiderstand die Untergrenze, dann können – wenn man nicht die teuren von MVV in (Schmitt et al. 2015) propagierten Festpunktbrücken einsetzt - so große Verschiebungen des KMR auftreten, dass sie mit herkömmlicher Dehnpolstertechnik nicht kompensiert werden können.

Im Berechnungsablauf ist als einzige Anpassung die Berücksichtigung des veränderten Dehnungswiderstands des ZFSV gegenüber Sand erforderlich. Der anfänglich wirkende, sehr hohe Dehnungswiderstand in ZFSV beim ersten Anfahren muss von der KMR-Leitung ertragen werden. Für diesen Nachweis ist in Abschnitt 4.4.2.5 ein Vorschlag gemacht worden. Alle übrigen rohrstatischen Grundlagen, wie z. B.  $actio = reactio$ , Hook'sche Gesetz etc. gelten unverändert auch bei Verfüllung mit ZFSV.

Es können somit – wie in (Schmitt et al. 2015) gefordert – die üblichen Auslegungsdiagramme und Berechnungsprogramme für KMR weiterverwendet werden, wenn man auf eine mögliche Reduzierung der Dehnpolsterlängen und –dicken durch einen eventuell im Vergleich zu Sand langfristig erhöhten Dehnungswiderstand des ZFSV verzichtet. Wenn verlässliche Erkenntnisse über einen erhöhten Dehnungswiderstand des ZFSV vorliegen und man diesen zur Dehnpolsteroptimierung nutzen möchte, können die üblichen Auslegungsdiagramme und Berechnungsprogramme für KMR ebenfalls weiterverwendet werden. Den erhöhten Dehnungswiderstand des ZFSV kann man in diesem Fall durch eine fiktive Erhöhung der Überdeckungshöhe so lange simulieren, bis der gewünschte Dehnungswiderstand erreicht ist. Dieses Verfahren stellt eine einfache und schon heute praktisch nutzbare Alternative zu dem in (HZFSV 2012) und (Schmitt et al. 2015) vorgeschlagenen Korrekturfaktor zum Reibkoeffizienten dar.

### 7.2 Ober- und Untergrenzen der Dehnungsbehinderung

Als **Obergrenze** der Dehnungsbehinderung für den **Langzeitbetrieb** wird ein Wert von 0,02 MPa vorgeschlagen. Wenn man die Auslegungsscherfestigkeit des PUR-Schaumstoffs von 0,04 MPa zugrunde legt, ergibt sich für die einzelnen Nennweiten in Dämmreihe 2 die in Tabelle 35 dargestellte maximal zulässige Dehnungsbehinderung. Man erkennt, dass eine Dehnungsbehinderung von 0,03 MPa für alle Nennweiten unzulässig hoch ist. Man erkennt aber genauso, dass eine Dehnungsbehinderung von 0,02 MPa für alle Nennweiten ab DN 80 zulässig ist. Hausanschlüsse werden oft dezentral und zeitlich entzerrt hergestellt, so dass für sie eine Verfüllung mit Flüssigboden im 1. Entwicklungsschritt nicht erkennbar ist.

Tabelle 35: Maximal zulässige Dehnungsbehinderung [MPa] für den Langzeitbetrieb bei einer Auslegungsscherfestigkeit des PUR-Schaumstoffs von 0,04 MPa, Quelle GEF

Dämmreihe 1	DN 25	DN 40	DN 200	DN 400	DN 700
dMEDIUM [mm]	33,7	48,3	219,1	406,4	711
dMANTEL [mm]	90	110	315	560	900
dMANTEL/dMEDIUM	2,671	2,277	1,438	1,378	1,266
Max. zul. Dehnungsbehinderung [MPa]	0,015	0,018	0,028	0,029	0,032

Dämmreihe 2	DN 25	DN 40	DN 65	DN 80	DN 100	DN 150	DN 200	DN250
dMEDIUM [mm]	33,7	48,3	76,1	88,9	114,3	168,3	219,1	273
dMANTEL [mm]	110	125	160	180	225	280	355	450
dMANTEL/dMEDIUM	3,264	2,588	2,102	2,025	1,969	1,664	1,620	1,648
Max. zul. Dehnungsbehinderung [MPa]	0,012	0,015	0,019	0,020	0,020	0,024	0,025	0,024

Dämmreihe 2	DN 300	DN 350	DN 400	DN 450	DN 500	DN 600	DN 700
dMEDIUM [mm]	323,9	355,6	406,4	457,2	508	610	711
dMANTEL [mm]	500	560	630	670	710	900	1.000
dMANTEL/dMEDIUM	1,544	1,575	1,550	1,465	1,398	1,475	1,406
Max. zul. Dehnungsbehinderung [MPa]	0,026	0,025	0,026	0,027	0,029	0,027	0,028

Für das erste Anfahren der Leitung darf die Dehnungsbehinderung maximal 0,05 MPa betragen. Wenn man dafür die experimentell abgesicherte Kurzzeitscherfestigkeit des PUR-Hartschaumstoffs bei 130 °C von 0,11 MPa zugrunde legt, ergibt sich für die einzelnen Nennweiten in Dämmreihe 2 die in Tabelle 36 dargestellte maximal zulässige Dehnungsbehinderung. Man erkennt, dass eine Dehnungsbehinderung von 0,05 MPa für alle Nennweiten ab DN 65 zulässig ist.

Tabelle 36: Maximal zulässige Dehnungsbehinderung [MPa] für das erste Anfahren bei einer Auslegungsscherfestigkeit des PUR-Schaumstoffs von 0,11 MPa, Quelle GEF

Dämmreihe 1	DN 25	DN 40	DN 200	DN 400	DN 700
dMEDIUM [mm]	33,7	48,3	219,1	406,4	711
dMANTEL [mm]	90	110	315	560	900
dMANTEL/dMEDIUM	2,671	2,277	1,438	1,378	1,266
Max. zul. Dehnungsbehinderung [MPa]	0,041	0,048	0,077	0,080	0,087

Dämmreihe 2	DN 25	DN 40	DN 65	DN 80	DN 100	DN 150	DN 200	DN 250
dMEDIUM [mm]	33,7	48,3	76,1	88,9	114,3	168,3	219,1	273
dMANTEL [mm]	110	125	160	180	225	280	355	450
dMANTEL/dMEDIUM	3,264	2,588	2,102	2,025	1,969	1,664	1,620	1,648
Max. zul. Dehnungsbehinderung [MPa]	0,034	0,043	0,052	0,054	0,056	0,066	0,068	0,067
Dämmreihe 2	DN 300	DN 350	DN 400	DN 450	DN 500	DN 600	DN 700	
dMEDIUM [mm]	323,9	355,6	406,4	457,2	508	610	711	
dMANTEL [mm]	500	560	630	670	710	900	1.000	
dMANTEL/dMEDIUM	1,544	1,575	1,550	1,465	1,398	1,475	1,406	
Max. zul. Dehnungsbehinderung [MPa]	0,071	0,070	0,071	0,075	0,079	0,075	0,078	

Für die **Untergrenze** der Dehnungsbehinderung gilt, dass sie nicht niedriger als die Reibung bei Sandbettung sein sollte. Dies ist nicht mit einem pauschalen Wert beschreibbar, sondern hängt von dem Verhältnis Mantelrohrdurchmesser/Mediumrohrdurchmesser, von der Überdeckungshöhe und von einem möglichen Grundwasserstand ab.

### 7.3 Empfehlungen für einen Regelwerksbaustein des AGFW

In einen Regelwerkbaustein des AGFW sollten folgende Punkte aufgenommen werden. Einen Teil dieser Punkte finden sich auch in den (H ZFSV 2012). Es ist sinnvoll, diese mit einzuarbeiten, entweder direkt oder in dem man darauf verweist.

- Vollständige Verfüllung der Leitungszone mit ZFSV zulässig
- Unterschiede zum bisherigen Verfüllmaterial Sand (mechanisches Verhalten von ZFSV und axiale Bettung der KMR)
- Konsequenzen, die sich aus den Unterschieden zum bisherigen Verfüllmaterial Sand ergeben
- Anforderungen an für die Fernwärme geeignete ZFSV, wie zum Beispiel Mindestgehalt an Feinkorn, nicht zugelassene Einzelkomponenten, Höchstwert der einaxialen Druckfestigkeit
- Klassifizierungssystematik von ZFSV
- Größtkorn des ZFSV beziehungsweise der Einzelkomponenten
- Nicht zugelassene Einzelkomponenten der ZFSV
- Das Anmischwasser sollte Trinkwasserqualität aufweisen
- Klassifizierung geeigneter Böden für ZFSV
- Anforderungen an Baugrundaufschlüsse, Feld- und Laborversuche und den erforderlichen Berichtsaussagen, wenn man den ZFSV mit Aushub aus der Trasse herstellen will
- Besonderheiten bei der Planung und Ausschreibung
- Geänderte Organisation der Bauabwicklung und des Tiefbaus und Besonderheiten bei der Bauabwicklung und des Tiefbaus, wie zum Beispiel Auftriebssicherung, rechtzeitiges Ziehen des Grabenverbaus

- Zulässige Witterungsbedingungen, wie zum Beispiel kein Frost, Lufttemperatur nicht über 35 °C (Beispielwert), kein Dauerregen
- Konkrete Vorgehensweise beim Einbau, wie zum Beispiel Verfüllhilfen, Falltiefe, Frisch-in-Frisch-Einbau
- Maximale Transportzeiten beziehungsweise maximale Zeit zwischen Ende Herstellung und Ende Einbau je Charge
- Mindestumfang Nachbehandlung (Art und Dauer)
- Detaillierte Ausarbeitung der Qualitätssicherung; dies umfasst die Festlegung der Anforderungen, der Merkmale und Prüfmethode einschließlich Festlegung von allgemeingültigen Größtenwerte der Merkmale; Regelung zur Berücksichtigung lieferantenspezifischer Prüfmethode
- Probenform, Probenentnahme, Probenlagerung, Probentransport
- Fernwärmespezifische Eignungsprüfungen, Eigenüberwachung, Kontrollprüfungen.
- Qualifikationsnachweise Lieferanten, Bauausführende und Prüfinstitutionen
- Prüfung des kontaktmechanischen Verhaltens; Erstbelastung und zyklische Belastung, obere und untere Grenzwerte der Kontaktschubspannungen in Abhängigkeit des Alters und des Spannungsniveaus der Proben
- Geänderte Vorgehensweise bei der statischen Berechnung

#### **7.4 Vorschlag für weitere Forschungsaktivitäten**

- Fortsetzung der Messungen an der Bypassleitung
- Einsatz eines Durchlauferhitzers, um gezielte Temperaturlastfälle zu simulieren
- Direkte Kopplung an die Vorlaufleitung der NRM, um die tatsächliche Netzfahrweise abzubilden
- Auswertung aller Messungen an der Bypassleitung
- Fortsetzung der Messungen an der Leitungen Europaviertel der NRM und der SWU
- Auswertung der Messungen an der Leitungen Europaviertel der NRM und der SWU
- Weitere Empfehlungen für Regelwerksbausteine des AGFW
- Entwicklung eines Eignungsprüfungsprozess/ AGFW-Zulassungsverfahrens für neuartige Bettungsmaterialien zu Beurteilung deren Eignung zum Einsatz in der Fernwärme
- Entwicklung von Verbundtechniken für Messglasfasern an KMR zur Erfassung von Dehnungen/ Verformungen und Temperatur an geraden KMR, Bögen und Dehnungsschenkeln
- Weiterentwicklung des ReSiST-Behälters zu einem praxistauglichen Versuchsbehälter und Standartversuch
- Zyklische kleinmaßstäbliche Durchschiebversuche im ReSiST zur Erfassung des Verhaltens für  $N > 100$ .
- Ermittlung des Kriech- und Relaxationsverhaltens von ZFSV im ReSiST auch Erwärmung der Modellrohre
- Ableitung von Parametern für die Bemessung von Fernwärmerohren.
- Modellrechnungen zur Überprüfung der Ansätze in den Berechnungsverfahren und zur Interpretation der Messergebnisse an der Bypassleitung und den Technikumsversuchen,
- Um die Messungen und daraus abgeleiteten Rückschlüsse auf die realen Bettungseigenschaften und Belastungen der Rohrleitungen verifizieren zu können ist

ein Rückbau der Leitung mit anschließender labortechnischen Untersuchung notwendig.

## 8 ZFSV – Auswirkungen allgemein und für die Fernwärme

### 8.1 Allgemeine Wahrnehmung/ Relevanz des Forschungsvorhabens

Aufgrund des großen Interesses mit dem dieses Forschungsvorhaben verfolgt wurde wird deutlich, dass das Potential des ZFSV, einen positiven Beitrag bei unterschiedlichen Fragestellungen zu leisten, sehr groß ist. Neben zahlreichen Gesprächen in Gremien und mit Mitgliedern des AGFW, wurde im Rahmen des Projektes auch zahlreiche Fachartikel veröffentlicht und Vorträge gehalten.

#### 8.1.1 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts

- [1] Wagner, B., Neidhart, T., Kudla, W. (06/2016): *Contact mechanical behaviour of Temporary Flowable, Selfcompacting Backfill material (TFSB)*, in Tamaskovics, Nandor(Hrsg.): Freiburger Forschungshefte. 9. Freiburger Geotechnik- Kolloquium 2016, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2016
- [2] Wagner, B., Neidhart, T. (02/2016): *Die axiale Bettung von KMR in ZFSV und Sand. Ein Vergleich mittels analytischer Lösung*, in IRO (Hrsg.): „Dumme Rohre“ - „Intelligente Netze“, Modelle, Simulation und Steuerung von Infrastrukturen. Tagungsband zum 30. Oldenburger Rohrleitungsforum, Vulkan, 2016
- [3] Wagner, B., Neidhart, T. (02/2016): Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung von ZFSV, Euroheat&Power, 45. Jg., Heft 1-2, S. 35- 39
- [4] Wagner, B., Neidhart, T., Gömmel, R. (01/2016): *Bodenmechanische Eigenschaften von ZFSV und zementbasierte Prognosemodelle zur Druckfestigkeitsentwicklung*, in Vogt, C.; Moormann, Ch. (Hrsg.): 10. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 2016
- [5] Wagner, B., Neidhart, T. (07/2014): Forschungsvorhaben EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung - Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe zur Kunststoffverbundmantelrohrverlegung, Arbeitspaket Bodenmechanik, in inixmedia GmbH im Auftrag von Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (Hrsg.): Forschungsbericht 2013, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 2014
- [6] Wagner, B Neidhart T., Siedentopf, W., Weidlich, 1., Schleyer, A. (12/2013): Extensometermesstechnik zur Qualitätssicherung der in ZFSV gebetteten Fernwärmeleitungen Euroheat&Power, 42. Jg., Heft 12, S. 35 - 39
- [7] Wagner, B. , Neidhart, T., Weidlich, 1., Schleyer, A. (10/2013): Kontaktverhalten von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen und PEHD Euroheat&Power, 42. Jg., Heft 10, S. 26- 29
- [8] Wagner, B. , Neidhart, T., Weidlich, 1., Schleyer, A. (09/2013): Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe zur KMR-Verlegung Euroheat&Power, 42. Jg., Heft 9, S. 54 - 56
- [9] Wagner, B. (02/2013): Europaviertel Frankfurt - Messkonzept zur Qualitätssicherung der in fließfähigen Verfüllmaterialien gebetteten Fernwärmeleitungen, in IRQ (Hrsg.): Rohrleitungen – im Zeichen des Klimawandels. Tagungsband zum 27. Oldenburger Rohrleitungsforum, Vulkan, 2013

## 8.1.2 Vorträge im Rahmen des Projekts

Tabelle 37: Vorträge, die die allgemeinen Auswirkungen von ZFSV thematisieren

Veranstaltung	Referentin/Referent	Vortragstitel
<b>Zweite Flüssigbodentagung Hochschule Regensburg 28.02./01.03.2016</b>	Diverse Projektpartner	-
<b>Dritte Flüssigbodentagung D-A-CH FH Nordwestschweiz 05.02./06.02.2015</b>	Diverse Projektpartner	-
<b>Forum Zukunft Bauen „Fließfähige Verfüllbaustoffe“ OTH Regensburg 10.03.2016</b>	Dipl.-Ing. Jana Simon Universität Kassel	Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) – nachhaltig und wirtschaftlich
<b>Forum Zukunft Bauen „Fließfähige Verfüllbaustoffe“ OTH Regensburg 10.03.2016</b>	Dr. Tomasz Magier Siemens AG	Flüssigboden als Mittel zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit neuer Energieübertragungs-strecken
<b>9. Freiburger Geotechnik-Kolloquium 2016, Freiberg</b>	Wagner, B.	Contact mechanical behaviour of Temporary Flowable, Self-compacting Backfill material (TFSB)
<b>Forum Zukunft Bauen „Fließfähige Verfüllbaustoffe“, InformationsZentrum Beton GmbH, Regensburg</b>	Wagner, B.	Refixierung und Druckfestigkeitsentwicklung von fließfähigen Verfüllmaterialien
<b>30. Oldenburger Rohrleitungsforum 2016, Oldenburg</b>	Wagner, B.	Die axiale Bettung von KMR in ZFSV und Sand – ein Vergleich mittels analytischer Lösung
<b>10. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern</b>	Wagner, B.	Bodenmechanische Eigenschaften von ZFSV und zementbasierte Prognosemodelle zur Druckfestigkeitsentwicklung
<b>3. Flüssigbodentagung D-A-CH, MuttENZ/ Schweiz</b>	Wagner, B.	Anmerkungen zum Refixierungs-/ Erhärtungsverhalten von Boden-Zement-Bentonit-Gemischen (BZBG)
<b>AGFW-Seminar „Interaktion Fernwärmerohr – Boden“, Weimar</b>	Wagner, B.	Einsatz von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterialien (ZFSV) im Fernwärmeleitungsbau
<b>2. Flüssigbodentagung D-A-CH, Regensburg</b>	Wagner, B.	(Mess- und Labortechnik zur) Untersuchung von Flüssigboden
<b>27. Oldenburger Rohrleitungsforum 2013, Oldenburg</b>	Wagner, B.	Europaviertel Frankfurt – Messkonzept zur Qualitätssicherung der in fließfähigen Verfüllmaterialien gebetteten Fernwärmeleitungen



## **8.2 Lösungsansätze zur Etablierung der ZFSV**

### **8.2.1 Problematik einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtungsweise**

Jede Fernwärmeleitungsbaumaßnahme ist von einer starken Individualität geprägt. Das heißt, Randbedingungen und Voraussetzungen variieren in einem Maße, dass es unmöglich erscheint, die Gesamtkosten aus volkswirtschaftlicher Sicht allgemein anwendbar darzustellen und mit Alternativen zu vergleichen. Grundlage derartiger Gegenüberstellungen kann nur ein konkretes Beispiel sein, da für die Ermittlung aller relevanten Kenngrößen eine Vielzahl präziser Eingangsdaten notwendig ist. Diese können jedoch nur vor dem Hintergrund örtlicher Verhältnisse erhoben werden. Hierzu bedarf es umfangreicher Vorstudien, unter Einbeziehung von Anwohnern, Geschäftseignern etc., der Zusammenarbeit mit zuständigen Straßen- und Tiefbauämtern, sowie Verkehrsbetrieben und Betreibern betroffener Fremdnetze (Köhler 1998).

Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Fernwärmenetzen können die positiven Langzeitauswirkungen, nach aktuellem Forschungsstand, nicht oder nur unzureichend belegt werden. Auch verlässliche Angaben über potentielle Risiken, die durch Witterungsbedingungen oder den anstehenden Boden auftreten können, sind nur auf Grundlage von in-situ-Untersuchungen möglich (I.Arsic & M. Liebscher 2009, S. 213).

Zur Quantifizierung der vermeidbaren Folgeschäden, durch bessere Bettungseigenschaften in ZFSV, fehlt es an Statistiken, die aufgetretene Straßenschäden den entsprechenden Ursachen zuordnen. Ein Rückschluss auf Schäden, die durch Fernwärmeleitungsbaumaßnahmen entstanden sind, ist daher nicht möglich. Die Schwierigkeit liegt darin, dass sichtbare Schäden oft erst Jahre später und häufig als Kombination verschiedener Einflüsse oder besonderer Witterungsbedingungen auftreten, was eine eindeutige Zuordnung erschwert oder unmöglich macht. Der Aufwand einer derartigen Erfassung ist umfangreich, bietet langfristig jedoch wichtige Erkenntnisse und Anregungen für ein volkswirtschaftlich optimiertes Handeln, das beispielsweise eine Anwendung von ZFSV forcieren würde (Kottmann 1987; Kiesselbach 1999).

### **8.2.2 Gesamtbewertung**

Tabelle 38 bietet eine überblicksartige Gesamtbewertung der Technologie, unter Berücksichtigung der vorangestellten Ausarbeitung. Sie richtet sich an Straßen- und Tiefbauämter, Netzbetreiber, Baufirmen, Umweltschutzbeauftragte und andere Personen, die Mitspracherecht bei Vergabe und Durchführung von Fernwärmeleitungsbauprojekten haben. Ziel soll sein, die Aufmerksamkeit auf die Potentiale und Vorteile der Technologie zu richten und dabei eine Sensibilität für eine weitsichtige Planung schaffen, bei der Qualität und Folgen solcher Eingriffe Berücksichtigung finden.

Der Bewertung liegen die genannten Erkenntnisse und gewisse Annahmen zu Grunde. Es wird zum einen davon ausgegangen, dass die Arbeiten von einem erfahrenen Bauunternehmen hochwertig ausgeführt werden und keine zeitlichen Lücken in der Baustellenorganisation entstehen. Zum anderen wird die notwendige Infrastruktur zur Errichtung einer mobilen Aufbereitungsanlage in Baustellennähe angenommen.

Aufgrund der großen Vielfalt an Einflussfaktoren ist die Wertung im Einzelfall zu hinterfragen und gegebenenfalls auf die individuelle Baumaßnahme anzupassen. Auf diese Weise können die Eignung und Potentiale des Verfahrens für den konkreten Anwendungsfall überprüft werden.

Tabelle 38: Auswirkungen des Einsatzes von ZFSV im Vergleich zur konventionellen Rohrgrabenverfüllung

	Kriterium	ZFSV - mip	ZFSV - mos
Planung	Trassenfindung (Flexibilität, Querung von Fremdleitungen, Unterführungen)	+	+
	Dauer der Baumaßnahme (Einschränkung Verkehrsführung und Geschäftstätigkeit)	+	+
	Materialkosten	--	--
	Tiefbaukosten	+	++
	Schutz sensibler Bausubstanz (Verlegung in eng bebauten Altstädten)	+	+
	Folgeschäden (Straßenoberfläche, FW- und Fremdleitungen)	+	+
Ausführung	Bettungseigenschaften (Verdichtung, Ausschwemmung, Wurzelschutz)	++	++
	Personalbedarf und Maschinenteknik	+	+
	Lebensdauer der KMR	+	+
	Wiederaushub (gegenüber Sand)	-	-
Sicherheit und Gesundheit	Gefahrenpotential	+	+
	Gesundheitsrisiken	+	+
	Akzeptanz (durch betroffene Anwohner, Geschäftsinhaber und Verkehrsbetriebe)	+	+
Ressourcenverbrauch	Natursand	+	+
	Deponieraum (inkl. Nachsorgekosten)	o	+
	Landschaftseingriff (Sandabbau, Homogenität des Bodens im Rohrgraben)	o	+
Emissionen	Schadstoffausstoß (Logistik , Maschinenteknik)	o	+
	Lärm (Geräuschemissionen durch Maschinenteknik)	+	+
	Vibration	++	++
	Staub	+	+

Einfluss: ++ / deutlich besser, + / besser, o / vergleichbar, - / schlechter, -- / deutlich schlechter

## 8.2.3 Muster einer gewichteten Bewertungsmatrix als Entscheidungsgrundlage

Damit bei der Planung von Fernwärmeleitungsbaumaßnahmen alle wichtigen Kriterien berücksichtigt werden, kann eine Entscheidungsmatrix, wie sie beispielhaft in Tabelle 39 dargestellt ist, zu Rate gezogen werden. Individuell können die Verantwortlichen eine Gewichtung der einzelnen Kriterien vornehmen, Punkte ergänzen oder auslassen, um ihre Entscheidung bei der Vergabe zu begründen und zu verantworten.

Tabelle 39: Muster für eine gewichtete Bewertungsmatrix als Entscheidungshilfe bei der Planung von Fernwärmeleitungsbaumaßnahmen

Nr.	Kriterium	Gewichtung (0 bis 10)	Erfüllungsgrad (0 bis 3)			
			konv.	Gesamt	ZFSV	Gesamt
1	Investitionskosten (Materialkosten, Tiefbaumaßnahmen)					
2	Trassenfindung (Flexibilität, Querung von Fremdleitungen, Unterführung)					
3	Ausführungsqualität (Bettungsqualität, Vermeidung von Straßenschäden)					
4	Dauer der Maßnahme (Einschränkung Verkehrsführung und Geschäftstätigkeit)					
5	Nachhaltigkeit (Abfallverwertung, Homogenität des Bodens)					
6	Schutz sensibler Bausubstanz (bspw. in dicht bebauten Altstädten)					
7	Ressourcenverbrauch (Natursand, Deponieraum, Landschaftseingriff)					
8	Emissionen (Lärm, Vibration, THG-Emissionen)					
Summe						

## 9 Lessons Learned – Durchführungsfazit

Das Forschungsvorhaben ließ sich zielgerichtet, effizient und erfolgreich abwickeln. Die Projektbeteiligten haben die Projektziele erreicht. Für zukünftige, inhaltlich oder im Aufbau ähnliche Forschungsvorhaben empfiehlt es sich, folgende Lessons Learned zu beachten:

- Zum Projektbeginn ist eine längere Vor- und Anlaufphase als zusätzliche Projektphase einzuplanen. Im Projekt musste man zweimal eine kostenneutrale Verlängerung beantragen. Folgende Punkte waren ursächlich:
  - Die Branchenbefragung dauerte länger als eingeplant. Diese diente dazu, vier relevante ZFSV auszuwählen. Die experimentellen Untersuchungen konnte man erst beginnen, nachdem man diese identifiziert hatte.
  - Die Voruntersuchungen dauerten länger als eingeplant. Diese dienten dazu, zwei ZFSV auszuwählen, um diese vertieft zu untersuchen.
    - Hier ist den Lieferanten mehr Zeit einzuräumen, um die Rezeptur zu erstellen.
    - Es ist ein längeres Zeitfenster einzuplanen, innerhalb dessen man einen gemeinsamen Mischtermin mit den jeweiligen Lieferanten plant und durchführt.
    - Die Lernkurve beim nachgelagerten Mischen ohne Lieferanten beanspruchte mehr Zeit, als gedacht.
    - Man benötigte mehr Zeit, um die sehr große Anzahl an Vorversuchen durchzuführen, zu dokumentieren und auszuwerten, als gedacht.
  - Die Planung und Genehmigung der Bypassleitung, die als Versuchstrecke keine Versorgungsaufgaben übernimmt, sondern eine reine Messstrecke ist, in einem städtebaulich anspruchsvollen Entwicklungsgebiet, wie dem Europaviertel in Frankfurt, nimmt wesentlich mehr Zeit in Anspruch, als die Planung einer vergleichbaren Versorgungsleitung. Die Leitung wurde zunächst ausführungsfähig im Tel-Aviv-Platz geplant, musste dann aber auf Veranlassung der Stadt Frankfurt umgeplant und im Römischen Ring gebaut werden.

In der Vor- und Anlaufphase lassen sich die oben genannten und weitere vorbereitende Arbeiten erledigen. Die Vor- und Anlaufphase kann man auch nutzen, um Literatur zu recherchieren und Randbedingungen von Versuchen zu optimieren.

- Viele Versuchsgeräte sind Einzelanfertigungen, Sondereinzelanfertigungen oder Kleinserien. Es kann schwierig sein oder lange dauern, diese zutreffend zu konfigurieren und produzierende Unternehmen zu finden.
- Material für Versuche ist bei der erstmaligen Anlieferung in einer großen Charge zu bevorraten, dass es für alle Versuche im Projekt ausreicht.
- Man hat mit Maßstabeffekten zwischen Laborversuchen, Technikumsversuchen und Feldversuchen zu rechnen. Sand und ZFSV wirken als Bettungsmaterial im Feldversuch grundsätzlich wie erwartet; die lang anhaltenden Kriechvorgänge beim ersten Anfahren, insbesondere im Sand, haben aber die Versuchsdauer signifikant erhöht.

Dies verlängerte die Beobachtungszeiten.

- Mit der Extensometermesstechnik kann man sehr gut erfassen, wie sich die Leitung verschiebt. Für zukünftige Messstrecken empfiehlt es sich, den ersten Messpunkt in der Verfüllung näher als die hier gewählten vier Meter beziehungsweise so nah wie möglich an das freie Leitungsende zu setzen.
- Der Festpunkt war in der Versuchsstrecke Römischer Ring erforderlich, weil nur eine Trassenlänge von 41 m zur Verfügung stand, in der sich kein Haftbereich bilden kann. Den Festpunkt hat man so im Untergrund installiert, dass er sich trotz der in ihn eingeleiteten horizontalen Kräfte nicht verschiebt. Die Messergebnisse zeigen aber, dass Schwinden des Materials und thermische Dehnungen des Materials die Kraftmessungen in geringem Umfang beeinflussen. Zukünftige Messstrecken sollten auf größerer Länge ohne Festpunkt installiert werden.

Im Betrieb und der Überwachung der Messstelle lassen sich immer wieder Optimierungspotentiale feststellen, die vor allem die Wartung und Fehleridentifikation vereinfachen würden.

- Der Schacht ist aufgrund der Positionierung unter dem Fahrradweg mit einem stabilen Schachtdeckel ausgerüstet. Neben dem Gewicht verzögert vor allem die Lage und die deshalb notwendige Absicherung jeden Wartungsgang.
- Beleuchtung und Steckdosen im Schacht könnten vor allem im Winter die Arbeit vereinfachen.
- Die einzelnen Messsensoren sollten nach Möglichkeit für kleinere Wartungsarbeiten erreichbar sein. Bei der Bypassleitung sind die Sensoren nicht mehr zu erreichen ohne erneut aufzugraben. Kabelbrüche, Kurzschlüsse usw. können dadurch kaum detektiert oder behoben werden.
- Die Auslegung der Hydraulik muss für ähnliche Anforderungen optimiert werden, da das Mischventil sich überwiegend in Zuständen befindet die außerhalb seines idealen Regelbereichs liegen. Die Konsequenz sind häufigere Regeleingriffe die zu „Schwingungen“ bei der Soll-Wert-Vorgabe führen.
- Durch noch intensivere automatisierte Überwachung ließe sich die Zeit und Häufigkeit von vor Ort Einsätzen deutlich reduzieren.
- Die passive Belüftung der Messschächte scheint keinen signifikanten Einfluss auf das Vorkommen von Tauwasser zu haben.
- Eine koordinierte Inbetriebnahme mit den Beteiligten Herstellern und Lieferanten der Messtechnik hat sich in diesem Projekt bewährt. Dadurch wird beispielsweise sichergestellt, dass alle Offsets erfasst und die Sensoren ausreichend getestet werden.

## 10 Schlussfazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte in einem breit angelegten Versuchsprogramm der Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohren, sowohl in kleinmaßstäblichen Durchschiebversuchen als auch in maßstäblichen Großversuchen, systematisch untersucht werden. Die Ergebnisse sind dabei allgemeiner Natur und lassen sich für ZFSV im Graben und in Haubenkanälen anwenden.

Durch die Versuchsstrecke „Bypassleitung“, die keinerlei Versorgungsaufgaben übernimmt und nur für die Messungen gebaut wurde, konnten die unterschiedlichen Dehnungsbehinderungen von Sand und ZFSV unter ansonsten identischen Verlege- und Betriebsbedingungen verglichen werden. Durch Verzögerungen im Genehmigungsprozess der Baumaßnahme im öffentlichen Raum konnte bis zum Projektende nur das erstmalige Hochfahren auf 90 °C und das Halten dieser Temperatur messtechnisch erfasst werden. Es wird angestrebt, in einem Folgeprojekt weitere fernwärmetyperische Betriebstemperaturen und Temperaturlastzyklen zu erreichen und messtechnisch zu erfassen.

Die Zeit zwischen der Verfüllung der Leitungszone mit ZFSV und dem ersten Anfahren der Leitung sollten in der Regel mindestens 28 Tage betragen, da sich ab diesem Zeitpunkt das Materialverhalten sich nicht mehr so stark verändert. Die Geschwindigkeit der weiteren Festigkeitsentwicklung ist nach 28 Tagen relativ gering. Sollten Zeitpunkte vor 28 Tage für die Untersuchungen relevant sein, müssen die Veränderungen der Materialeigenschaften und insbesondere die Festigkeitsentwicklung während der langen Versuchsdauer über Tage ggf. Wochen bei der Versuchskonzeption und Ergebnisauswertung berücksichtigt werden; dies muss vorab durch Eignungsprüfungen belegt werden.

Dem ersten Anfahren der in ZFSV gebetteten KMR-Leitung kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier die Dehnungsbehinderung besonders hoch ist. Die experimentell abgesicherte Kurzzeitscherfestigkeit des PUR-Hartschaumstoffs bei 130 °C von 0,110 MPa darf dabei nicht überschritten werden. Dazu lassen sich (gemäß Tabelle 36) in Abhängigkeit des jeweiligen DN Mediumrohrdurchmessers und Außendurchmessers  $D_a$  des Mantelrohrs entsprechende maximal zulässige Dehnungswiderstände zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr angeben (z.B. 0,052 MPa bei DN 65 und Dämmreihe 2).

Nach Überwindung dieser Adhäsionsspitze stellt sich ein Plateauwert der Dehnungsbehinderung ein, der sich bereits nach wenigen Belastungszyklen kaum mehr ändert und ca. 15 % bis 25 % des maximalen Dehnungswiderstands bei der Erstverschiebung beträgt. Diese Plateauwerte für die Zustände „warm“ und „kalt“ stellen die Dehnungswiderstände für den Langzeitbetrieb dar. Die Obergrenze der Dehnungsbehinderung für den Langzeitbetrieb darf die Auslegungsscherfestigkeit des PUR-Schaumstoffs von 0,04 MPa nicht überschreiten. Dazu lassen sich (gemäß Tabelle 35) in Abhängigkeit von der jeweiligen Mediumrohr DN und  $D_a$  Mantelrohr nach derzeitigen Kenntnisstand entsprechende maximal zulässige Dehnungswiderstände zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr angeben (z.B. 0,020 MPa bei DN 80 und Dämmreihe 2).

Für die Untergrenze der Dehnungsbehinderung gilt, dass sie nicht niedriger als die Reibung bei Sandbettung sein sollte. Dies ist nicht mit einem pauschalen Wert beschreibbar, sondern hängt von dem Verhältnis Mantelrohrdurchmesser/ Mediumrohrdurchmesser, von der Überdeckungshöhe und von einem möglichen Grundwasserstand ab.

Die Projektpartner stellten zum Abschluss des Projektes, nach Auswertung aller Versuche und Erkenntnisse fest, dass ZFSV (mit entsprechenden Eignungsnachweisen) auch im

Grundwasser, bei richtiger Rezeptur und fachgerechter Anwendung, die erforderlichen Reibkräfte dauerhaft auf das KMR übertragen kann. Voraussetzungen dafür sind nach derzeitigen Kenntnisstand, dass durch geeignete Maßnahmen (z. B. eine Grundwasserabsenkung) sichergestellt wird, dass die ZFSV in einen wasserfreien Graben eingebracht wird und in den ersten 24 Stunden keine Einwirkung von Grundwasser auftritt.

Die Herausforderung an die Rezeptur von ZFSV zur Bettung von Fernwärmeleitungen besteht darin, einerseits den maximal zulässigen Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr beim ersten Anfahren nicht zu überschreiten und andererseits im Langzeitbetrieb die Untergrenze der Dehnungsbehinderung nicht zu unterschreiten. Hierzu werden entsprechende Eigenüberwachungen und Kontrollprüfungen vorgeschlagen. Diese sind in Abschnitt 6 dieses Berichts beschrieben. In Anlehnung an (H ZFSV 2012) werden im Textentwurf des „Ausschreibungstextes für den Einsatz von ZFSV im Fernwärmerohrleitungsbau“ (Anlage 16) notwendigen Prüfungen aufgeführt (eine abgestimmte Tabelle erscheint im öffentlichen Schlussbericht; die aus dem Projekt entstandenen Anpassungen sind am Ende von Abschnitt 6.3 zu finden).

Die zahlreichen bautechnischen und wirtschaftlichen Vorteile und Potentiale von ZFSV (siehe Abschnitt 1.3) gegenüber Sand sind aufgrund der starken Individualität von Fernwärmeleitungsbaumaßnahmen nicht allgemeingültig. Die Auswirkungen des Einsatzes von ZFSV im Vergleich zur konventionellen Rohrgrabenverfüllung sind in Tabelle 38 zusammenfassend dargestellt. Tabelle 39 zeigt eine Möglichkeit einer Gesamtbewertung mit Hilfe einer gewichteten Bewertungsmatrix, die für das jeweilige Vorhaben individuell anzupassen ist.

Nach den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens ist ZFSV für den Fernwärmeleitungsbau mit KMR geeignet und birgt im individuellen Anwendungsfall diverse Vorteile gegenüber der konventionellen Verlegetechnik mit Sand. Der Qualitätssicherung und dem richtigen Baustellenablauf ist dabei besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da die Eigenschaften von ZFSV nicht nur von der Zusammensetzung sondern auch von der Zeit abhängen. Durch die weitere Untersuchung und Auswertung der im Rahmen des Projektes errichteten Versuchsstrecke „Bypassleitung“ und deren anschließenden Rückbau kann das Wissen bezüglich Einsatzgrenzen und Langlebigkeit noch erweitert werden.

# Formelverzeichnis

FORMEL 1: ABSCHÄTZUNG DES RUHEDRUCKBEIWERTS: .....	17
FORMEL 2: SCHERGESETZ FÜR DIE KONTAKTFUGE.....	18
FORMEL 3:BERECHNUNG DES FESTIGKEITZUWACHSES $F_z$ .....	40
FORMEL 4: BERECHNUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIFKEIT .....	41
FORMEL 5: BERECHNUNG DER DRUCKSPANNUNG .....	60
FORMEL 6: BERECHNUNG DES STEIFEMODULS $E_s$ ALS SEKANTENMODUL .....	61
FORMEL 7: VERHÄLTNIS DER BEZOGENEN ZUSAMMENDRÜCKUNG.....	64
FORMEL 8: BERECHNUNG DER SCHERSPANNUNG IM GRENZZUSTAND (ENTWÄSSERN).....	69
FORMEL 9: BERECHNUNG DER SCHERSPANNUNG IM GRENZZUSTAND (NICHT ENTWÄSSERN).....	70
FORMEL 10: BERECHNUNG DES ERDRUHEDRUCKBEIWERTS.....	70
FORMEL 11: BERECHNUNG DER TANGENTIALEN REAKTIONSSPANNUNG AM ROHR .....	70
FORMEL 12: BERECHNUNG DES REIBUNGSKOEFFIZIENTEN .....	71
FORMEL 13: DER HYDROSTATISCHE HAUPTSPANNUNGSZUSTAND .....	71
FORMEL 14: TOTALE UND EFFEKTIVE HAUPTSPANNUNGEN .....	71
FORMEL 15: MITTLERE KONTAKTWIDERSTANDSSCHUBSPANNUNG $\tau_R$ .....	88
FORMEL 16: MITTLERE NORMALSPANNUNG $\sigma'_N$ AUF DEN IM VERSUCHSKASTEN EINBAUTEN KMR.....	109
FORMEL 17: KORREKTUR DER ZEIT- UND DRUCKABHÄNGIGKEIT.....	109
FORMEL 18: BERECHNUNG DER WÄRMEDEHNUNG .....	117
FORMEL 19: BERECHNUNG DER MAX. ZU ERWARTENDEN AXIALKRAFT AUFGRUND VON WÄRMEDEHNUNG	123
FORMEL 20: UMRECHNUNG DER GEMESSEN LÄNGENÄNDERUNG IN ÄNDERUNG DES DURCHMESSERS.....	131
FORMEL 21: BERECHNUNG DER UNBEHINDERTEN TEMPERATURDEHNUNG .....	138
FORMEL 22: BERECHNUNG DER NORMALKRAFT IM STAHLMEDIUMROHR .....	138
FORMEL 23: BERECHNUNG DER AUFTRIEBSKRAFT PRO M ROHR .....	148
FORMEL 24: GEWICHTSKRAFT PRO M ROHR .....	149
FORMEL 25: BERECHNUNG DER VOM ROHR ERTRAGBAREN MAXIMALKRAFT .....	149
FORMEL 26: BERECHNUNG DER MAXIMAL ZULÄSSIGEN LÄNGE.....	150
FORMEL 27:SPANNUNGSBERECHNUNG AUF DER WIRKSAMEN FLÄCHE .....	150



# Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: PRODUKT A – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	33
TABELLE 2: PRODUKT B – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	34
TABELLE 3: PRODUKT C-ST – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	35
TABELLE 4: PRODUKT C-GT – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	36
TABELLE 5: PRODUKT C-TL – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	36
TABELLE 6: PRODUKT D-ST – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	37
TABELLE 7: PRODUKT D-GT – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	37
TABELLE 8: PRODUKT D-TL - – BESTANDTEILE, ZUSAMMENSETZUNG UND AUSGEWÄHLTE KENNWERTE .....	38
TABELLE 9: ÜBERSICHT DURCHGEFÜHRTE VORUNTERSUCHUNGEN .....	38
TABELLE 10: VERSUCHSPROGRAMM EINDIMENSIONALES LAST-VERFORMUNGSVERHALTEN .....	63
TABELLE 11: BELASTUNGSPLAN EINDIMENSIONALES LAST-VERFORMUNGSVERHALTEN .....	63
TABELLE 12: SPANNUNGSINTERVALL/LASTSTUFEN 25-50 KPA G .....	68
TABELLE 13: VERSUCHSPROGRAMM SCHERFESTIGKEIT TRIAXIALVERSUCH .....	74
TABELLE 14: SCHERFESTIGKEIT TRIAXIALVERSUCH - SCHERFESTIGKEITSPARAMETER .....	75
TABELLE 15: VERSUCHSPROGRAMM $K_0$ -VERSUCHE .....	79
TABELLE 16: VERSUCHSERGEBNISSE $K_0$ -WERTE .....	80
TABELLE 17: CRPV – VERSUCHSPROGRAMM ZEIT-REIHEN ZR .....	86
TABELLE 18: CRPV – VERSUCHSPROGRAMM RADIALDRUCK-REIHEN RR .....	86
TABELLE 19: ÜBERSICHT ÜBER DIE DIMENSIONEN DER IM GROßVERSUCH EINGESETZTEN KMR, .....	101
TABELLE 20: ZUSAMMENSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE FÜR PRODUKT A. ....	108
TABELLE 21: ZUSAMMENSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE FÜR PRODUKT C-ST* .....	113
TABELLE 22: ANGESETZTE PARAMETER FÜR DIE BERECHNUNG / VORAUSLEGUNG DER MESSSTRECKE .....	117
TABELLE 23: DEHNUNGSBEHINDERUNG BEI VERSCHIEDENEN NENNWEITEN .....	118
TABELLE 24: ANNAHMEN ZUR VERSUCHSSTRECKE .....	121
TABELLE 25: ERGEBNISSE DER SISKMR BERECHNUNG FÜR KMR-LEITUNG DN 40/125 .....	122
TABELLE 26: ANNAHMEN ZUR BERECHNUNG DER MAXIMALEN AXIALKRAFT .....	123
TABELLE 27: AUSGEWÄHLTE RECHNERISCHE UND GEMESSENE WERTE DER VERSCHIEBUNG .....	138
TABELLE 28: AUSGEWÄHLTE RECHNERISCHE UND GEMESSENE WERTE DER NORMALKRAFT .....	138
TABELLE 29: GEMESSENE UND BERECHNETE VERSCHIEBUNGEN .....	142
TABELLE 30: RESULTIERENDE PUR-SCHERSPANNUNGEN .....	142
TABELLE 31: ANNAHMEN ZUR BERECHNUNG DER AUFTRIEBSKRAFT VARIANTE B: .....	149
TABELLE 32: ANNAHMEN ZUR BESTIMMUNG DER GEWICHTSKRAFT PRO M ROHR .....	149
TABELLE 33: RELEVANTE GRÖßEN ZUR BESTIMMUNG DES ABSTANDES ZWISCHEN AUFTRIEBSICHERUNGEN ..	149
TABELLE 34: MERKMALE DER QUALITÄTSANFORDERUNGEN .....	154
TABELLE 35: MAXIMAL ZULÄSSIGE DEHNUNGSBEHINDERUNG FÜR DEN LANGZEITBETRIEB .....	161
TABELLE 36: MAXIMAL ZULÄSSIGE DEHNUNGSBEHINDERUNG FÜR DAS ERSTE ANFAHREN .....	161
TABELLE 37: VORTRÄGE, DIE DIE ALLGEMEINEN AUSWIRKUNGEN VON ZFSV THEMATISIEREN .....	166
TABELLE 38: AUSWIRKUNGEN DES EINSATZES VON ZFSV .....	168
TABELLE 39: MUSTER FÜR EINE GEWICHTETE BEWERTUNGSMATRIX .....	169

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ANGENOMMENE SPANNUNGSVERTEILUNG AM ROHR NACH AGFW FW 401 .....	18
ABBILDUNG 2: PROZENTUALE ÜBERSICHT BEREITS VERWENDETER ZFSV .....	21
ABBILDUNG 3: KRITERIEN FÜR DEN VERSTÄRKTEN EINSATZ VON ZFSV .....	22
ABBILDUNG 4: HERSTELLUNG VON ZFSV UND HERKUNFT DES AUSGANGSMATERIALS IN ANLEHNUNG AN .....	28
ABBILDUNG 5: KORNVORTEILUNGSKURVEN DER AUSGANGSBÖDEN FÜR MOS-ZFSV. ....	31
ABBILDUNG 6: PRODUKT A - PRÜFUNG AUSBREITMAß.....	33
ABBILDUNG 7: PRODUKT B – PRÜFUNG AUSBREITMAß.....	34
ABBILDUNG 8: PRODUKT C-ST – PRÜFUNG AUSBREITMAß .....	35
ABBILDUNG 9: PRODUKT C-GT – PRÜFUNG AUSBREITMAß .....	36
ABBILDUNG 10: PRODUKT C-TL – PRÜFUNG AUSBREITMAß .....	37
ABBILDUNG 11: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERFESTIGUNGSVERLAUFS .....	39
ABBILDUNG 12: VERSUCHSAUFBAU ZUR ERMITTLUNG VON $Q_U$ .....	41
ABBILDUNG 13: PRODUKT A – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 113 D .....	43
ABBILDUNG 14: PRODUKT A – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 113 D .....	43
ABBILDUNG 15: PRODUKT A – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 113 D .....	44
ABBILDUNG 16: PRODUKT B – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 225 D.....	45
ABBILDUNG 17: PRODUKT B – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 225 D .....	45
ABBILDUNG 18: PRODUKT B – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 225 D .....	46
ABBILDUNG 19: PRODUKT B – WASSERABSONDERUNG (BLUTEN) NACH ETWA 24 H .....	47
ABBILDUNG 20: PRODUKT B – ALTER 7 D, ERDFEUCHTES SYSTEM – MISSLUNGENER DOSENAUSBAU .....	47
ABBILDUNG 21: PRODUKT B –DURCH LEICHTEN HÄNDISCHEN DRUCK ZERSTÖRTE PROBE .....	48
ABBILDUNG 22: PRODUKT C-ST – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 115 D.....	48
ABBILDUNG 23: PRODUKT C-ST – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 115 D.....	49
ABBILDUNG 24: PRODUKT C-ST – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 115 D .....	49
ABBILDUNG 25: PRODUKT C-GT – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 115 D .....	50
ABBILDUNG 26: PRODUKT C-GT – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 115 D .....	50
ABBILDUNG 27: PRODUKT C-GT – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 115 D.....	51
ABBILDUNG 28: PRODUKT C-TL – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 115 D.....	52
ABBILDUNG 29: PRODUKT C-TL – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 115 D.....	52
ABBILDUNG 30: PRODUKT C-TL – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 115 D.....	52
ABBILDUNG 31: PRODUKT D-ST – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	53
ABBILDUNG 32: PRODUKT D-ST – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	54
ABBILDUNG 33: PRODUKT D-ST – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	54
ABBILDUNG 34: PRODUKT D-GT – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 112 D.....	55
ABBILDUNG 35: PRODUKT D-GT – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	55
ABBILDUNG 36: PRODUKT D-GT – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	56
ABBILDUNG 37: PRODUKT D-TL – ENTWICKLUNG VON $Q_U$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	56
ABBILDUNG 38: PRODUKT D-TL – ENTWICKLUNG VON $\rho_F$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	57
ABBILDUNG 39: PRODUKT D-TL – ENTWICKLUNG VON $W$ BIS ZUM ALTER VON 112 D .....	57
ABBILDUNG 40: ABSCHICHTUNGSVERFAHREN IM PROJEKT.....	59
ABBILDUNG 41: KOMPRESSIONSGERÄT.....	60
ABBILDUNG 42: TYPISCHER VERSUCHSVERLAUF UND ERGEBNISDARSTELLUNG .....	61
ABBILDUNG 43: PRINZIP DER ERMITTLUNG VON $E_s$ ALS SEKANTENMODUL.....	61
ABBILDUNG 44: MEHRPHASEN-SYSTEM BODEN ODER ZFSV.....	62
ABBILDUNG 45: SETZUNGSARTEN ÜBER DIE ZEIT.....	62
ABBILDUNG 46: DRUCK-STAUCHUNGSDIAGRAMM AUSGANGSBODEN ST* .....	65
ABBILDUNG 47: DRUCK-STAUCHUNGSDIAGRAMM PRODUKT C-ST .....	65
ABBILDUNG 48: DRUCK-STAUCHUNGSDIAGRAMM PRODUKT A; PROBENALTER 7 D .....	66
ABBILDUNG 49: DRUCK-STAUCHUNGSDIAGRAMM PRODUKT A; PROBENALTER 28 D .....	66

ABBILDUNG 50: LASTSTUFE 50 KPA - ZEIT-SETZUNGS-DIAGRAMM TL .....	67
ABBILDUNG 51: LASTSTUFE 200 KPA - ZEIT-SETZUNGS-DIAGRAMM ST* .....	67
ABBILDUNG 52: PRINZIPSKIZZE EINES TRIAXIALGERÄTES. ....	72
ABBILDUNG 53: : BODENELEMENT IM BRUCHZUSTAND .....	72
ABBILDUNG 54: SCHERFESTIGKEIT AUSGANGSBÖDEN UND SCHERFESTIGKEIT ZFSV IM ALTER > 28 D .....	76
ABBILDUNG 55: ZFSV - ZEITLICHE ENTWICKLUNG VON $C_u$ (UU-VERSUCH) .....	77
ABBILDUNG 56: ZEITLICHE ENTWICKLUNG VON $K_{0,V}$ UND $K_{0,N}$ FÜR PRODUKT A UND PRODUKT C-ST .....	81
ABBILDUNG 57: STARR-PLASTISCHER UND ELASTISCH-PLASTISCHER REIBUNGSANSATZ .....	82
ABBILDUNG 58: MODIFIZIERTER SCHERVERSUCH FÜR KONTAKTMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN .....	83
ABBILDUNG 59: PRINZIP RE-SIST UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	84
ABBILDUNG 60: PRODUKT A –NACH DEM VERSUCH AUSGEBAUTER UND ZERLEGTER PROBEKÖRPER .....	87
ABBILDUNG 61: PRODUKT C-ST –NACH DEM VERSUCH AUSGEBAUTER UND ZERLEGTER PROBEKÖRPER .....	87
ABBILDUNG 62: Z1 RIA: WKL ZR 1 FÜR PRODUKT A (LINKS) UND PRODUKT C-ST (RECHTS) .....	88
ABBILDUNG 63: Z1 RIA: WKL ZR 2 FÜR PRODUKT A (LINKS) UND PRODUKT C-ST (RECHTS) .....	89
ABBILDUNG 64: Z1 RIA: WKL ZR 1 FÜR PRODUKT C-GT (LINKS) UND PRODUKT C-TL (RECHTS) .....	89
ABBILDUNG 65: Z1 RIA: WKL RR 1 FÜR PRODUKT A (LINKS) UND PRODUKT C-ST (RECHTS) .....	90
ABBILDUNG 66: Z1 RIA: ZR 1 UND ZR 2 PRODUKT A - $F_{PEAK}$ UND $F_{S/D=1,5}$ - ALLE PROBEN .....	91
ABBILDUNG 67: Z1 RIA: ZR 1, ZR 2 UND ZR 3 PRODUKT C-ST - $F_{PEAK}$ UND $F_{S/D=1,5}$ - ALLE PROBEN .....	91
ABBILDUNG 68: Z1 RIA: ZR 1 PRODUKT C-GT UND PRODUKT C-TL - $F_{PEAK}$ UND $F_{S/D=1,5}$ - ALLE PROBEN .....	92
ABBILDUNG 69: Z1 RIA: RR 1 PRODUKT A UND PRODUKT C-ST - $F_{PEAK}$ UND $F_{S/D=1,5}$ – ALLE PROBEN .....	92
ABBILDUNG 70: Z1 RIB: WKL RR 1 FÜR PRODUKT A UND PRODUKT C-ST– ALLE PROBEN .....	93
ABBILDUNG 71: Z1 RIB: RR 1 PRODUKT AUND PRODUKT C-ST - $F_{PEAK}$ UND $F_{S/D=1,5}$ – ALLE PROBEN .....	93
ABBILDUNG 72: IDEALISIERTE TRILINEARE KWAL FÜR ZFSV – ERSTBELASTUNG .....	95
ABBILDUNG 73: GRAPHISCHER VERGLEICH DER LINEAR IDEALISIERTEN KWAL VON ZFSV UND SAND .....	96
ABBILDUNG 74: SCHALUNGSKASTEN TECHNIKUMSVERSUCH – PRINZIP .....	97
ABBILDUNG 75: VERSUCHSVORBEREITUNG - BLICK AUF DEN VERSUCHSKASTEN VON VORNE.....	99
ABBILDUNG 76: VERSUCHSVORBEREITUNG - BLICK AUF DEN VERSUCHSKASTEN VON DER SEITE .....	99
ABBILDUNG 77: BLICK IN DEN VERSUCHSKASTEN MIT LAGEGESICHERTEN KMR.....	100
ABBILDUNG 78: BLICK IN DEN VERSUCHSKASTEN BEI DER VERFÜLLUNG MIT DEM PRODUKT C-ST .....	100
ABBILDUNG 79: HYDRAULISCHE PRESSE MIT ROHRANSCHLUSS UND HEIZUNGSANLAGE.....	100
ABBILDUNG 80: PRINZIPIELLER VERSUCHSAUFBAU MIT MESSTECHNIK .....	103
ABBILDUNG 81: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 40 IN PRODUKTS A IM ZYKLUS 1 RICHTUNG A .....	104
ABBILDUNG 82: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 40 IN PRODUKT A MIT DEN ZYKLEN 1A BIS 3B .....	105
ABBILDUNG 83: ENTWICKLUNG VON $T_{R,MAX}$ UND $T_{R,PL}$ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZYKLENANZAHL N .....	106
ABBILDUNG 84: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 300 IN PRODUKT A IN ZYKLUS 1 RICHTUNG A. ....	107
ABBILDUNG 85 KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 300 IN PRODUKT A MIT DEN ZYKLEN 1A BIS 2B. ....	108
ABBILDUNG 86: $T^*_{R,MAX}$ UND $T^*_{R,PL}$ IN ABHÄNGIGKEIT DES KMR- AUßENROHRDURCHMESSERS.....	110
ABBILDUNG 87: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 80 IN PRODUKT C-ST* IM ZYKLUS 1 RICHTUNG A. ....	111
ABBILDUNG 88: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 20 IN PRODUKT C-ST* MIT DEN ZYKLEN 1A. ....	111
ABBILDUNG 89: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KMR DN 40 IN PRODUKT C-ST* MIT DEN ZYKLEN 1A BIS 4B. ...	112
ABBILDUNG 90: ENTWICKLUNG VON $T_{R,MAX}$ UND $T_{R,PL}$ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZYKLENANZAHL N .....	112
ABBILDUNG 91: $T^*_{R,MAX}$ UND $T^*_{R,PL}$ IN ABHÄNGIGKEIT DES KMR- AUßENROHRDURCHMESSERS .....	114
ABBILDUNG 92: MÖGLICHE GRABENPROFILE.....	119
ABBILDUNG 93: RAD- UND GEHWEG RÖMISCHER RING .....	120
ABBILDUNG 94: VERSUCHSSTRECKE ZWISCHEN FESTPUNKT UND MESSSCHACHT .....	120
ABBILDUNG 95: GRABENPROFIL VERSUCHSSTRECKE RÖMISCHER RING.....	121
ABBILDUNG 96: R+I SCHEMA DER ANBINDUNG MESSSTRECKE .....	122
ABBILDUNG 97: AUSLEGUNGSVARIANTEN OHNE UND MIT FESTPUNKT .....	123
ABBILDUNG 98: VERSUCHSSTRECKE AM FESTPUNKT UND ANBINDESCHACHT MIT REGELVENTILEN .....	124
ABBILDUNG 99: EINBINDUNG DER KRAFTMESSDOSE ZWISCHEN KMR-LEITUNG UND WIDERLAGER.....	125
ABBILDUNG 100: WEGAUFNEHMER MESSSCHACHT .....	126

ABBILDUNG 101: ERDFESTPUNKT UND ANBINDESCHACHT .....	126
ABBILDUNG 102: MESSSTRECKE VOR DEM VERGUSS MIT ZFSV .....	127
ABBILDUNG 103: ZFSV-VERGUSS IM BEREICH EINER AUFTRIEBSSICHERUNG) .....	127
ABBILDUNG 104: SCHEMATISCHER LÄNGSSCHNITT DER MESSSTRECKE .....	128
ABBILDUNG 105: KRAFTMESSDOSEN AM FESTPUNKT .....	129
ABBILDUNG 106: ANKERPUNKT EXTENSOMETER AM KMR UND GLASFASERSEELE IN SCHUTZHÜLLE .....	130
ABBILDUNG 107:EXTENSOMETERKOPF UND FESTPUNKT IM MESSSCHACHT .....	130
ABBILDUNG 108: LVDT IM MESSSCHACHT.....	131
ABBILDUNG 109: RADIALMESSESENSOR .....	131
ABBILDUNG 110: SENSORANORDNUNG MESSQUERSCHNITT .....	132
ABBILDUNG 111: ANORDNUNG DER EXTENSOMETER .....	133
ABBILDUNG 112. PHASE 0: BEIM ANFAHREN .....	133
ABBILDUNG 113: PHASE 1: TEMPERATUR WIRD GEHALTEN .....	135
ABBILDUNG 114: BEZEICHNUNG DER LVDT-MESSSTELLEN IM MESSSCHACHT .....	136
ABBILDUNG 115: MESSWERTE EXTENSOMETER 4 M UND LVDT MESSSCHACHT FÜR DIE ERSTEN 24 H .....	136
ABBILDUNG 116: MESSWERTE EXTENSOMETER 4 M UND LVDT MESSSCHACHT FÜR DIE ERSTEN 22 D .....	137
ABBILDUNG 117: MAßGEBLICHE VERSCHIEBUNGEN .....	141
ABBILDUNG 118: TYPISCHER VERLAUF EINER ZEITRAFFENDEN ALTERUNG .....	144
ABBILDUNG 119: PLATEAUNIVEAU IN ABHÄNGIGKEIT DER ALTERUNGSTEMPERATUR.....	144
ABBILDUNG 120: AUF DAS KMR WIRKENDE KRÄFTE UNTER AUFTRIEB .....	148
ABBILDUNG 121: STAHLTRÄGER MIT BIG PACKS FÜR AUFTRIEBSSICHERUNG .....	150
ABBILDUNG 122: HÖHENJUSTIERBARE AUFTRIEBSSICHERUNG .....	151
ABBILDUNG 123: GRABENVERFÜLLUNG MIT ZFSV .....	152
ABBILDUNG 124: ZIEHEN DES GRABENVERBAUS NACH VERFÜLLUNG .....	152

## Literaturverzeichnis

**AGFW Arbeitsblatt FW 401 - Teil: 2**, 12/2007: Teil 2: Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze - Systembeschreibung. AGFW| Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte, KWK e.V.

**AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 10**, 12/2007: Teil 10: Statische Auslegung; Grundlagen der Spannungsermittlung. AGFW| Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte, KWK e.V.

**AGFW Arbeitsblatt FW 401- Teil: 12**, 12/2007: Teil 12: Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze - Bau und Montage; Organisation der Bauabwicklung; Tiefbau. AGFW| Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte, KWK e.V.

**AGFW Arbeitsblatt FW 401**, 12/2007: Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze. AGFW| Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte, KWK e.V.

**Arsic, Igor (2009)**: Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Online verfügbar unter [http://www.gbv.de/dms/weimar/toc/615410502\\_toc.pdf](http://www.gbv.de/dms/weimar/toc/615410502_toc.pdf), zuletzt geprüft am 06.02.2017.

**ATV-DVWK-A 127 (2000)**: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen. 3. Aufl., Stand: August 2000. Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V (ATV-DVWK-Regelwerk, A 127).

**BmJV (2012)**: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG, vom 24.02.2012, zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Büchau, Andreas; Pareidt, Holger; Liebermann, André (2004)**: Ansätze zur innovativen Sanierung von Kanälen. Einsatz von KMR in bestehenden Kanälen. In: Euro Heat & Power 33 (3), S. 68–76, zuletzt geprüft am 21.02.2017.

**DIN 18121-1:1998-04**: Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung (Zurückgezogen, ersetzt durch DIN EN ISO 17892-1:2015-03).

**DIN 18127:2012-09**: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch.

**DIN 18135:2012-04**: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch.

**DIN 18136:2003-11**: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch.

**DIN 18196:2011-05**: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

**DIN 18300:2016-09**: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Erdarbeiten.

**DIN 4094-4:2002-01**: Baugrund - Felduntersuchungen - Teil 4: Flügelscherversuche.

**DIN 4124:2012-01**: Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten.

**DIN EN 12350-5:2009-08**: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß;

**DIN EN 13480-3:2014-12**: Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 3: Konstruktion und Berechnung.

**DIN EN 13941:2010-12:** Auslegung und Installation von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme.

**DIN EN 253:2015-12:** Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Verbund-Rohrsystem, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen.

**DIN EN 489:2009-07:** Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkterdverlegte Fernwärmenetze - Rohrverbindungen für Stahlmediumrohre mit Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen. Online verfügbar unter <http://www.beuth.de/de/fachgebiete/maschinenbau/fachdaten-einzelsicht/wdc-beuth:din21:112126765/toc-1474797/download>, zuletzt geprüft am 10.02.2017.

**Entwurf DIN EN ISO 17892-6:2015-02:** Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 6: Fallkegelversuch.

**Feickert, Rudolf (2008):** bi-UmweltBau\_4-08\_Internet.indd. In: bi UmweltBau (4), S. 33–36, zuletzt geprüft am 01.02.2017.

**Fuhrmann, H. (2013):** Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Verdichtungsarbeiten mit handgeführten Geräten in Baugruben und Gräben. Hg. v. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft.

**GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH (1995):** Neuartige Verlegetechniken von Kunststoffmantelrohren. Band 1: Neuentwicklungen zur KMR-Technik: AGFW.

**H ZFSV 2012:** Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Verkehrswesen.

**Hermann, W.; Schweiger, M. (2007):** Schalltechnische Untersuchung. Teil F: Bedingte Lärmbelastung. Hg. v. Obermeyer Planen und Beraten GmbH.

**Honds, M. (2012):** Leitungssanierung im Bereich schützenswerter Bäume – Erfahrungsbericht einer botanisch-technischen Konfliktlösung mittels S3-Verfahren. In: 3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme 51 (7/8), S. 570–574.

**I.Arsic & M. Liebscher (2009):** Ausführungsrisiken beim Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau. Hg. v. IKT - Institut für unterirdische Infrastruktur. Online verfügbar unter <http://www.ikt.de/website/down/f0112langbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Kiesselbach, Gerhard (1999):** Projektstudie über die Verfüllung von Künetten. Hg. v. Magistrat der Stadt Wien. Wien. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekokauf/pdf/kuenetten.pdf>, zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Klöden, S.; Wolfrum, D. (2014):** Eindimensionales Lastverformungsverhalten von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen. Bachelorthesis. Ostbayerische Technische Hochschule, Regensburg.

**Köhler, Thilo (1998):** Begehbare Leitungsgänge zur Erneuerung urbaner Ver- und Entsorgungsinfrastruktur - eine ökonomische Analyse. 1. Aufl. Hagen: ISL-Verlag.

**Kottmann, A. (1987):** Winterschäden an ehemaligen Rohrleitungsbaustellen und Vorschläge zu ihrer Verhütung. In: 3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme 26 (10), S. 690–694.

**Krämer, Erich; Leiker, Herbert; Wilms, Ulrich (2004):** Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen von Baumaschinen. Wiesbaden: HLUG (Umwelt und Geologie Lärmschutz in Hessen, 2). Online verfügbar unter [http://www.hlnug.de/fileadmin/shop/files/Schriften\\_Laerm\\_509.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/shop/files/Schriften_Laerm_509.pdf), zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Krieg, St.; Goldscheider, M. (1998):** Bodenviskosität und ihr Einfluß auf das Tragverhalten von Pfählen. In: Bautechnik 75 (10), S. 806–820. DOI: 10.1002/bate.199805440.

**Märtner, Bernd (2013):** Einsatzmöglichkeiten von Flüssigboden zur Verminderung der Schadstofffreisetzung bei mineralischen Materialien. 2. Flüssigbodentagung. Ostbayrische Technische Hochschule. Regensburg, 28.02.2013. Online verfügbar unter [http://www.mus-umweltprojekt.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/2015/Einsatz-Fluessigboden1.pdf](http://www.mus-umweltprojekt.de/fileadmin/user_upload/downloads/2015/Einsatz-Fluessigboden1.pdf), zuletzt geprüft am 21.02.2017.

**ÖNORM B 4420: 1989 01 01:** Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben; Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Kompressionsversuchen. Online verfügbar unter <https://www.austrian-standards.at/impressum/>.

**Pecher, Klaus Hans; Quarg - Vonscheidt, Jürgen; Sosinka, Katharina; Baukloh, Miriam; Gropengießer, Anna Jasmin (2010):** Abschlussbericht. Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung. Verfahren zur flüssigen Grabenverfüllung. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes NRW. Dr. Pecher AG. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/Abschlussbericht\\_Grabenerfuellung.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/Abschlussbericht_Grabenerfuellung.pdf), zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Pereira, Kiran (2014):** Aus Sand. Ein Rohstoff wird knapp. Hg. v. taz Entwicklungs GmbH & Co. Medien KG. le monde diplomatique. Online verfügbar unter <http://www.monde-diplomatique.de/pm/2014/09/12/a0010.text>, zuletzt geprüft am 21.12.2016.

**Sandig, Friedemann (2014):** Strukturbedingte geotechnische Eigenschaften von Controlled Low Strength Material für Dichtungen in Deichen. Dissertation. Bauhaus-Universität, Weimar.

**Schenk, Juliane (2012):** Herausforderung historische Innenstadt. In: 3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme 51 (7/8), S. 598–601. Online verfügbar unter [http://www.soiltec.info/fileadmin/IMG\\_SOILTEC/Aktuelles/12-10-01\\_Artikel\\_1.pdf](http://www.soiltec.info/fileadmin/IMG_SOILTEC/Aktuelles/12-10-01_Artikel_1.pdf), zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Schmitt, Frieder; Caspar, Jürgen; Holler, Stefan (2014):** Wärmetransport im Wettbewerb zu dislozierter Wärmeerzeugung und Maßnahmen zur Senkung der Baukosten von Transportleitungen. Frankfurt am Main: AGFW (Forschung und Entwicklung / AGFW, 28).

**Schmitt, Frieder; Caspar, Jürgen; Holler, Stefan (2015):** Bautechnische Entwicklungen von Fernwärme-Transportleitungen. Frankfurt am Main: AGFW (Forschung und Entwicklung / AGFW, 32).

**Schmitt, Frieder; Hoffmann, Heinz-Werner (1999):** Reuse of excavated materials. Sittard: Netherlands Agency for Energy and the Environment (IEA district heating, 1999,T3,3). Online verfügbar unter <http://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/1996-1999-annex-v/annex-v-project-03.html>.

**Sonnenberg, R. (2004):** Marktübersicht Vibrationsstampfer. In: tHIS 46 (4), S. 10–14.

**Stegmann, Rainer; Heyer, Kai - Uwe; Hupe, Karsten (2006):** Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Achim Willand. Hg. v. IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter [http://www.ifas-hamburg.de/pdf/UFOPLAN\\_IFAS.pdf](http://www.ifas-hamburg.de/pdf/UFOPLAN_IFAS.pdf), zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Stein, D.; Brauer, A. (2004):** Leitfaden zur Auswahl von Rohrwerkstoffen für kommunale Entwässerungssysteme. Hg. v. Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V. Bochum. Online verfügbar unter <http://www.fbsrohre.de/fileadmin/content/shop/nachhaltigkeit/fbs-expertise-oekologie.pdf>, zuletzt geprüft am 06.01.2017.

**Thieme, Thomas; Thieme, Günther; Schuricht, Winfried; Just, Manfred; Ridzewski, Jenas; Döring, Klaus-Dieter et al. (2016):** Qualitätssicherung für zukünftige Kunststoffmantelrohrsysteme in der Fernwärmeversorgung. Alterungsprüfmethode, Wechselbeanspruchung, zerstörungsfreie Muffenprüfungen, Diffusionshemmung, Zeitstandverhalten, Versagensmechanismen. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH (Forschung und Entwicklung / AGFW, Heft 39).

**Türke, Henner (1990):** Statik im Erdbau. 2., überarb. Aufl. Berlin: Ernst.

**Wagner, Bernd (2017):** Ein Beitrag zur axialen Bettung von Kunststoffmantelrohren der Fernwärme in Zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg/Sachsen (eingereicht Feb. 17, erscheint im 3.Qu. 17)

**Wagner, Bernd; Neidhart, Thomas (2016a):** Bodenmechanische Eigenschaften von ZFSV und zementbasierte Prognosemodelle zur Druckfestigkeitsentwicklung. In: Carola Vogt-Breyer und Christian Moormann (Hg.): 10. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Ostfildern/ Stuttgart, 19. und 20.01.2016, S. 125–141.

**Wagner, Bernd; Neidhart, Thomas (2016b):** Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung von ZFSV. In: Euro Heat & Power 45 (1-2), S. 35–39.

**Wagner, Bernd; Neidhart, Thomas; Weidlich, Ingo; Schleyer, Andreas (2013):** Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe zur KMR-Verlegung. Innovative Fernwärmeverteilung. In: Euro Heat & Power 42 (9), S. 54–56.

**Wegener, Thomas (Hg.) (2004):** 2004 - Rohrleitungen im Jahr der Technik. [18. Oldenburger Rohrleitungsforum]. Oldenburger Rohrleitungsforum; Oldenburger Rohleitungsforum. Essen: Vulkan-Verl. (Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, 28).

**Weidlich, Ingo (2008):** Untersuchungen zur Reibung an zyklisch axial verschobenen erdverlegten Rohren. Dissertation. Leibniz Universität, Hannover.



**Werner, Ulrich; Pastor, Walter (2013):** VOB - Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen : Teil A und B HOAI - Verordnung über Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure. 30. Auflage, Stand: 01.08.2013. München: dtv (dtv Beck-Texte im dtv).

**Ziegler, Corinne; Becker, Eckard (2013):** Flüssigboden - Eine Betrachtung aus Sicht des Arbeitsschutzes. In: BauPortal - Fachzeitschrift der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft 125 (8), S. 28–31. Online verfügbar unter <http://www.bgbau.de/presse/fach-tief/bauportal-2013/bauportal-heft-8>, zuletzt geprüft am 21.12.2016.



# Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Fragebogen	186
Anlage 2:	Anmerkungen auf den Fragebögen	189
Anlage 3:	Nationale Literaturlauswahl zum Thema ZFSV	190
Anlage 4:	Tabellarische Anforderungen	192
Anlage 5:	Untersuchungen an den Ausgangsböden	194
Anlage 6:	Untersuchungen des Anmischwassers (Trinkwasser)	233
Anlage 7:	Dreiaxialversuch nach DIN 18137 Teil 2	234
Anlage 8:	Zusammenfassung K <sub>0</sub> -Versuche	237
Anlage 9:	Entwurf Festpunktanbindung KMR	239
Anlage 10:	Grundplatte	240
Anlage 11:	Flansch – Kraftmessdose	241
Anlage 12:	Verbindungsstück KMR – Kraftmessung	242
Anlage 13.1:	Technikumsversuch im Maßstab 1:1 Produkt A	243
Anlage 13.2:	Technikumsversuch im Maßstab 1:1 Produkt C-ST	249
Anlage 14:	Normierung der Ergebnisse der Großversuche	254
Anlage 15:	Anforderungen an ZFSV	258
Anlage 16:	Leistungsverzeichnis	264

## Fragebogen „Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllmaterialien“: Marktabfrage aus Sicht der AGFW-Mitglieder

Für die breite Anwendung von fließfähigen Verfüllmaterialien im Fernwärmeleitungs-  
bau führt der AGFW das vom BMWi geförderte Forschungsvorhaben „Einsatz  
fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung in Gräben und Haubenkanälen“,  
Fördernummer 03ET1063D durch. Für eine optimale Verzahnung mit unseren  
Unternehmen bitten wir Sie um Ihre Mitarbeit. Bitte füllen Sie die nachfolgenden  
Fragen aus, und senden uns Ihre Bewertung möglichst bald zurück. Danke.

### Hintergrund

Im Rohrleitungsbau wird in regelmäßigen Abständen von den Vorzügen bei der Verwendung von  
zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterialien, kurz ZFSV berichtet. Dabei sprechen  
Argumente der Wirtschaftlichkeit, Bauzeit, Flexibilität und Dichtwirkung stark für deren Verwendung.  
Im Gegensatz dazu steht der Anwender vor der Problematik, unter einem vielfältigen Angebot  
auswählen zu müssen. Anwender fragen sich, welche Rezepturen langfristig tatsächlich die  
gewünschten Eigenschaften im Graben liefern. Hinsichtlich der erforderlichen Rohrstatik von  
Fernwärmeleitungen kommen noch Fragestellungen nach den Reibungskräften, Bettungsdrücken,  
Abbindezeiten und Langzeittragfähigkeiten hinzu, die bisher für Fernwärmeleitungen noch nicht  
wissenschaftlich untersucht wurden. Das oben genannte Forschungsvorhaben ist ein auf diese  
Fragestellungen abgestimmtes Projekt, indem der AGFW die Ihnen hiermit vorliegende Umfrage  
durchführt.

1 Werden ZFSV in Ihrem Unternehmen verwendet? Ja  Nein

Wenn Ja,

2 Welche ZFSV werden verwendet?

Weimarer Bodenmörtel	<input type="checkbox"/>	RSS-Flüssigboden	<input type="checkbox"/>	Stabilisierte Sandmischung	<input type="checkbox"/>
Dämmen und Blitzdämmen	<input type="checkbox"/>	Porenleichtbeton	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>
Füma und Füma-Boden Erdbeton	<input type="checkbox"/>	Füllmix	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>

3 Wieviel m<sup>3</sup>/Jahr werden verwendet?  bis  m<sup>3</sup>

4 Welche ZFSV haben sich bewährt?

Weimarer Bodenmörtel	<input type="checkbox"/>	RSS-Flüssigboden	<input type="checkbox"/>	Stabilisierte Sandmischung	<input type="checkbox"/>
Dämmen und Blitzdämmen	<input type="checkbox"/>	Porenleichtbeton	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>
Füma und Füma-Boden Erdbeton	<input type="checkbox"/>	Füllmix	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>

**5** Wenn ja, warum haben sie sich bewährt?

-----  
 -----  
 -----

**6** Wieviel kostet Sie derzeit ein m<sup>3</sup> ZFSV im Mittel?

bis	€
-----	---

**7** Welche Erfahrungen haben Sie über das Festigkeitsverhalten?

- Spatenlösbar
- Pickellösbar
- Abbruchstange
- Presslufthammer

**8** Welche Informationen haben Sie über das Reibungsverhalten Rohr-ZFSV?

- Reibung größer als bei Sand
- Reibung gleich groß wie bei Sand
- Reibung kleiner als bei Sand

**9** Sind Reibungskoeffizienten  $\mu$  zwischen Rohr und ZFSV bekannt?

Ja  Nein

Wenn Ja, welche?

--	--	--

**10** Sehen Sie Chancen in ihrem Unternehmen ZFSV verstärkt einzusetzen und welche Voraussetzungen müssten erfüllt sein?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

**11** Haben Sie Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von ZFSV und wenn ja welche?

-----  
 -----

-----  
-----

**12** Wieviel m<sup>3</sup>/Jahr würden Sie gerne verbauen?

bis  m<sup>3</sup>

**13** Sind Schadensfälle bekannt? Ja  Nein

Wenn Ja, was ist kaputt gegangen?

-----  
-----  
-----  
-----

**14** Mit welcher Temperaturänderungsgeschwindigkeit werden Sie das Netz angefahren?

----- [K/h]

**Platz für eigene Hinweise:**

-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

**Der Fragebogen ist anonym. Falls Sie für Rückfragen zur Verfügung stehen möchten, bitte hier Ihren Kontakt angeben:**

-----  
-----  
-----

**Vielen Dank!**

## Anlage 2: Anmerkungen auf den Fragebögen

Am Ende des Fragebogens wurde den Befragten die Gelegenheit gegeben eigene Hinweise und Anregungen zum Thema zu geben, die nachfolgend chronologisch aufgelistet werden:

1. Zum Einsatz der ZFSV existieren keine techn. Regelwerke- lediglich Untersuchungen die als unverbindlich zu betrachten sind.
2. Der Nachweis der Gleichwertigkeit gegenüber herkömmlicher Ausführung (z.B. Sondervorschlag) kann oftmals nicht geführt werden.
3. Für die Beurteilung derartiger Forschungsthemen ist unser Fernwärmebereich zu klein. Wir bitten daher um Verständnis dass unser Unternehmen dieses Verfahren erst dann einsetzen wird, wenn ausreichende bzw. positive langfristige Erfahrungen anderer (größerer) Unternehmen vorliegen.
4. Nicht bekannt, da die Netze vor meiner Tätigkeit hier in Betrieb waren und das alte Personal nicht mehr im Hause ist.
5. In einer Diplomarbeit beim Medium Gas/Wasser hat sich unser Unternehmen mit dem Material beschäftigt. Die Ergebnisse und Erfahrungen waren aber nicht so, dass sich das Material als eine Alternative zur bisherigen Arbeitsweise angeboten hätte.
6. Für unsere eigenen Störungsbehebungsgruben Wasser- / Erdgasnetz kann man schon festhalten, dass sich der Bauablauf deutlich ändert. Nach 2-3 Tagen Abbindezeit kann erst Frost -und Tragschicht eingebaut werden.
7. Das FW Netz wird gleitend gefahren. Inbetriebnahmen werden in den Sommermonaten über Befüllung VL u. RL gefahren. In der Heizperiode erfolgt die Befüllung nur über den RL. Es wird mit ca. 2m/s das Netz gefahren.
8. Anwendung von ZFSV für PMR-Systeme angedacht? → Nicht KM-Verbundrohrsysteme !
9. Die Lösbarkeit der getrockneten ZFSV ist abhängig von der Wasserzugabe
10. ZFSV angedacht für oberflächennahe Verlegung mit schmälere Gräben um Kosten im Tiefbau zu sparen
11. Endlich definierte Reibwerte am Rohr zu haben, um die Statiken realitätsnaher zu rechnen --> qualitativ hochwertigerer Leitungsbau
12. Wurde im Rohrleitungsbau (Leerrohrverlegung) eingesetzt
13. Es wird wohl noch eine Weile dauern bis auch die "Kaufleute" und Beamte überzeugt worden sind diese Produkte vorzugsweise einzusetzen. Der Trend wird wohl in diese Richtung gehen
14. Das Thema fließfähige Verfüllstoffe für die erneute Verlegung ist zur Zeit noch nicht relevant. Zumal sich Mehrkosten andeuten
15. Die Verdämmung von Hohlräumen Kanälen ist eher wichtig.
16. Wir haben keine Erfahrungen und können die angeblichen Vorteile nicht erkennen.

Gattung	Verfasser	Titel	Tagung	Sammelwerk/ Zeitschrift/ Zeitung	Seite	Heft	Jahr	Dissertation	Hochschule
Zeitschrift/ Artikel	---	Echter Flüssigboden braucht Fachwissen statt Esoterik	---	Steinbruch und Sandgrube	32-34	Nr. 3	2009	---	---
Monographie	Arsic, I.	Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden	---	---	---	Nr. 40	2009	ja	Ruhr-Universität Bochum
Zeitschrift/ Artikel	Bechert, A.	Ein sehr problematischer Baugrund	---	UmweltBau	76-78	Nr. 1	2012	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Berger, W.	WBM Weimarer Boden-Mörtel: Erfahrungsbericht	---	---	---	---	---	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Berger, W./ Büchner, U.	Verfüllen und Verdichten des Leitungsgrabens	---	bbr	20-27	Nr. 6	2003	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Berger, W./ Keller, H./ Grage, T.	Experimentelle Erfassung der Interaktion von Kunststoffmantelrohren der Fernwärmeversorgung und neuartigen Rohreinbettungsverfahren	---	3 R international	33-38	Nr. 1	2000	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Böing, R./ Liebscher, M.	New self compacting filling material for pipeline trenches from the suitability test to quality assurance	---	BFT International	---	Nr. 11	2010	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Bosseler, B.	Bettungs- und Verfüllmaterialien	---	gwa	---	Nr. 8	2009	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Büchau, A:	Einsatz von KMR in bestehenden Kanälen - Ansätze zur innovativen Sanierung von Kanälen	---	EuroHeat&Power	68-76	Nr. 3	2004	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Büchner, U./ Berger, W.	Anwendung von stabilisierten Verfüllmaterialien bei besonderen Einbauanforderungen	---	bbr Wasser und Rohrbau	17-22	Nr. 11	2000	---	---
Tagungsbeitrag	Caspar, J./ Schmitt, F./ Grage, T.. Liebermann, A.	EnEff: Wärme - Kostengünstiger Wärmetransport für den effektiven Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) - Verlegung von Kunststoffverbundmantelrohr (KVMR) Leitungen mit zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterialien (ZFSV) - Teil 1: Voruntersuchungen	27. Oldenburger Rohrleitungsforum	Rohrleitungen - im Zeichen des Klimawandels Tagungsband zum 27. Oldenburger Rohrleitungsforum	694-702	---	2013	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Feickert, R.	Bodencocktail frisch gemixt - Flüssigboden als selbstverdichtendes Verfüllmaterial	---	Baumaschinendienst	36-41	Nr. 5	2008	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Feickert, R.	Selbstverdichtendes Verfüllmaterial - Vielfältige Vorteile in der Praxis	---	UmweltBau	33-36	Nr. 40	2008	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Grage, T.	Verlegung von Kunststoffverbundmantelrohren in einem fließfähigen und selbsthärtenden Bettungsmaterial - Neues Verlegeverfahren für KMR in bestehenden Kanälen oder Hohlräumen / Erste Praxisergebnisse	---	EuroHeat&Power	60	Nr. 5	2005	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Grage, T./ Keller, H.	Experimentelle Erfassung der Interaktion von KMR und neuartigen Rohreinbettungsverfahren	---	---	---	---	---	---	---
Prospekt	Heidelberg Beton GmbH	Terra Flow - Der Flüssigboden aus dem Fahrmisch	---	---	---	---	---	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Hillmann, C.	Die Bewältigung des berüchtigten London Clay	---	UmweltBau	48-50	Nr. 3	2009	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Hoffmann, H.W./ Schmitt, F.	New methods of pipeline construction for cost savings.	---	EuroHeat&Power Fernwärme International	44-52	Nr. 5	2000	---	---



Gattung	Verfasser	Titel	Tagung	Sammelwerk/ Zeitschrift/ Zeitung	Seite	Heft	Jahr	Dissertation	Hochschule
Zeitschrift/ Artikel	Körkemeyer, K./ Schneider, N./ Ochs, C./ Böing, R./ Decker, P.	Einsatz selbstverdichtender Verfüllmaterialien	---	UmweltBau	---	Nr. 4	2012	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Kühn, G.	Flüssig ist schlüssig - Flüssigbodenherstellung vor Ort	---	Baustelle	---	Nr. 40	2004	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Liebermann, A.	Untersuchungen an fließfähigem Verfüllbaustoff füma boden <sup>®</sup> zur Interaktion mit warmgehenden Leitungen	---	---	---	---	2006	---	---
Prospekt	o.V.	Parcoflex <sup>®</sup> ...der Baustoff für Sie!	---	---	---	---	---	---	---
Normen/ Regelwerke	o.V.	Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze	---	---	---	---	2007	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Petscharnig, F.	Kanalbau mit RSS-Flüssigboden	---	Zement Beton	8-11	Nr. 1	2005	---	---
Tagungsbeitrag	Rohrhofer, K./ Zeininger B.	Qualitätssicherung bei offenem Graben und grabenlosem Leitungsbau	6. Österreichische Geotechniktagung	---	---	---	2007	---	---
Monographie	Sandig, F.	Strukturbedingte Geotechnische Eigenschaften von Controlled Low Strength Material für Dichtungen in Deichen	---	---	---	---	2015	ja	Bauhaus-Universität Weimar
E-Newsletter	Schlüter, M.	Gut gebettet liegt länger	---	IKT-eNewsletter	---	---	---	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Schmitt, F./ Caspar, J./ Grage, T./ Liebermann, A.	Verlegung von KVMR-Leitungen ohne mechanische Verdichtung mit Vergussmassen	---	EuroHeat&Power	44-49	Nr. 11	2012	---	---
Schlussbericht	Schmitt, F./ Caspar, J./ Holler, S./ Hoffmann, W./ Klöpsch, M.	EnEff: Wärme Kostengünstiger Fernwärmtransport für den effektiven Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung Bautechnische Entwicklungen von Fernwärme-Transportleitungen	---	AGFW - Forschung und Entwicklung Heft 32	---	---	2015	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Spahn, K./ Berger, W, Mälzer, D.	Rohrleitungen in selbstverdichtenden Verfüllmaterialien	---	UmweltBau	37-41	Nr. 6	2005	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Stein, R./ Oettinghaus, H./ Falk, C.	Optimierte Rohrverlegung in offrener Bauweise	---	tis	---	Nr. 12	2006	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Stolzenburg, O.	Was ist Flüssigboden wirklich	---	UmweltBau	56-61	Nr. 1	2009	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Thelen, J./ Paschmann, H./ Hamelmann, D.	Zielsichere Herstellung und Anwendung von Flüssigboden	---	UmweltBau	48-49	Nr. 6	2010	---	---
Forschungsbericht	Triantafyllidis, Th./ Bosseler, B./ Arsic, I./ Liebscher, M.	Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau - Laboruntersuchungen und Versuche im Maßstab 1:1	---	---	---	---	2006	---	---
Zeitschrift/ Artikel	Webeleing, M./ Stolzenburg, O.	Einsatzmöglichkeiten von Flüssigboden bei Erd- und Tiefbaumaßnahmen	---	Straße undAutobahn	556-561	Nr. 10	2007	---	---
Normen/ Regelwerke	Webeling, W. et al.	FGSV, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau - H ZFSV	---	---	---	---	2012	---	---

## Anlage zum Schreiben vom 7.11.2012 „Anfrage zur Zusammenarbeit im AGFW-Forschungsvorhaben „Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“

Sofern Ihrem Produkt nicht ohnehin regelmäßig eine definierte Gesteinskörnung/ ein definiertes Bodenausgangsmaterial zu Grunde liegt, sondern verschiedene Bodenausgangsmaterialien für Ihr Produkt möglich sind, teilen wir Ihnen ergänzend mit, dass für diese Art von ZFSV folgende Bodenmaterialien zur Untersuchung fixiert sind:

- Bodengruppe SU\* bis UL/TL nach DIN 18196
- Bodengruppen GU bis GU\* nach DIN 18196 (Größtkorn bis 20 mm)
- Bodengruppen TM bis TA nach DIN 18196

Ferner möchten wir Sie bitten, uns alle verfügbaren öffentlichen Produkt- und Detailinformationen zukommen zu lassen. Gerne auch Erfahrungsberichte und eigene Untersuchungen. Veranlassung ist, dass die ZFSV möglichst vollumfänglich im Forschungsbericht beschrieben und dokumentiert werden sollen.

Zudem möchten wir anfragen, ob die nachfolgend tabellarisch aufgeführten Grundanforderungen mit Ihrem Produkt eingehalten werden können. Bitte teilen Sie uns auch soweit möglich konkrete Zahlenwerte bzw. ggf. Zahlenwertintervalle in der vorgesehenen Spalte mit.

Nr.	Anforderung (qualitativ)	Nachweis mittels	Prüfverfahren/ Prüfvorschrift	Einzuhaltende Anforderung (quantitativ)	Mit ihrem Produkt erreichbare Anforderung
1	Größtkorn Gesteinskörnung/ Bodenausgangsmaterial	Korngrößenverteilung	DIN 18123 (04.2011)	$d_{max} \leq 20 \text{ mm}$	mm
2	Organische Bestandteile Gesteinskörnung/ Bodenausgangsmaterial	Glühverlust	DIN 18128 (12.2002)	$< 3\%$	%
3	Fließfähigkeit	Ausbreitmaß	in Anlehnung an DIN EN 206 (07.2001) und 12350-5 (08.2009)  <u>Hinweis:</u> ohne Stoßelausgleich mit Anstoßen an den Anschlag	55 – 65 cm	cm
4	Wasserabsonderung	Absetztest mit Vertikalrohr	in Anlehnung an DIN EN 445 (01.2008)  <u>Hinweis:</u> ohne Litze $\varnothing 110/100 \text{ mm}$	$\leq 3\%$	%
5	Volumenstabilität (Kurzzeit)	Absetztest mit Vertikalrohr	in Anlehnung an DIN EN 445 (01.2008)  <u>Hinweis:</u> ohne Litze $\varnothing 110/100 \text{ mm}$	$\geq -3\%$	%

Nr.	Anforderung (qualitativ)	Nachweis mittels	Prüfverfahren/ Prüfvorschrift	Einzuhaltende Anforderung (quantitativ)	Mit ihrem Produkt erreichbare Anforderung
6	Volumenstabilität (Langzeit)	Volumenverlustmessung	nicht normiert  <u>Hinweis:</u> zylinderförmige Probe $\varnothing_{\text{Probe}} \geq 99 \text{ mm}$ $h_{\text{Probe}} \geq 198 \text{ mm}$ $h_{\text{Probe}}/\varnothing_{\text{Probe}} \geq 2,0$	$\leq 3\%^{1)}$  Messzeitpunkte: 7d/ 14d/ 28d/ 56d/ 112d	%
7	Verfestigung	Einaxiale Druckfestigkeit	in Anlehnung an DIN 18136 (11.2003)  <u>Hinweis:</u> zylinderförmige Probe $\varnothing_{\text{Probe}} \geq 99 \text{ mm}$ $h_{\text{Probe}} \geq 198 \text{ mm}$ $h_{\text{Probe}}/\varnothing_{\text{Probe}} \geq 2,0$	$< 0,5 \text{ N/mm}^2$ nach 112 d	N/mm <sup>2</sup>
8	Scherwiderstand gegen HDPE* *) Polyethylen hoher Dichte	Scherversuch, Durchschiebeversuche im Technikum	In Anlehnung an DIN 18137 Teil 3, bzw. DIN EN ISO 12957-1 etc.	Gewünscht ist ein hoher Scherwiderstand in der Kontaktfläche ZFSV-HDPE	Erfahrungswerte vorhanden? Z.B. Ersatzreibungskoeffizient:  $\mu = \dots - \dots$

1) Es werden insgesamt drei Lagerungsbedingungen zu Grunde gelegt:

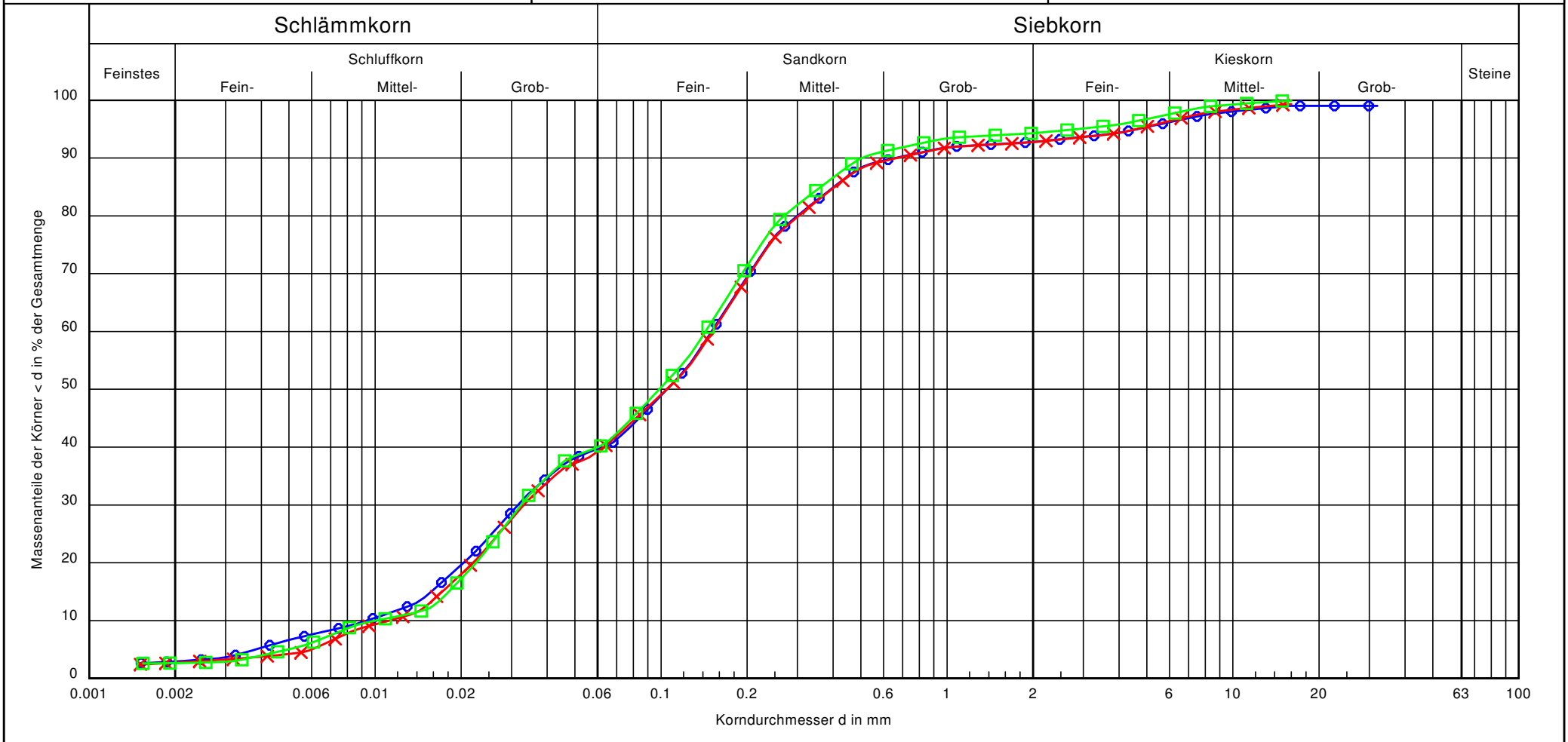
**geschlossenes System** (durch luft- und wasserdicht verschlossene Probebehälter keine Wasseraufnahme bzw. -abgabe in die Umgebung möglich)

**erdfeuchtes System** (durch im Fußbereich definiert luft- und wasserdurchlässige Probebehälter Wasseraufnahme bzw. -abgabe in die Umgebung möglich; die Proben werden in feuchtem Sand gelagert)

**nasses System** (durch im Fußbereich definiert luft- und wasserdurchlässige Probebehälter Wasseraufnahme bzw. -abgabe in die Umgebung möglich; die Proben werden in Wasser gelagert)

**GGU-SIEVE - CampusLicence HS Regensburg**  
 CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre

Hochschule Regensburg UAS Labor für Geotechnik Prüfeninger Straße 58 93049 Regensburg  Bearbeiter: Wagb/ Gömm      Datum: ab 28.01.2013	<h2 style="margin: 0;">Körnungslinie</h2> <p style="margin: 0;">Vorhaben: EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung                  Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik</p>	Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen Probe entnommen am: 14.01.2013 Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag Arbeitsweise: Versuch DIN 18123 - 7 - Siebung und Sedimentation
--	--	---



Bezeichnung:	Waschrückstand, Big Bag 1	Waschrückstand, Big Bag 2	Waschrückstand, Big Bag 3	Bemerkungen:	Bericht:  Anlage:
Kurzzeichen (DIN 18196)	ST*	ST*	ST*		
Entnahmestelle:	Big Bag 1	Big Bag 2	Big Bag 3		
T/U/S/G [%]:	2.9/37.0/52.8/7.2	2.8/37.2/52.8/7.2	2.6/37.9/53.7/5.7		
Signatur:	○—○	×—×	□—□		

Anlage 5: Untersuchungen an den Ausgangsböden

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Zustandsgrenzen in Anlehnung an DIN ISO/ TS 17892-12 (Vornorm)

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

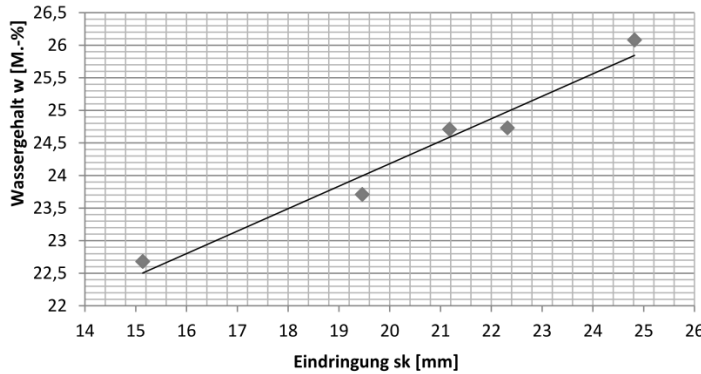
Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big-Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

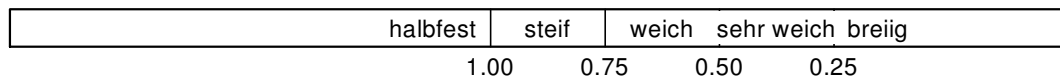


Fließgrenze  $w_L = 24.2 \%$   
 Ausrollgrenze  $w_P = 12.2 \%$   
 Plastizitätszahl  $I_P = 12.0 \%$

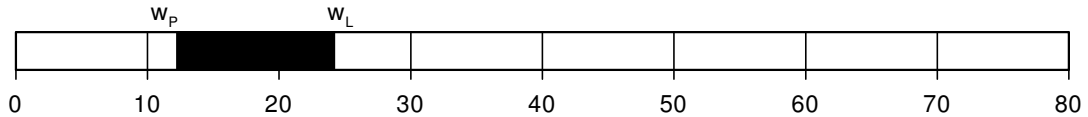
Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 15.0 \%$   
 Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

## Untersuchung des Feinkornanteils

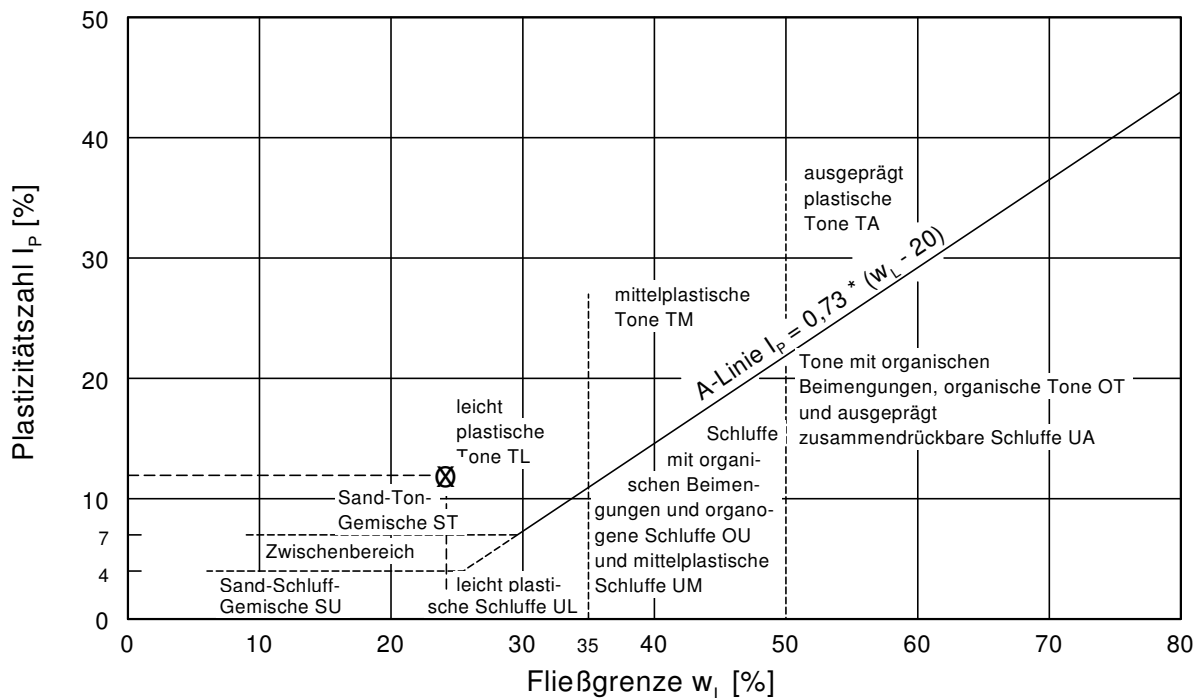
### Zustandsform



### Plastizitätsbereich ( $w_L$ bis $w_P$ ) [%]



### Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Zustandsgrenzen in Anlehnung an DIN ISO/ TS 17892-12 (Vornorm)

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

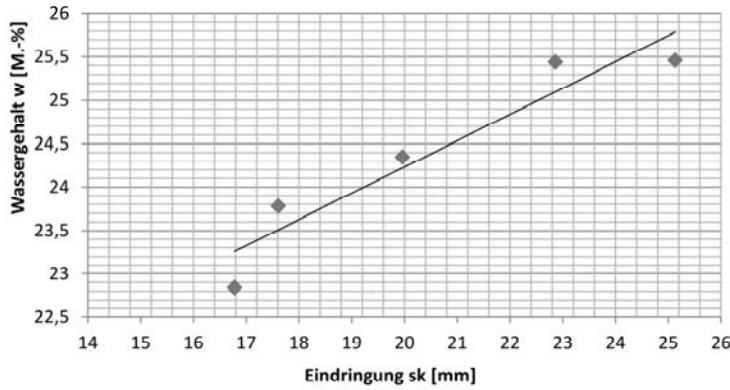
Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

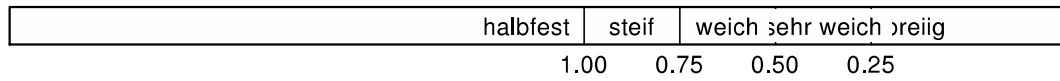
Probe entnommen am: 14.01.2013



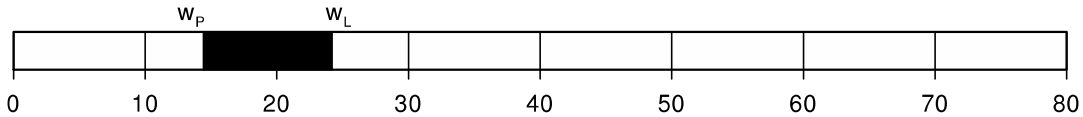
Fließgrenze $w_L$ =	24.2 %
Ausrollgrenze $w_P$ =	14.4 %
Plastizitätszahl $I_P$ =	9.8 %
Anteil Überkorn $\ddot{u}$ =	15.0 %
Wassergeh. Überk. $w_{\ddot{u}}$ =	0.0 %

## Untersuchung des Feinkornanteils

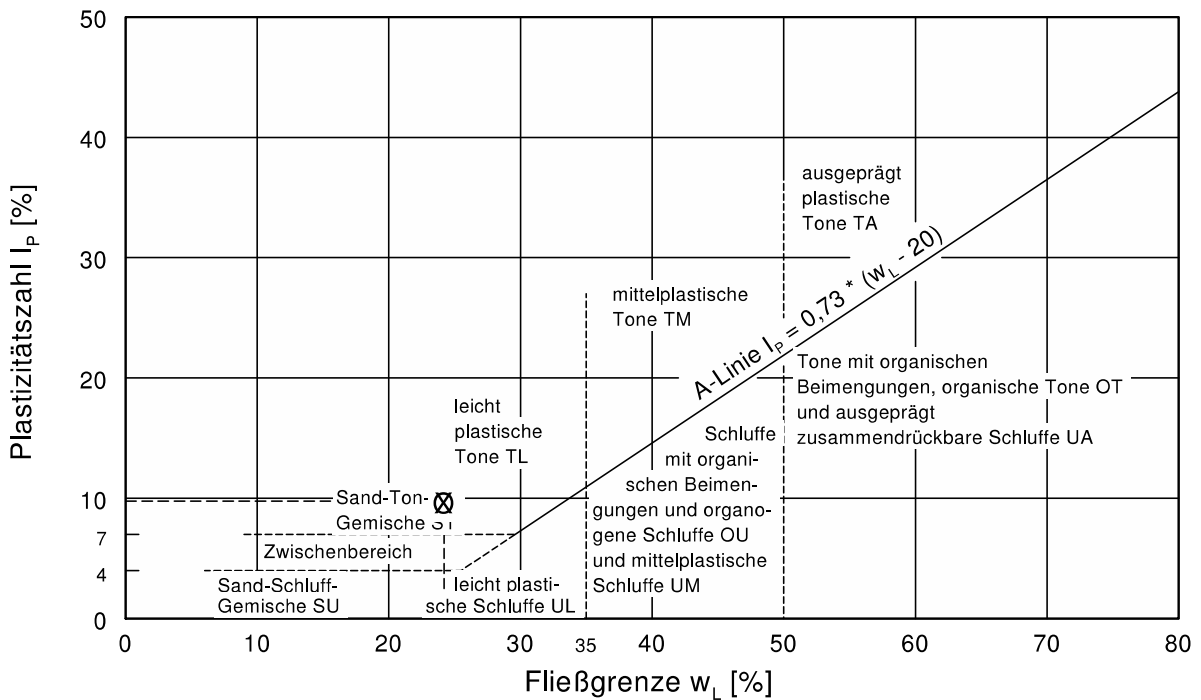
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfenerger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Zustandsgrenzen in Anlehnung an DIN ISO/ TS 17892-12 (Vornorm)

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

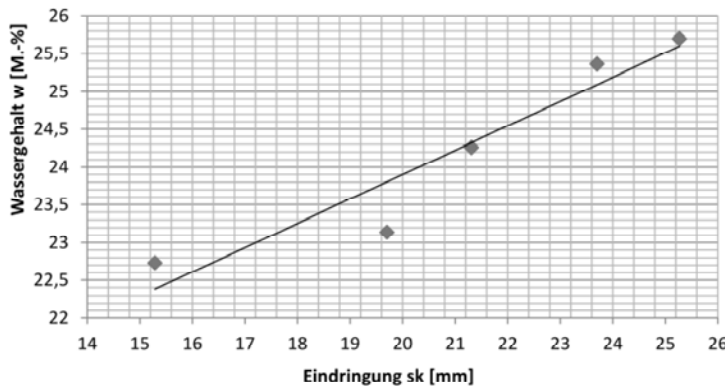
Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

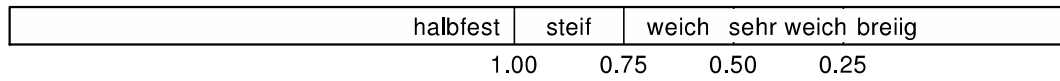
Probe entnommen am: 14.01.2013



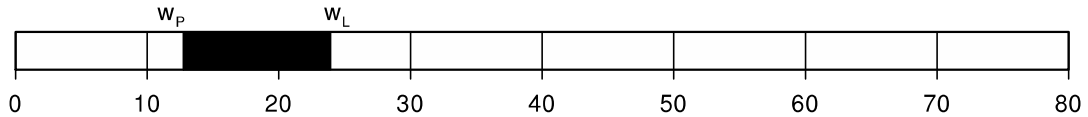
Fließgrenze  $w_L = 23.9 \%$   
 Ausrollgrenze  $w_P = 12.8 \%$   
 Plastizitätszahl  $I_P = 11.1 \%$   
 Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 13.0 \%$   
 Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

## Untersuchung des Feinkornanteils

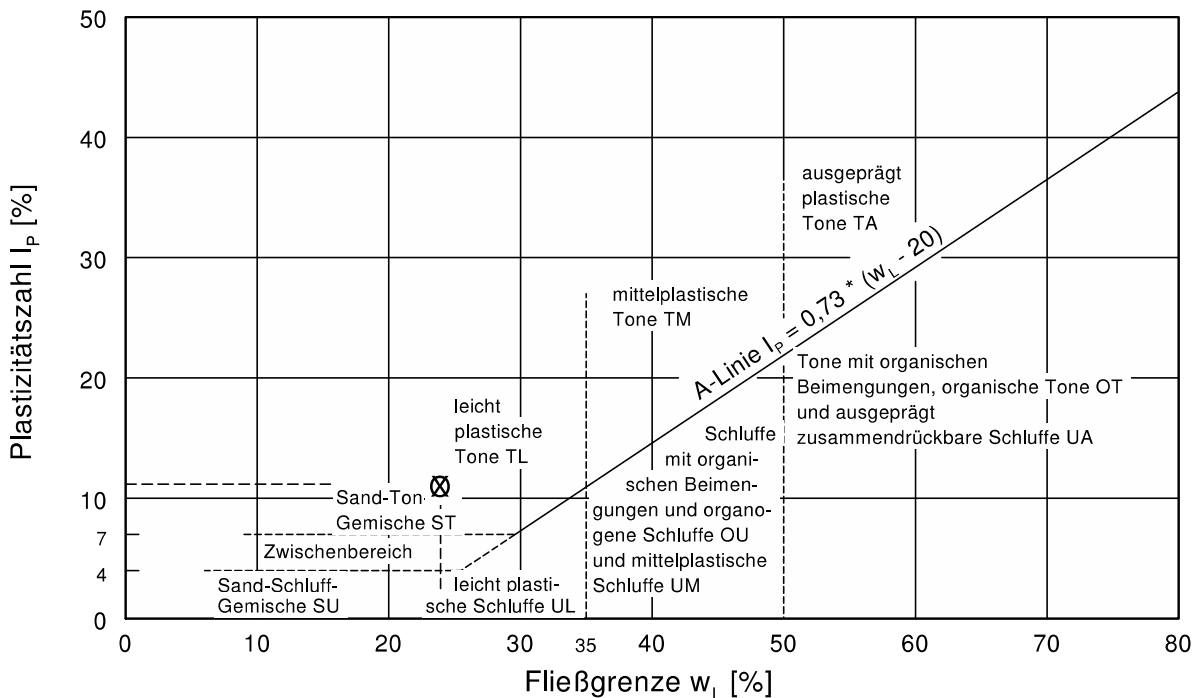
### Zustandsform



### Plastizitätsbereich ( $w_L$ bis $w_P$ ) [%]



### Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Korndichte in Anlehnung an DIN EN 1097-6 (Weithalspyknometer) und DIN 18124

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung (Anlehnung an): Versuch DIN 18124 - WP/ DIN EN 1097-6, Abschnitt 8

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 24.01.2013

Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

Probenbezeichnung	Waschrückstand, Big Bag 1	Waschrückstand, Big Bag 2	Waschrückstand, Big Bag 3
Pyknometer-Nr.	1	2	3
Masse Pyknometer mp [g]	742.300	742.300	742.300
Trockene Probe + Pyknometer m1 [g]	1421.800	1672.000	1894.800
Probe + Pyknometer + Wasser m2 [g]	2471.200	2625.700	2773.700
Temperatur Wasser T [°C]	25.000	23.100	21.800
Volumen Pyknometer V(pT) [cm³]	1303.940	1302.940	1307.940
Dichte Wasser bei T rho(wT) [g/cm³]	0.99707	0.99754	0.99784
Masse Wasser m(wT) = m2 - m1 [g]	1049.400	953.700	878.900
Volumen Wasser V(wT) = m(wT) / rho(wT) [cm³]	1052.482	956.051	880.801
Volumen Körner Vk = V(pT) - V(wT) [cm³]	251.458	346.889	427.139
Trockene Probe md = m1 - mp [g]	679.500	929.700	1152.500
Korndichte rhos = md / Vk [g/cm³]	2.702	2.680	2.698
Mittelwert [g/cm³]	2.694		

Probenbezeichnung			
Pyknometer-Nr.			
Masse Pyknometer mp [g]			
Trockene Probe + Pyknometer m1 [g]			
Probe + Pyknometer + Wasser m2 [g]			
Temperatur Wasser T [°C]			
Volumen Pyknometer V(pT) [cm³]			
Dichte Wasser bei T rho(wT) [g/cm³]			
Masse Wasser m(wT) = m2 - m1 [g]			
Volumen Wasser V(wT) = m(wT) / rho(wT) [cm³]			
Volumen Körner Vk = V(pT) - V(wT) [cm³]			
Trockene Probe md = m1 - mp [g]			
Korndichte rhos = md / Vk [g/cm³]			
Mittelwert [g/cm³]			

GGU-GRAIN-DENSITY - CampusLicence HS Regensburg  
CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

## Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

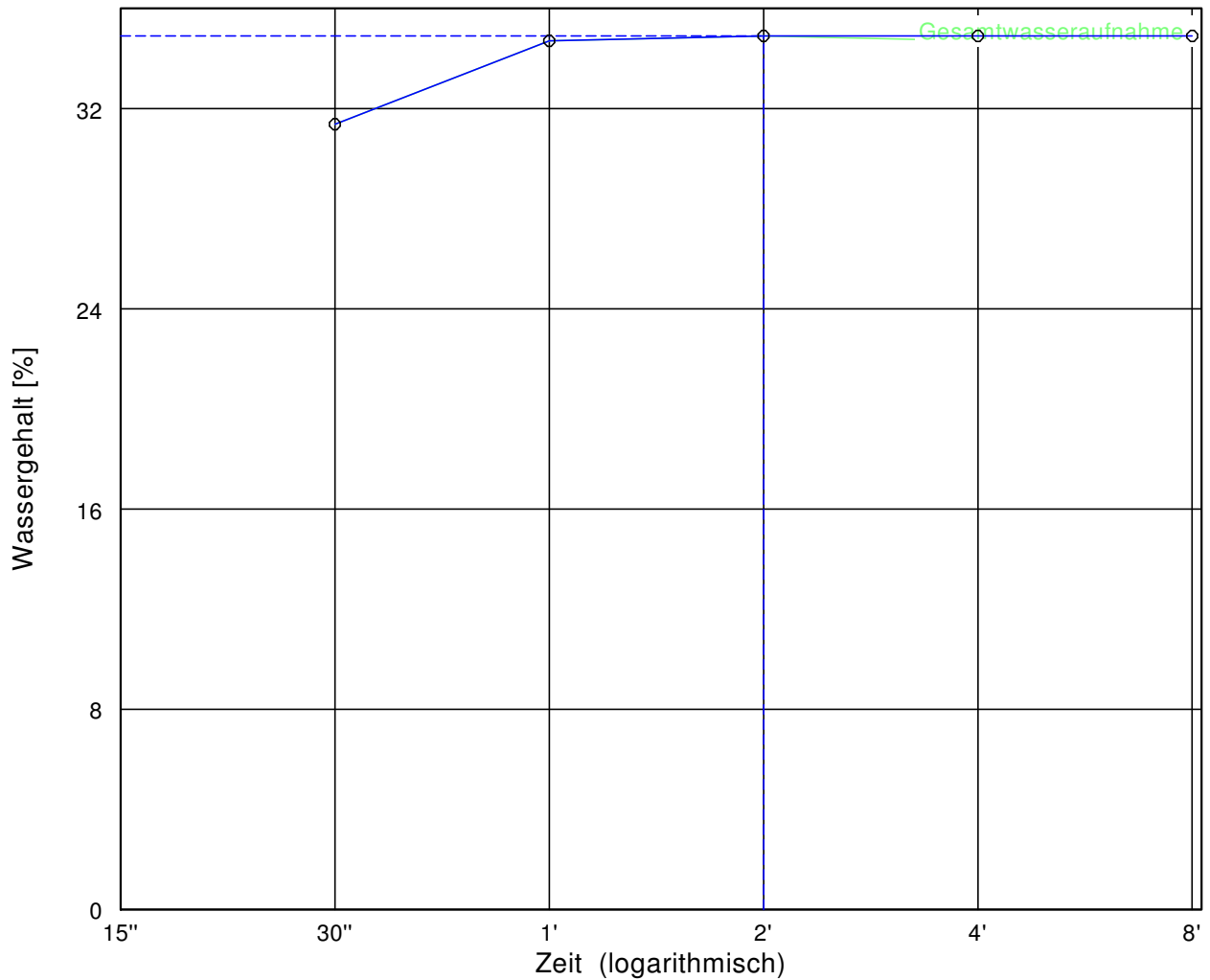
Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



## Untersuchung des Feinkornanteils; Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

Wasseraufnahmevermögen [%] = 34.9	Wasseraufnahmevermögen: sehr gering
Plastizität: sehr geringe	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 2.550	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 18.0	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 85
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

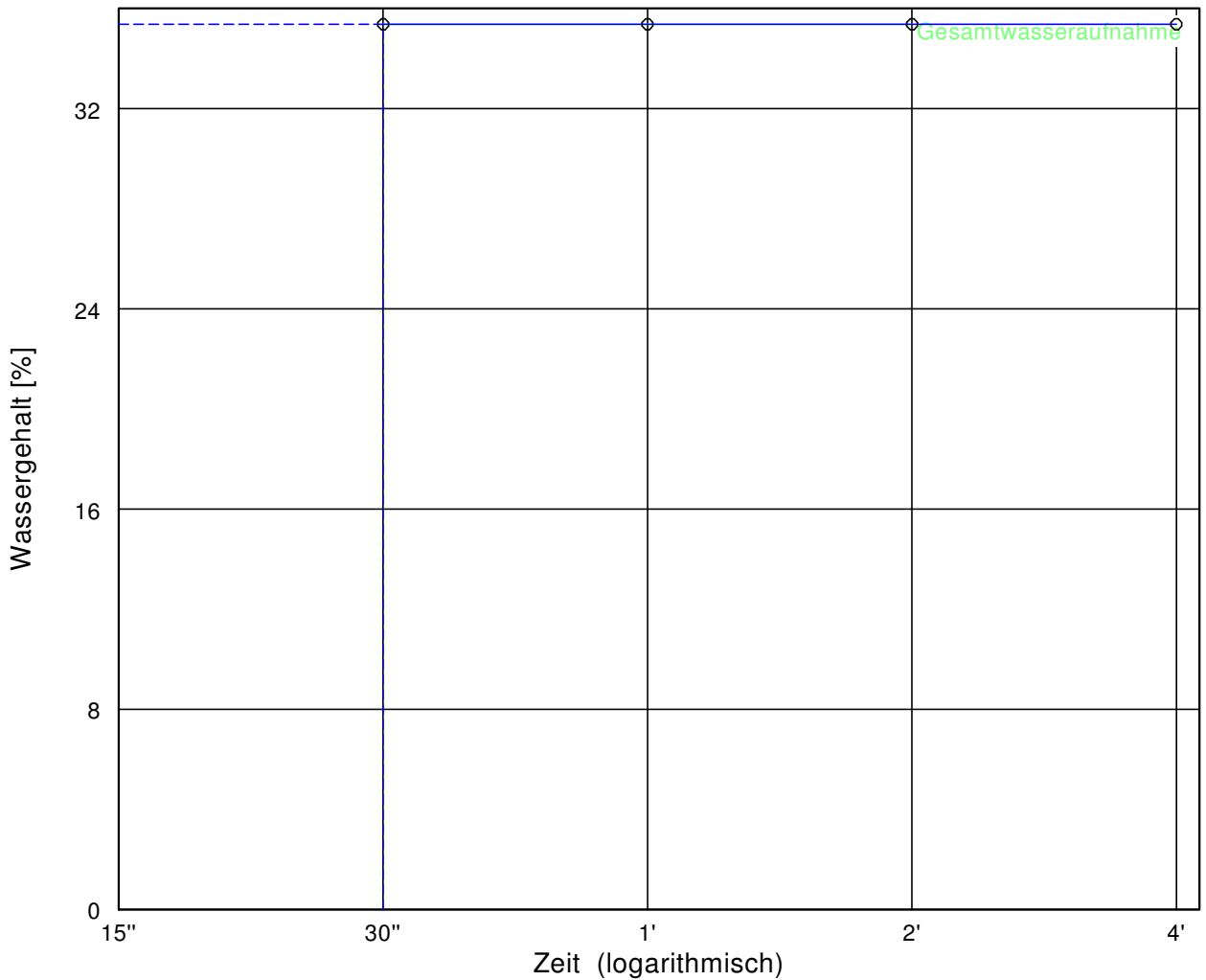
Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



Untersuchung des Feinkornanteils; Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

Wasseraufnahmevermögen [%] = 35.4	Wasseraufnahmevermögen: sehr gering
Plastizität: sehr geringe	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 2.290	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 18.5	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 85
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

## Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

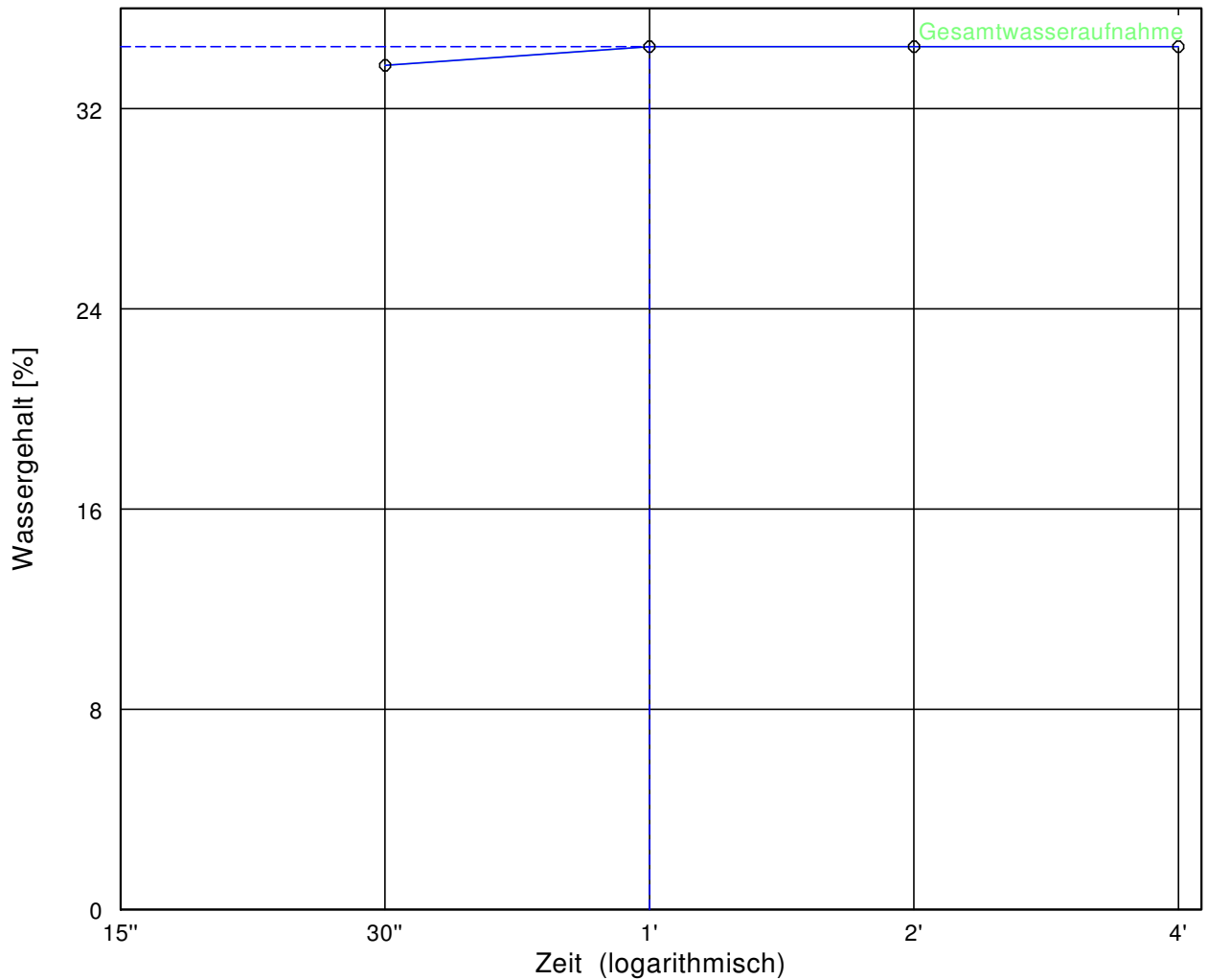
Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



## Untersuchung des Feinkornanteils; Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

Wasseraufnahmevermögen [%] = 34.5	Wasseraufnahmevermögen: sehr gering
Plastizität: sehr geringe	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 3.350	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 17.6	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 86,5
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

**Kalkgehalt** nach DIN 18 129

**EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung**

**Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik**

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 17.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18129 - G

Probenbezeichnung	Waschrückstand, Big Bag 1	Waschrückstand, Big Bag 2	Waschrückstand, Big Bag 3
Trockenmasse der Probe [g]	0.90	0.92	0.90
Temperatur [°C]	23.00	23.00	23.00
Absoluter Luftdruck [kPa]	103.40	103.40	103.40
Volumen nach 30 Sekunden [cm <sup>3</sup> ]	23.80	26.60	26.00
Volumen Versuchsende [cm <sup>3</sup> ]	49.70	59.80	57.60
Calcitanteil [-]	11.15	12.19	12.18
Dolomitanteil [-]	12.14	15.22	14.81
Kalkgehalt [-]	23.29	27.41	26.99

Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

**Glühverlust** nach DIN 18 128

**EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung**

**Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik**

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18128 - GL

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

Probenbezeichnung	Waschrückstand, Big Bag 1	Waschrückstand, Big Bag 2	Waschrückstand, Big Bag 3
Ungeglühte Probe + Behälter [g]	384.12	426.31	438.81
Geglühte Probe + Behälter [g]	379.81	422.19	434.98
Behälter [g]	120.41	194.01	198.06
Massenverlust [g]	4.31	4.12	3.83
Trockenmasse vor Glühen [g]	263.71	232.30	240.75
Glühverlust [-]	1.63 203	1.77	1.59

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

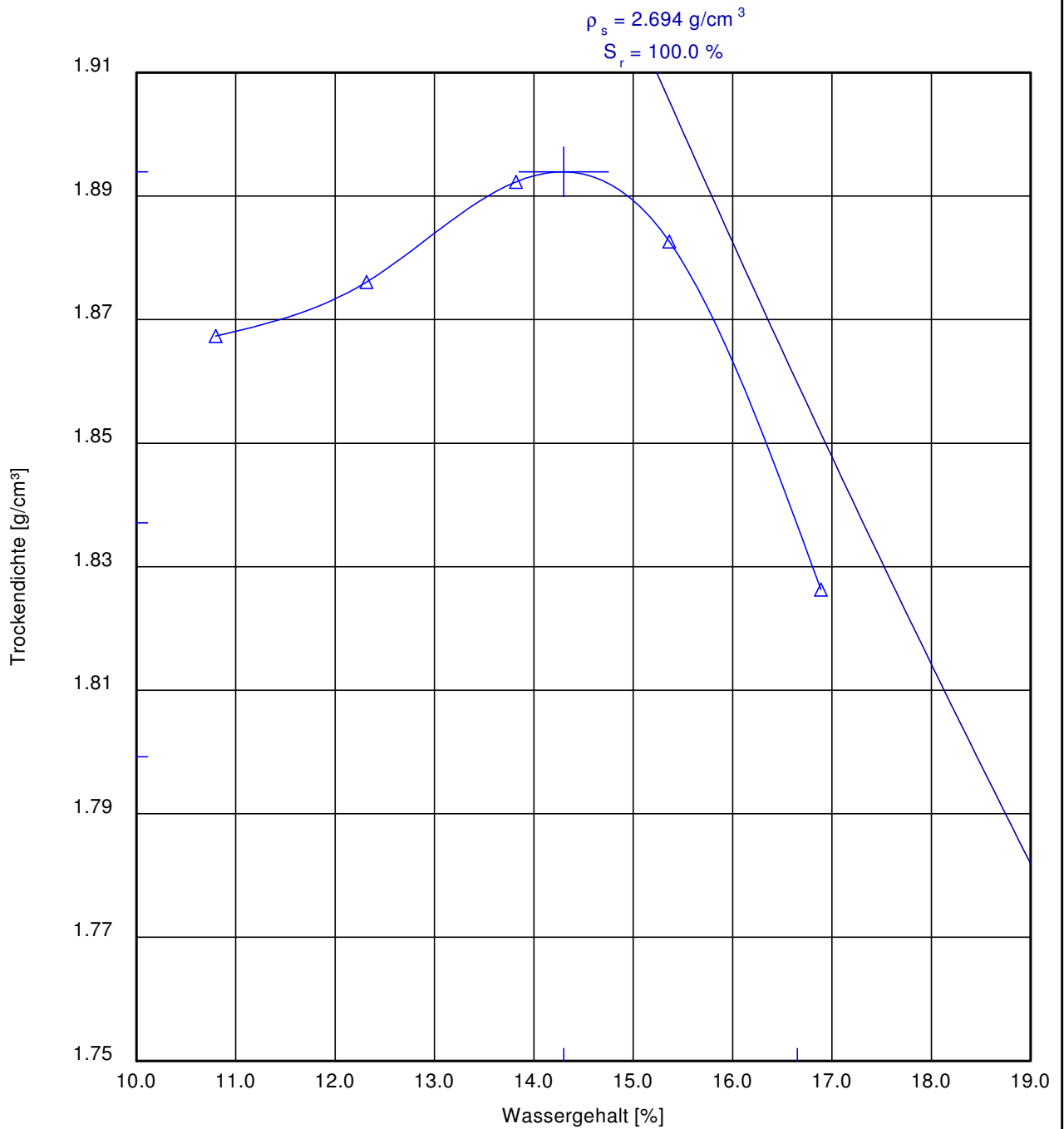
Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung Versuch DIN 18127 - P 100 X

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013



Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

100 % der Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1.894 \text{ g/cm}^3$

Optimaler Wassergehalt  $w_{Pr} = 14.3 \%$

97.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.837 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 16.7 \%$

95.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.799 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / - \%$

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung  
Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

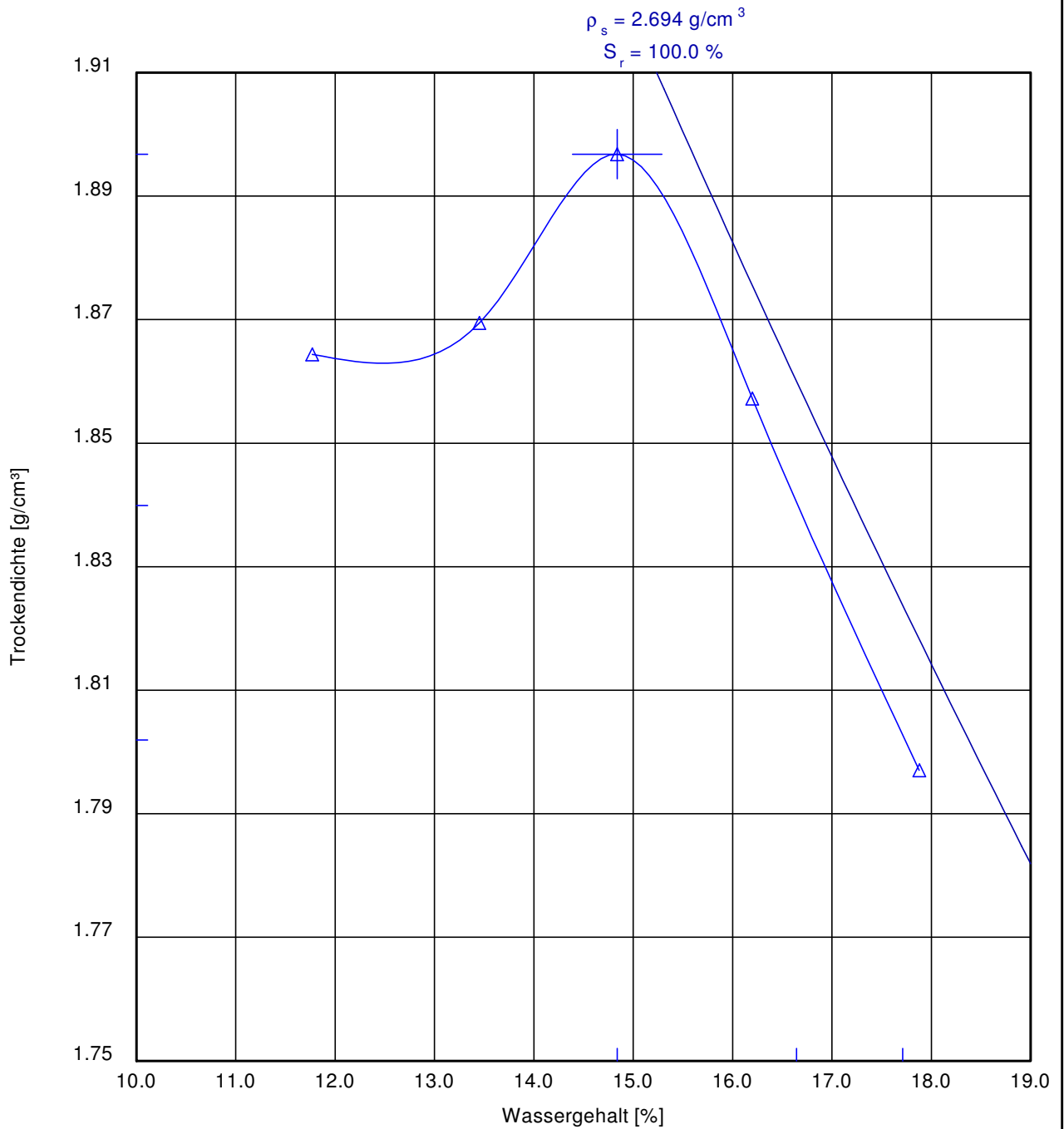
Bezeichnung: Waschrückstand, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 100 X



Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

100 % der Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1.897 \text{ g/cm}^3$

Optimaler Wassergehalt  $w_{Pr} = 14.8 \%$

97.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.840 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 16.6 \%$

95.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.802 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 17.7 \%$

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

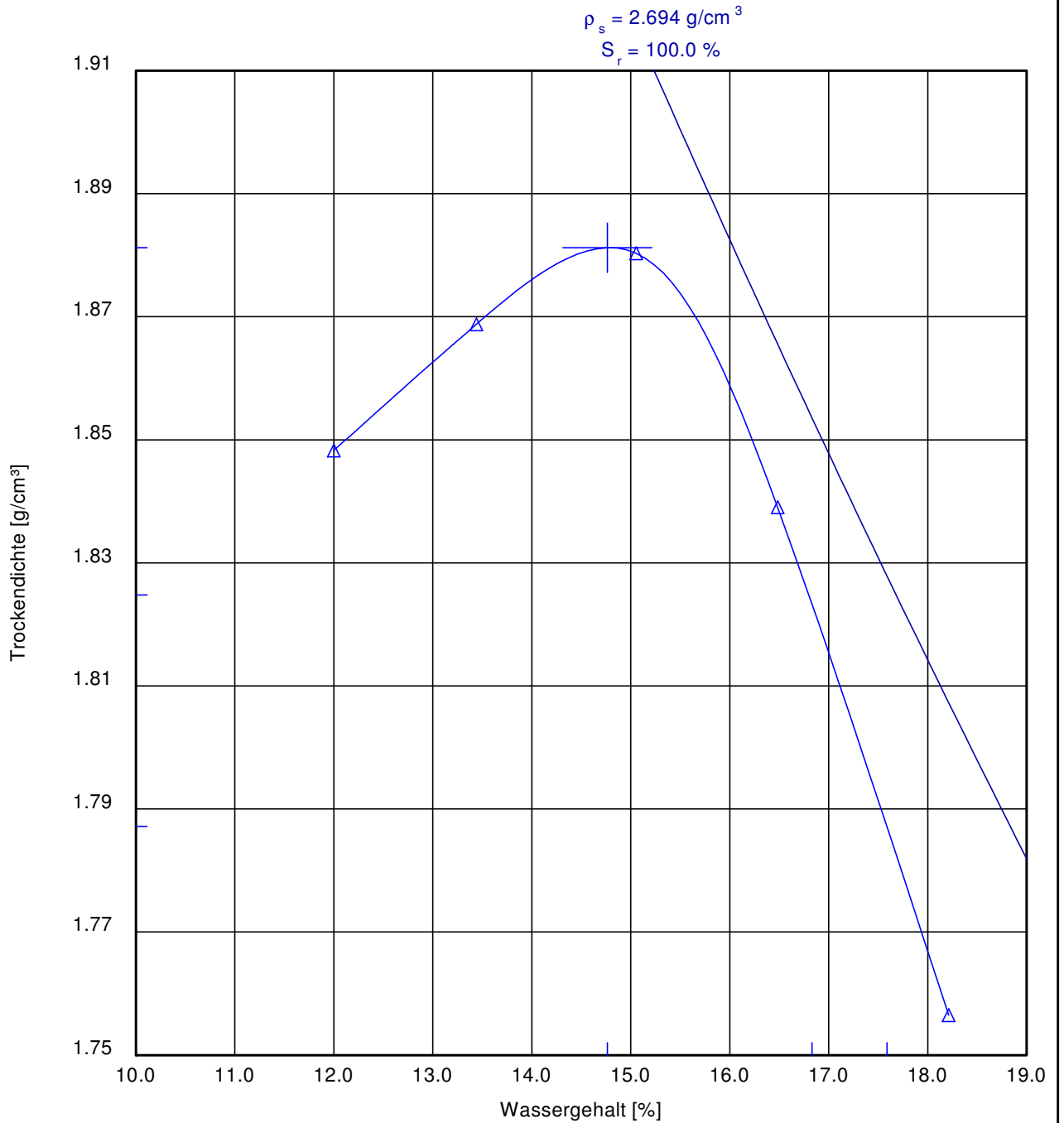
Bezeichnung: Schwemmsand, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 100 X



Kurzzeichen (DIN 18196): ST\*

100 % der Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1.881 \text{ g/cm}^3$

Optimaler Wassergehalt  $w_{Pr} = 14.8 \%$

97.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.825 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 16.8 \%$

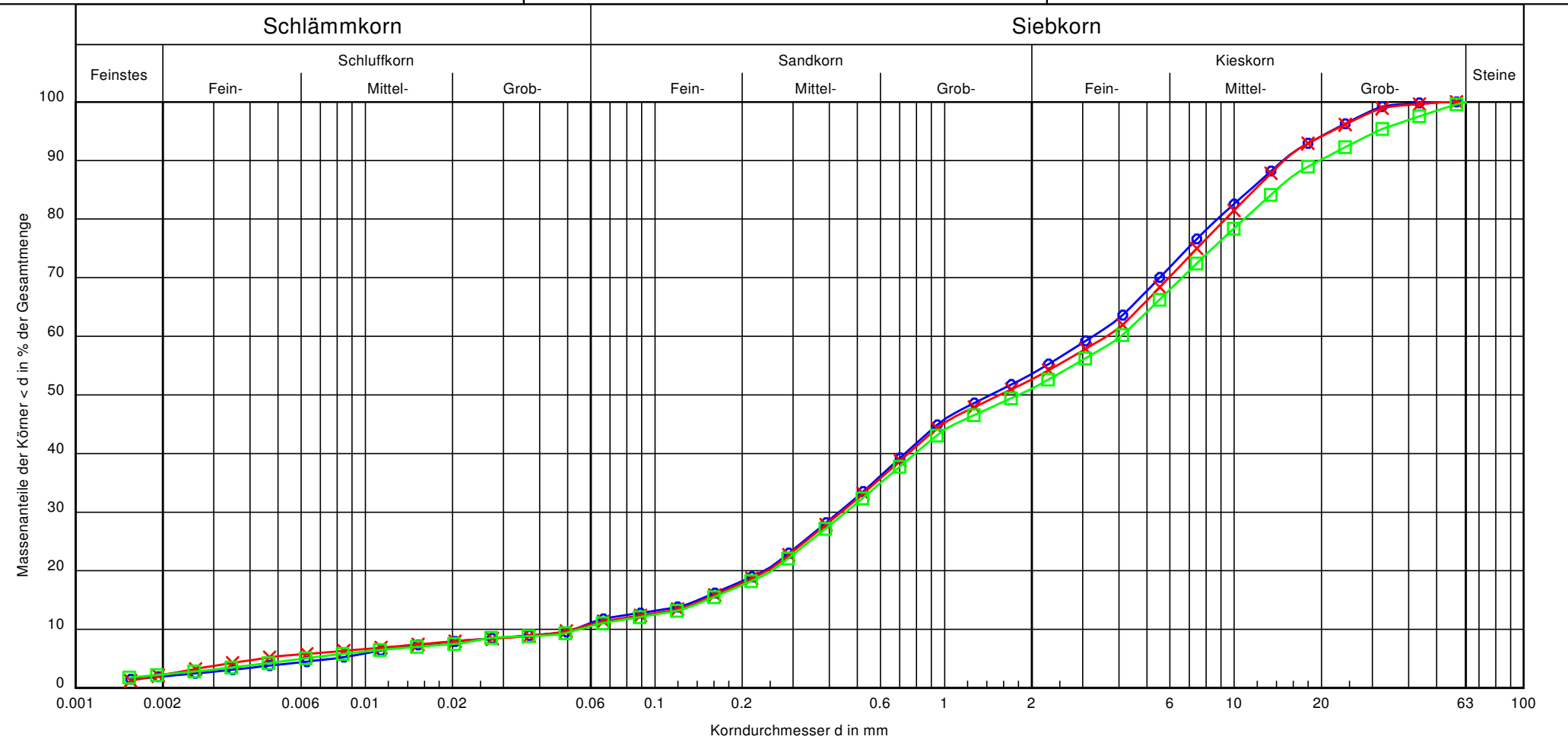
95.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.787 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 17.6 \%$



GGU-SIEVE - CampusLicence OTH Regensburg  
CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre

Hochschule Regensburg UAS Labor für Geotechnik Prüfeningstraße 58 93049 Regensburg  Bearbeiter: Wagb/ Gömm Datum: ab 28.01.2013	<h2 style="margin: 0;">Körnungslinie</h2> <p style="margin: 0;">Vorhaben: EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik</p>	Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen Probe entnommen am: 14.01.2013 Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag Arbeitsweise: Versuch DIN 18123 - 7 - Siebung und Sedimentation
---	---	---



Bezeichnung:	Rotlagenkies, Big Bag 1	Rotlagenkies, Big Bag 2	Rotlagenkies, Big Bag 3	Bemerkungen:	Bericht:  Anlage:
Kurzzeichen (DIN 18196)	GT	GT	GT		
Entnahmestelle:	Big Bag 1	Big Bag 2	Big Bag 3		
T/U/S/G [%]:	2.0/9.5/42.1/46.4	2.2/8.9/41.5/47.4	2.3/8.5/40.3/48.9		
Campus Signatur	○ — ○	× — ×	□ — □		

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfenerger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Zustandsgrenzen nach DIN 18 122

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

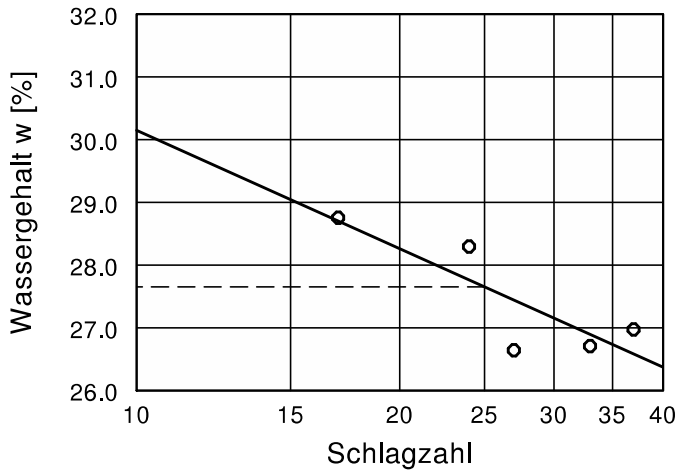
Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big-Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18122 - LM/ - P

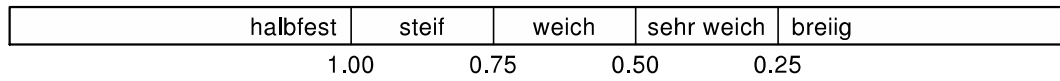


Fließgrenze  $w_L = 27.7 \%$   
Ausrollgrenze  $w_P = 10.2 \%$   
Plastizitätszahl  $I_p = 17.5$

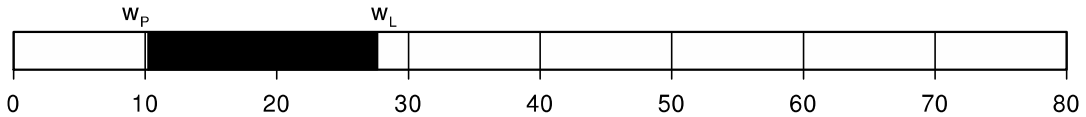
Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 78.0 \%$   
Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

Untersuchung des Feinkornanteils

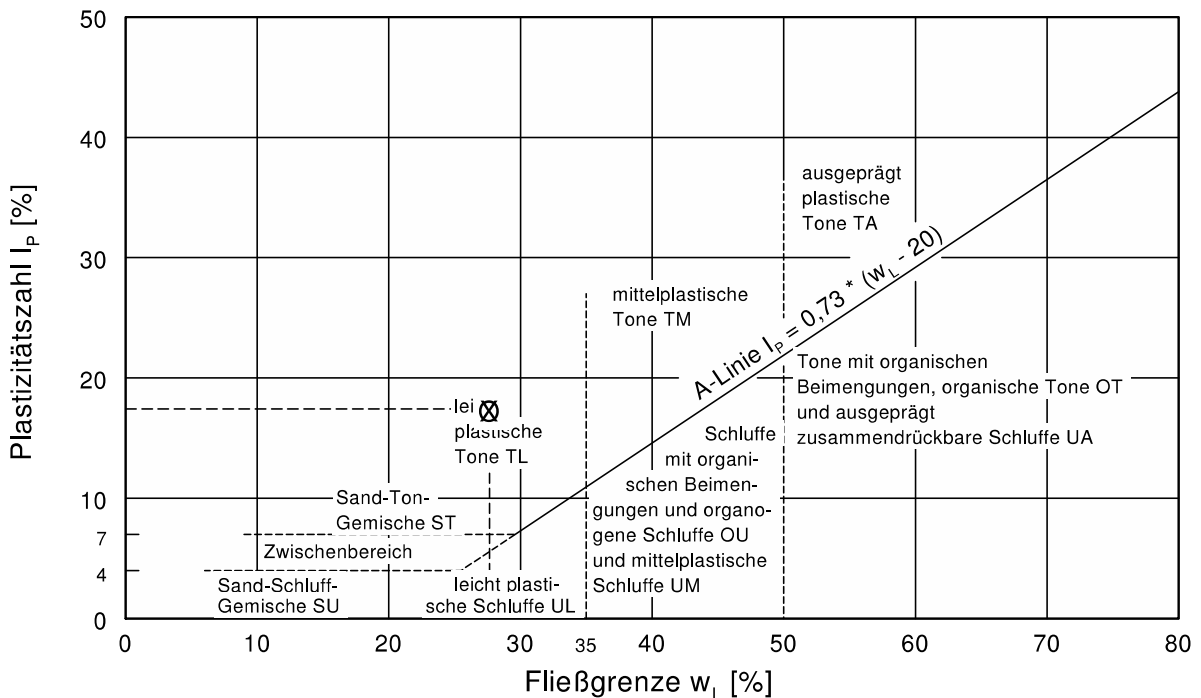
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfenerger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Zustandsgrenzen nach DIN 18 122

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

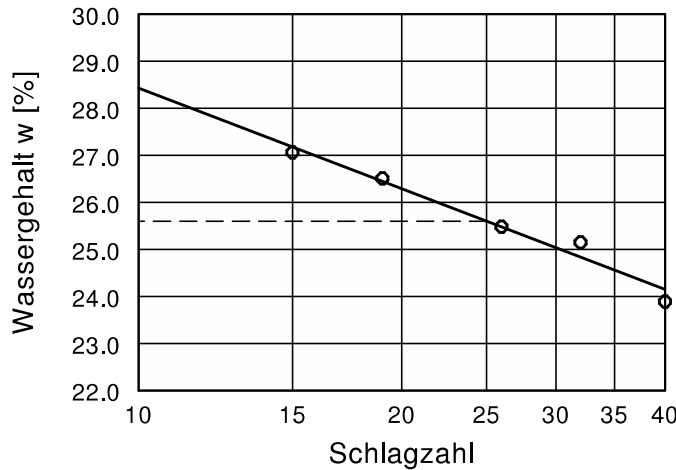
Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18122 - LM/ - P

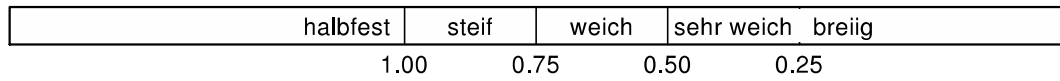


Fließgrenze  $w_L = 25.6 \%$   
 Ausrollgrenze  $w_P = 10.6 \%$   
 Plastizitätszahl  $I_P = 15.0 \%$

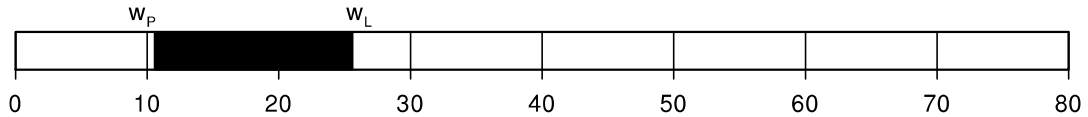
Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 78.0 \%$   
 Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

Untersuchung des Feinkornanteils

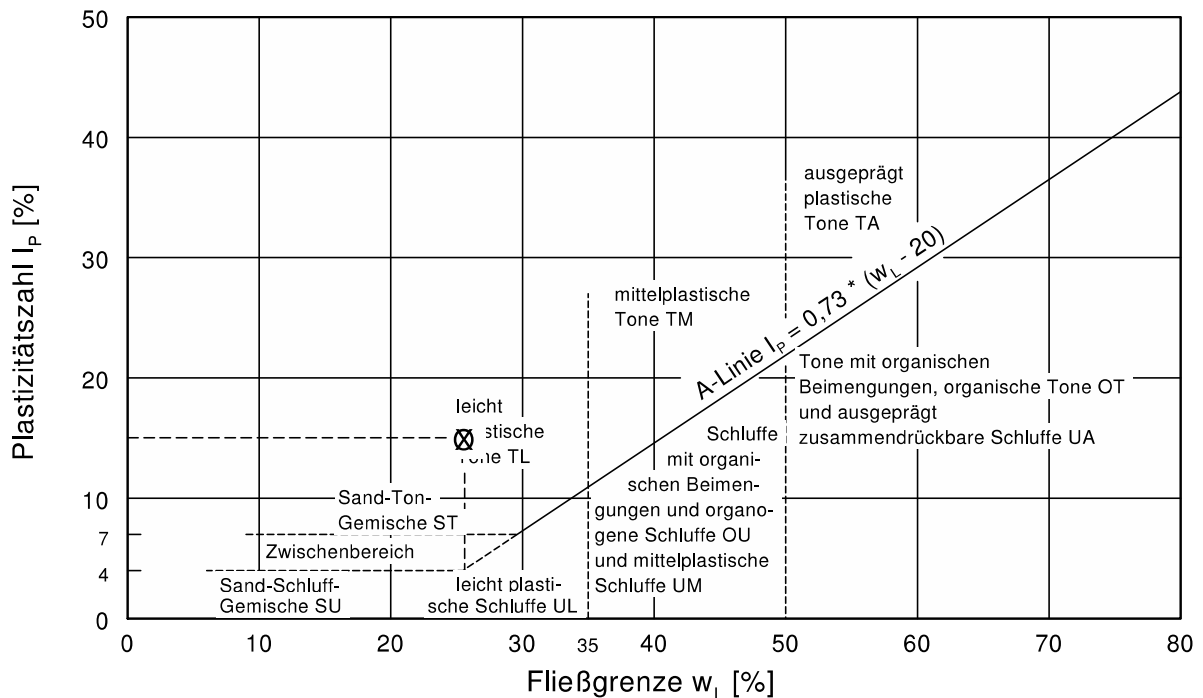
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfenerger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Zustandsgrenzen nach DIN 18 122

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

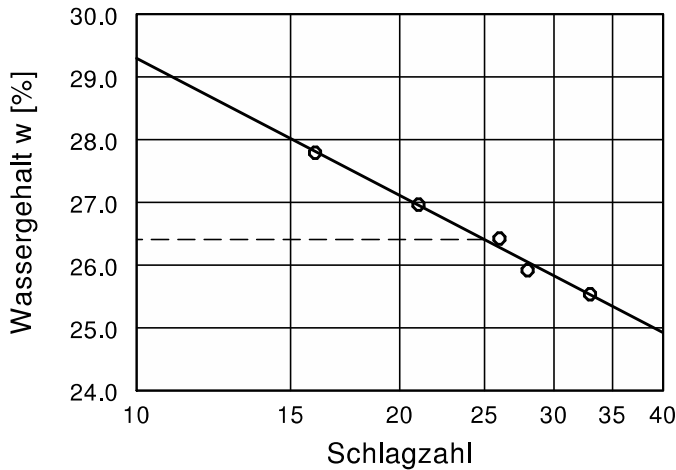
Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18122 - LM/ - P

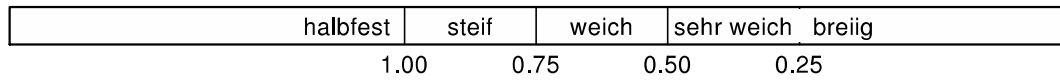


Fließgrenze  $w_L = 26.4 \%$   
Ausrollgrenze  $w_P = 10.9 \%$   
Plastizitätszahl  $I_P = 15.5$

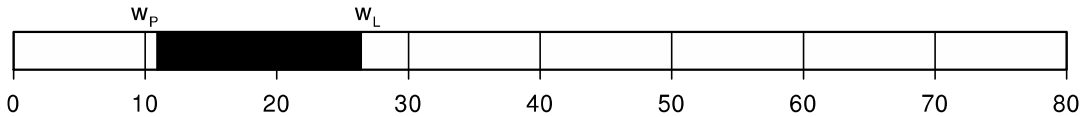
Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 78.0 \%$   
Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

Untersuchung des Feinkornanteils

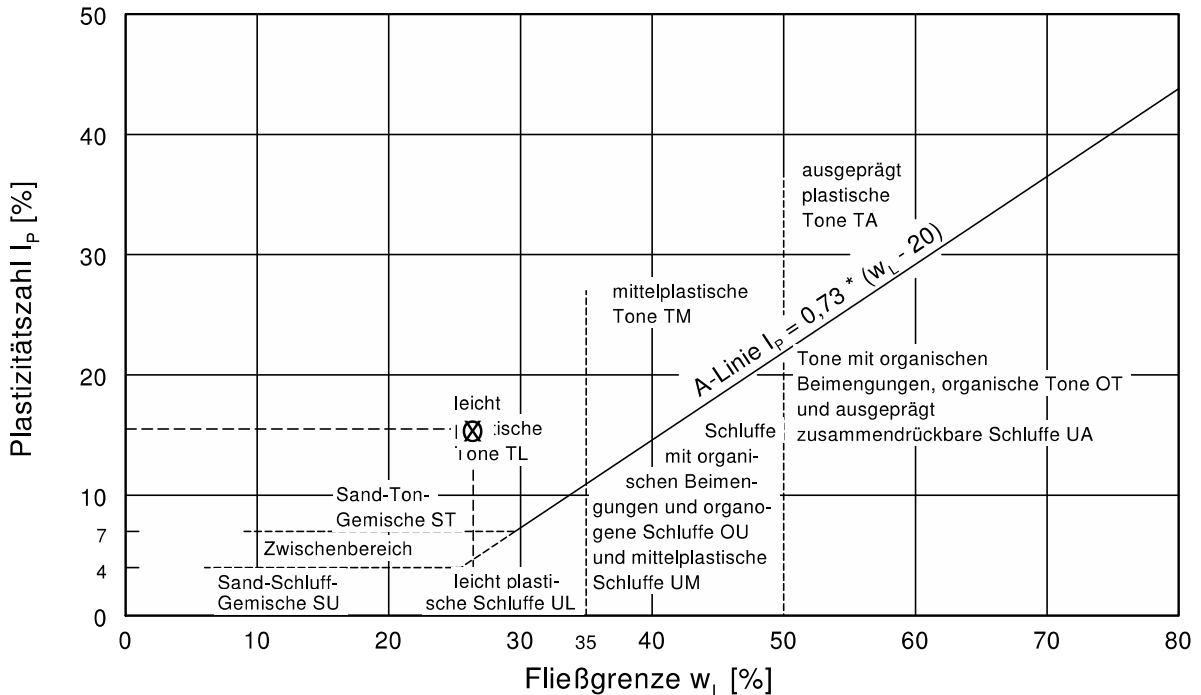
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Korndichte in Anlehnung an DIN EN 1097-6 (Weithalspyknometer) und DIN 18124

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Rotlagenkies

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung (Anlehnung an): Versuch DIN 18124 - WP/ DIN EN 1097-6, Abschnitt 8

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 24.01.2013

**Kurzzeichen (DIN 18196): GT**

Probenbezeichnung	Rotlagenkies, Big Bag 1	Rotlagenkies, Big Bag 2	Rotlagenkies, Big Bag 3
Pyknometer-Nr.	1	2	3
Masse Pyknometer mp [g]	742.500	742.300	742.400
Trockene Probe + Pyknometer m1 [g]	2100.500	1984.900	1873.200
Probe + Pyknometer + Wasser m2 [g]	2891.200	2820.600	2750.600
Temperatur Wasser T [°C]	22.400	22.600	22.200
Volumen Pyknometer V(pT) [cm³]	1307.940	1307.940	1307.940
Dichte Wasser bei T rho(wT) [g/cm³]	0.99771	0.99766	0.99775
Masse Wasser m(wT) = m2 - m1 [g]	790.700	835.700	877.400
Volumen Wasser V(wT) = m(wT) / rho(wT) [cm³]	792.519	837.661	879.378
Volumen Körner Vk = V(pT) - V(wT) [cm³]	515.421	470.279	428.562
Trockene Probe md = m1 - mp [g]	1358.000	1242.600	1130.800
Korndichte rhos = md / Vk [g/cm³]	2.635	2.642	2.639
<b>Mittelwert [g/cm³]</b>	<b>2.639</b>		

Probenbezeichnung			
Pyknometer-Nr.			
Masse Pyknometer mp [g]			
Trockene Probe + Pyknometer m1 [g]			
Probe + Pyknometer + Wasser m2 [g]			
Temperatur Wasser T [°C]			
Volumen Pyknometer V(pT) [cm³]			
Dichte Wasser bei T rho(wT) [g/cm³]			
Masse Wasser m(wT) = m2 - m1 [g]			
Volumen Wasser V(wT) = m(wT) / rho(wT) [cm³]			
Volumen Körner Vk = V(pT) - V(wT) [cm³]			
Trockene Probe md = m1 - mp [g]			
Korndichte rhos = md / Vk [g/cm³]			
<b>Mittelwert [g/cm³]</b>			

GGU-GRAIN-DENSITY - CampusLicence HS Regensburg  
CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

## Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

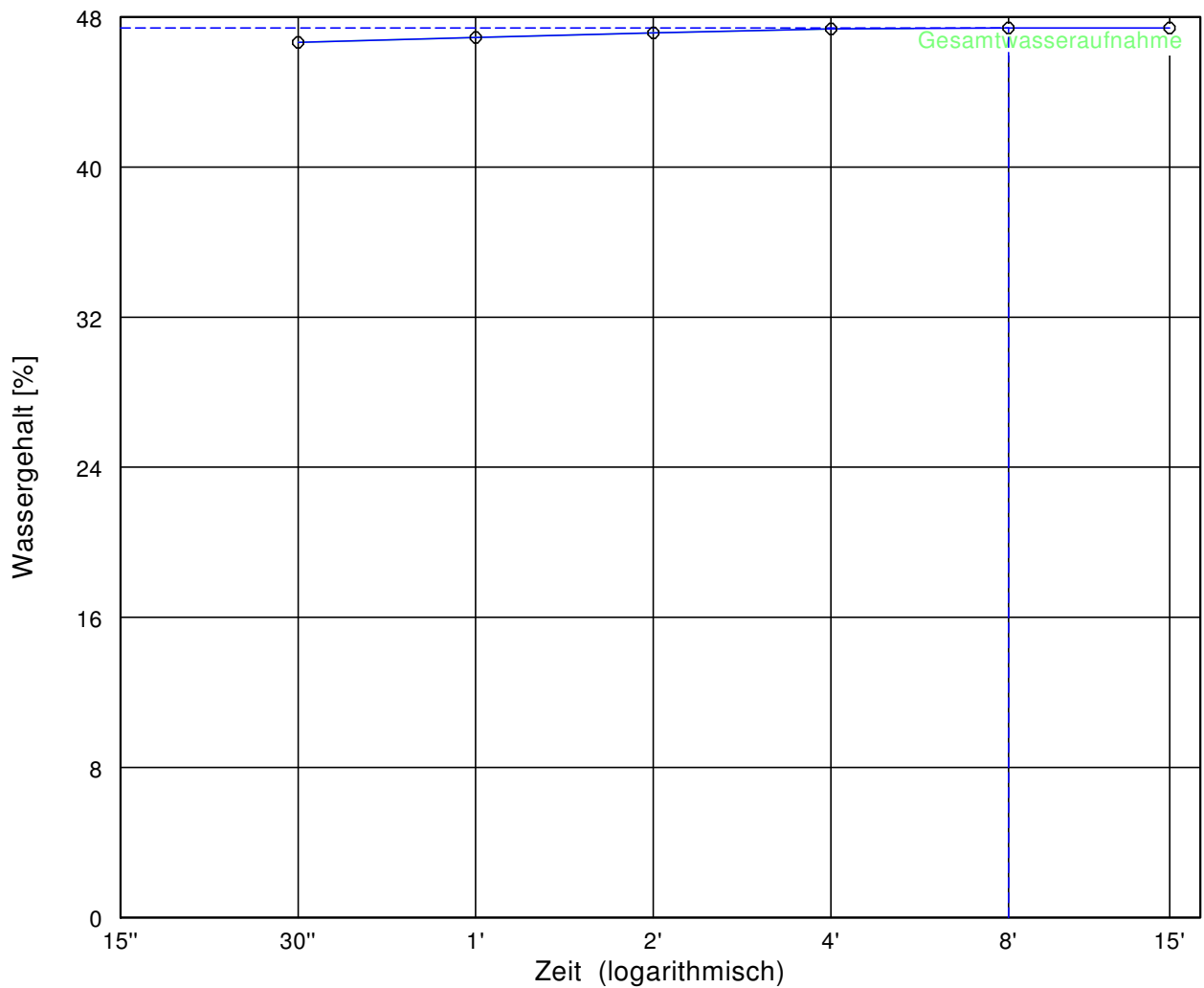
Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



## Untersuchung des Feinkornanteils; Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Wasseraufnahmevermögen [%] = 47.4	Wasseraufnahmevermögen: niedrig
Plastizität: leicht plastisch	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 1.940	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 30.5	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 28,5
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

## Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

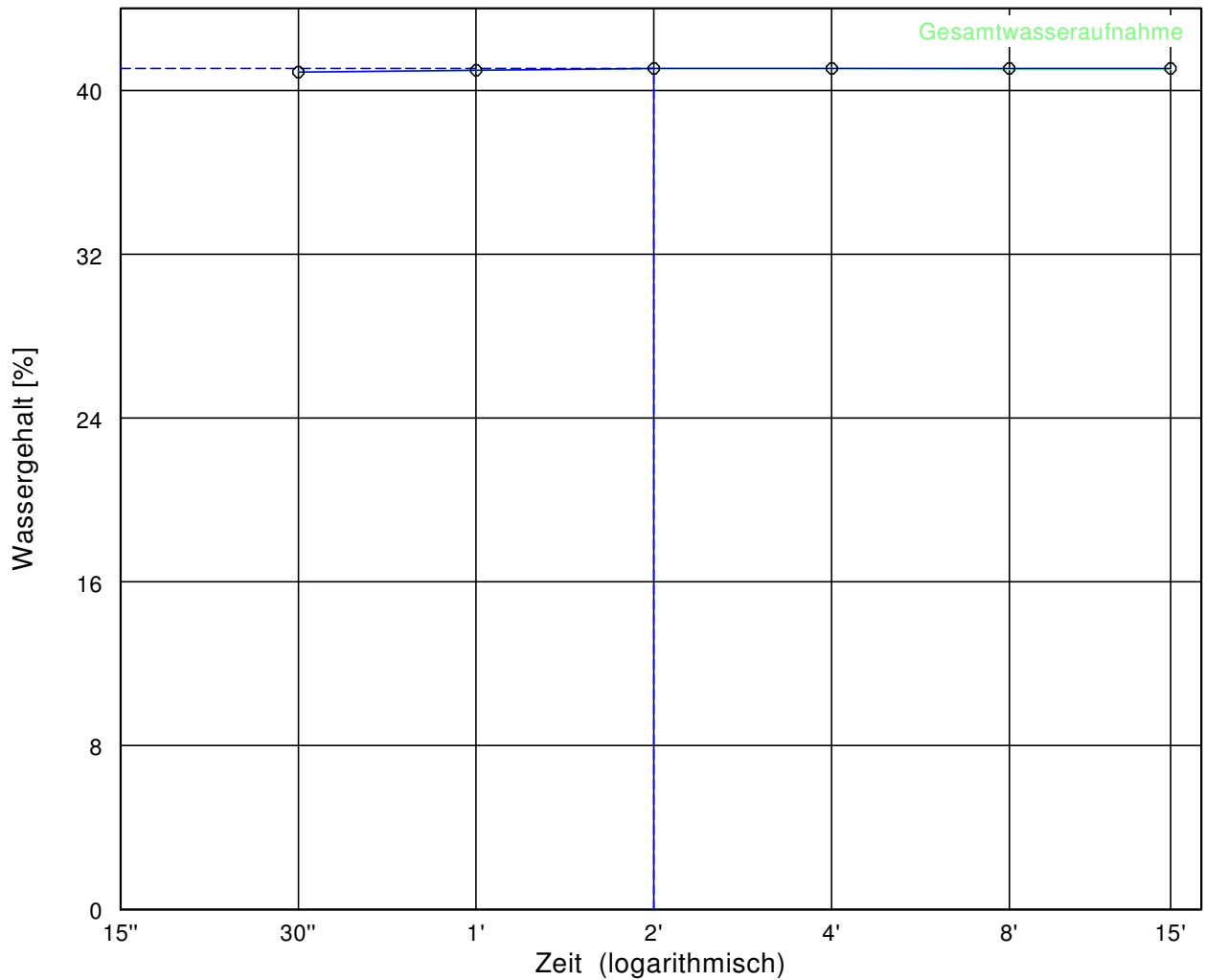
Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 1832 - A



## Untersuchung des Feinkornanteils; Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Wasseraufnahmevermögen [%] = 41.1	Wasseraufnahmevermögen: niedrig
Plastizität: leicht plastisch	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 2.250	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 24.2	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 28,5
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

## Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

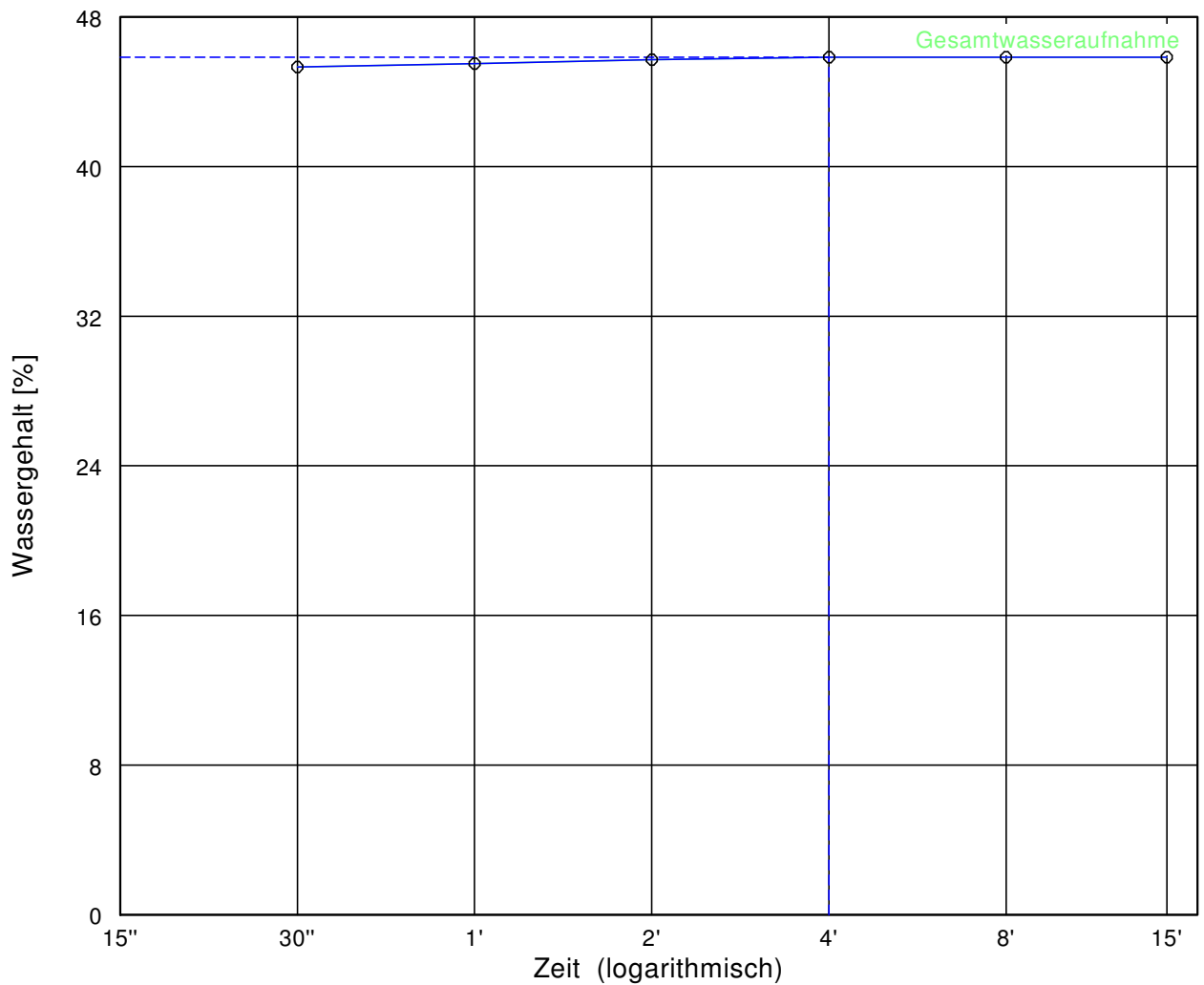
Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



## Untersuchung des Feinkornanteils; Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Wasseraufnahmevermögen [%] = 45.9	Wasseraufnahmevermögen: niedrig
Plastizität: leicht plastisch	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 2.290	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 28.9	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 28,5
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C



Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

**Kalkgehalt** nach DIN 18 129

**EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung**

**Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik**

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 18.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Rotlagenkies

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18129 - G

Probenbezeichnung	Rotlagenkies, Big Bag 1	Rotlagenkies, Big Bag 2	Rotlagenkies, Big Bag 3
Trockenmasse der Probe [g]	1.56	2.25	2.02
Temperatur [°C]	22.00	22.00	22.00
Absoluter Luftdruck [kPa]	101.50	101.50	101.50
Volumen nach 30 Sekunden [cm <sup>3</sup> ]	29.50	46.40	33.50
Volumen Versuchsende [cm <sup>3</sup> ]	35.00	57.70	41.60
Calcitanteil [-]	7.85	8.57	6.89
Dolomitanteil [-]	1.46	2.09	1.67
Kalkgehalt [-]	9.32	10.65	8.55

Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

**Glühverlust** nach DIN 18 128

**EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung**

**Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik**

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Rotlagenkies

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18128 - GL

Kurzzeichen (DIN 18196): GT

Probenbezeichnung	Rotlagenkies, Big Bag 1	Rotlagenkies, Big Bag 2	Rotlagenkies, Big Bag 3
Ungeglühte Probe + Behälter [g]	352.79	348.79	475.59
Geglühte Probe + Behälter [g]	349.66	345.90	471.95
Behälter [g]	132.38	120.40	193.96
Massenverlust [g]	3.13	2.89	3.64
Trockenmasse vor Glühen [g]	220.41	228.39	281.63
Glühverlust [-]	1.42 216	1.27	1.29

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

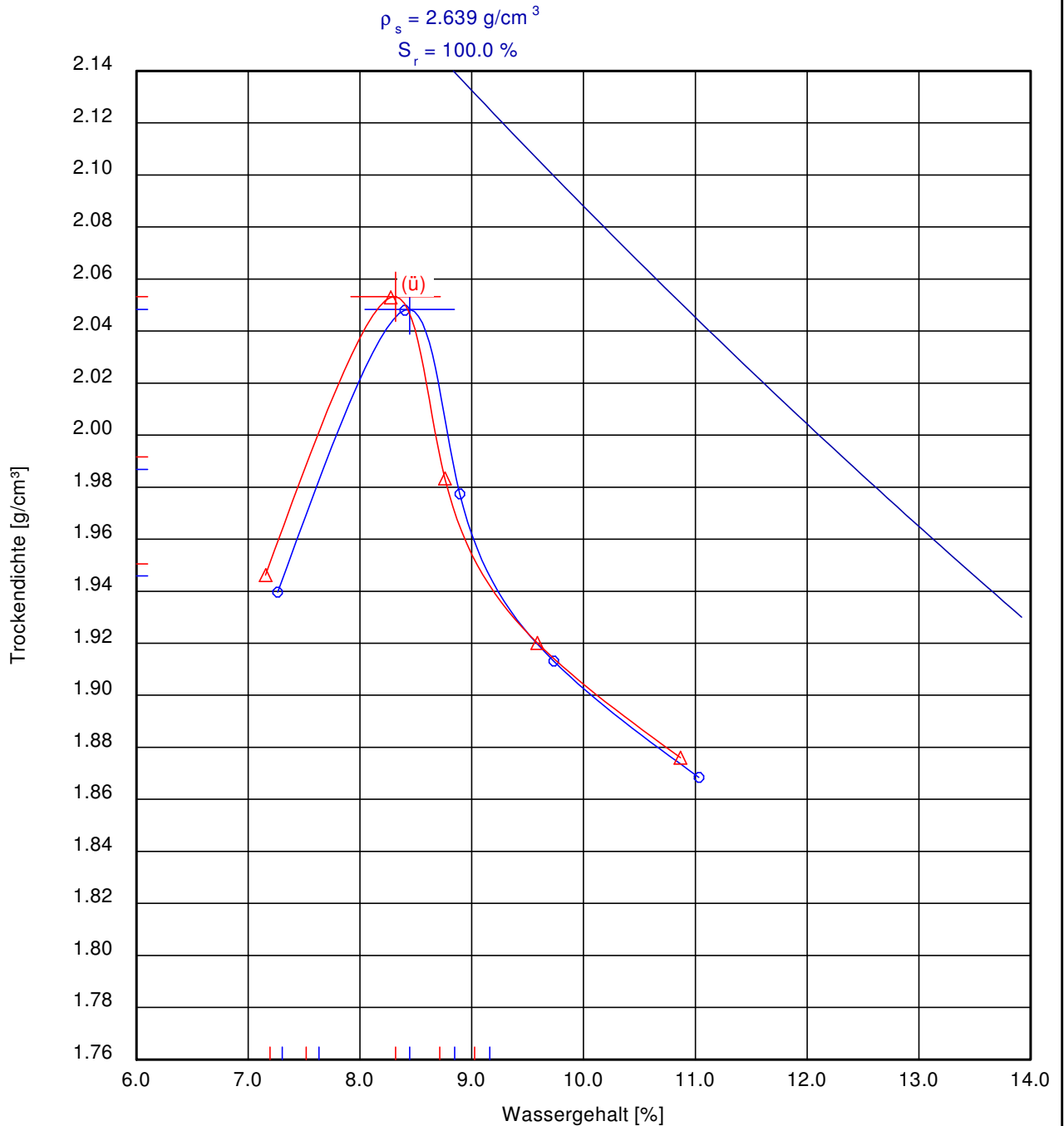
Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 150 X

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013



Überkornanteil: 1,5%; Kurzzeichen (DIN 18196): GT

100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.048 \text{ g/cm}^3$ (ü) 100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.053 \text{ g/cm}^3$	Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 8.4 \%$ Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 8.3 \%$
97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.987 \text{ g/cm}^3$ (ü) 97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.992 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.6 / 8.8 \%$ min/max Wassergehalt $w = 7.5 / 8.7 \%$
95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.946 \text{ g/cm}^3$ (ü) 95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.951 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.3 / 9.2 \%$ min/max Wassergehalt $w = 7.2 / 9.0 \%$

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

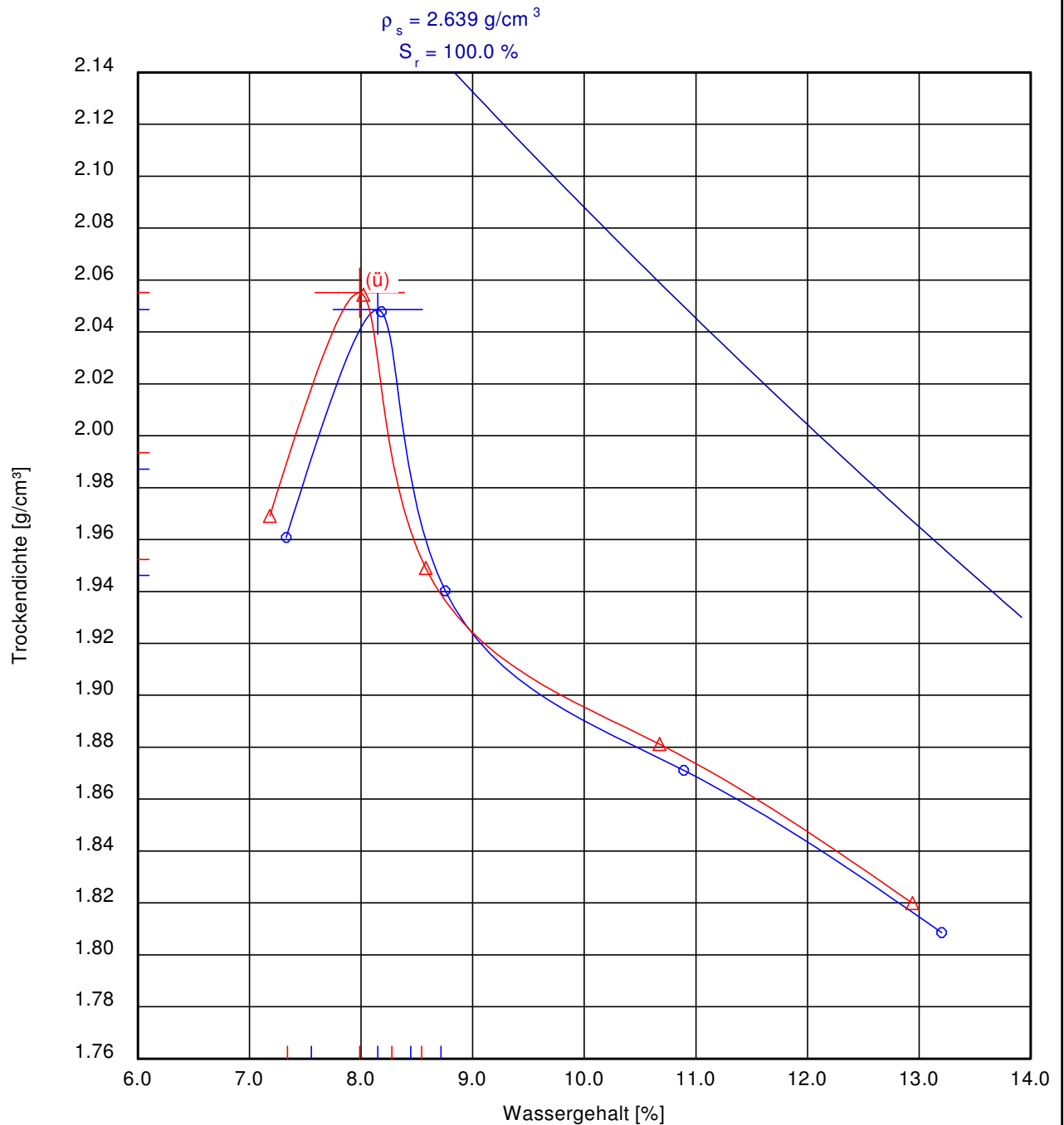
Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 150 X

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013



Überkornanteil: 2%; Kurzzeichen (DIN 18196): GT

100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.049 \text{ g/cm}^3$	Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 8.2 \text{ \%}$
(ü) 100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.055 \text{ g/cm}^3$	Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 8.0 \text{ \%}$
97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.987 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.6 / 8.4 \text{ \%}$
(ü) 97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.993 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.3 / 8.3 \text{ \%}$
95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.946 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = - / 8.7 \text{ \%}$
(ü) 95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.952 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = - / 8.5 \text{ \%}$

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Rotlagenkies, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

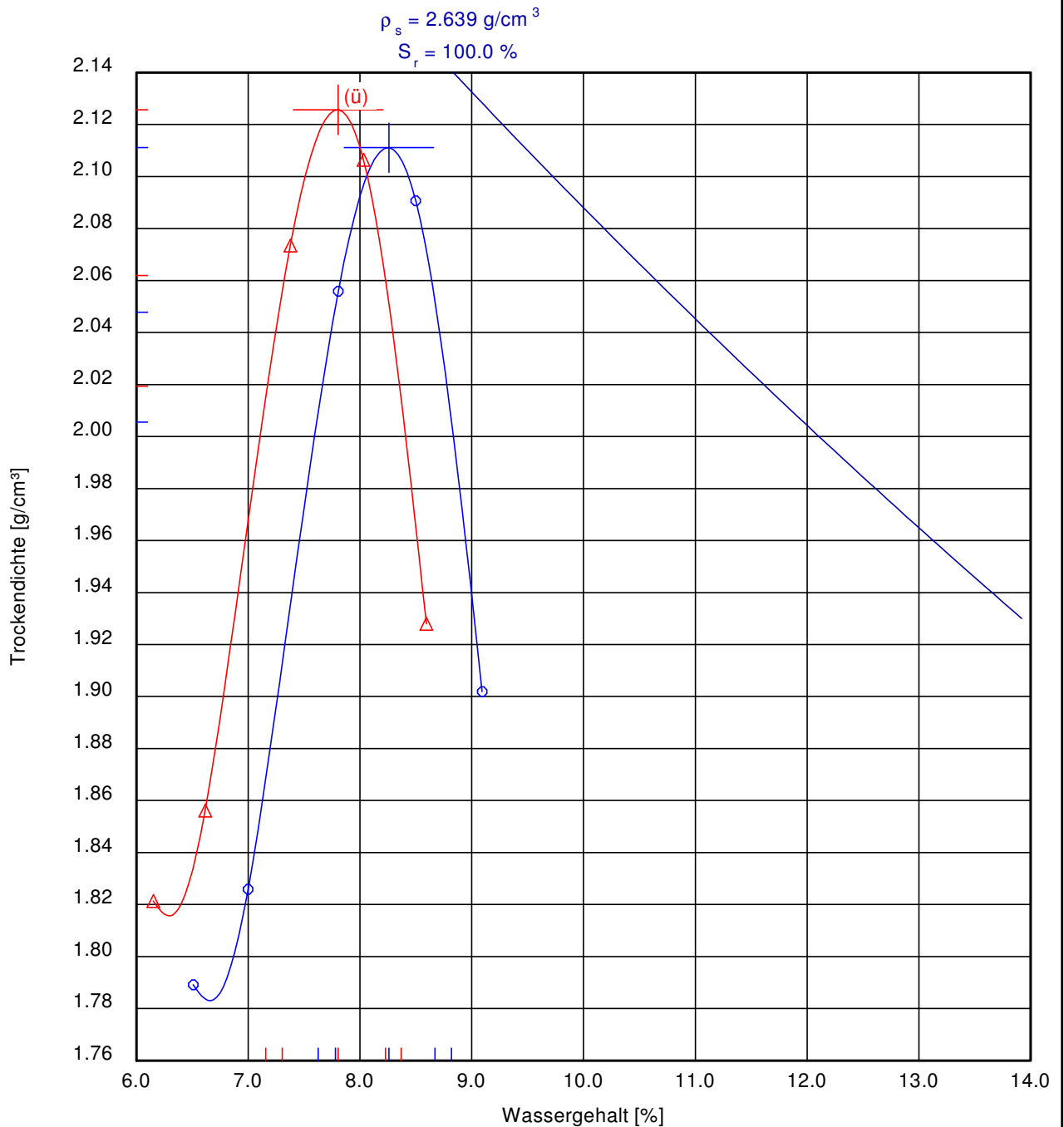
Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 150 X

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013

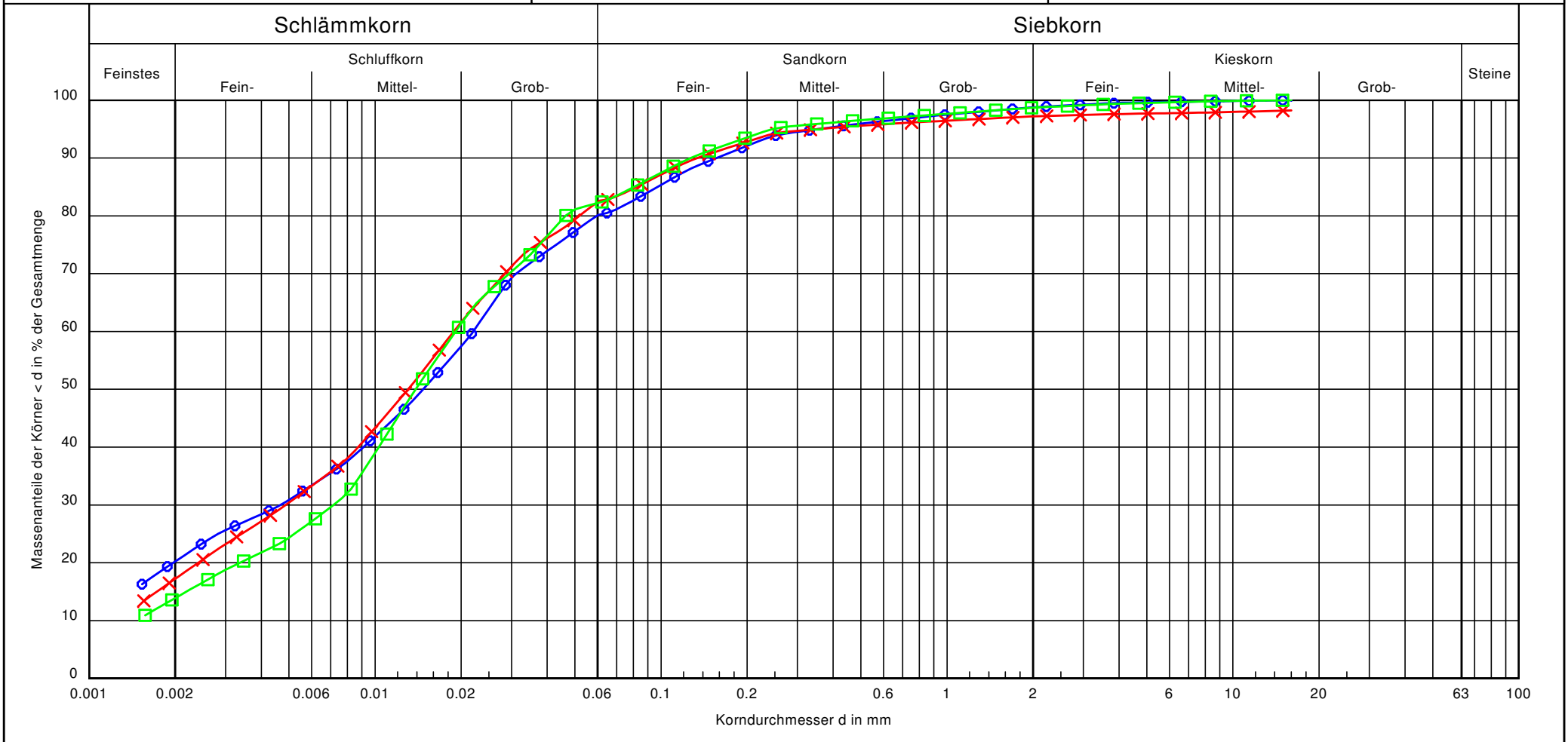


Überkornanteil: 5,5%; Kurzzeichen (DIN 18196): GT

100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.111 \text{ g/cm}^3$	Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 8.3 \%$
(ü) 100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.126 \text{ g/cm}^3$	Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 7.8 \%$
97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 2.048 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.8 / 8.7 \%$
(ü) 97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 2.062 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.3 / 8.2 \%$
95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 2.006 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.6 / 8.8 \%$
(ü) 95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 2.019 \text{ g/cm}^3$	min/max Wassergehalt $w = 7.2 / 8.4 \%$

GGU-SIEVE - CampusLicence HS Regensburg  
 CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre

Hochschule Regensburg UAS Labor für Geotechnik Prüferinger Straße 58 93049 Regensburg  Bearbeiter: Wagb/ Gömm      Datum: ab 28.01.2013	<h2 style="margin: 0;">Körnungslinie</h2> <p style="margin: 0;">Vorhaben: EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung          Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik</p>	Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen Probe entnommen am: 14.01.2013 Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag Arbeitsweise: Versuch DIN 18123 - 7 - Siebung und Sedimentation
--	--	---



Bezeichnung:	Lösslehm, Big Bag 1	Lösslehm, Big Bag 2	Lösslehm, Big Bag 3	Bemerkungen:	Bericht:  Anlage:
Kurzzeichen (DIN 18196)	TL	TL	TL		
Entnahmestelle:	Big Bag 1	Big Bag 2	Big Bag 3		
T/U/S/G [%]:	20.2/60.1/18.4/1.2	17.2/65.5/14.5/2.8	13.9/68.6/16.2/1.3		
Signatur:	○—○	×—×	□—□		

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Zustandsgrenzen nach DIN 18 122

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

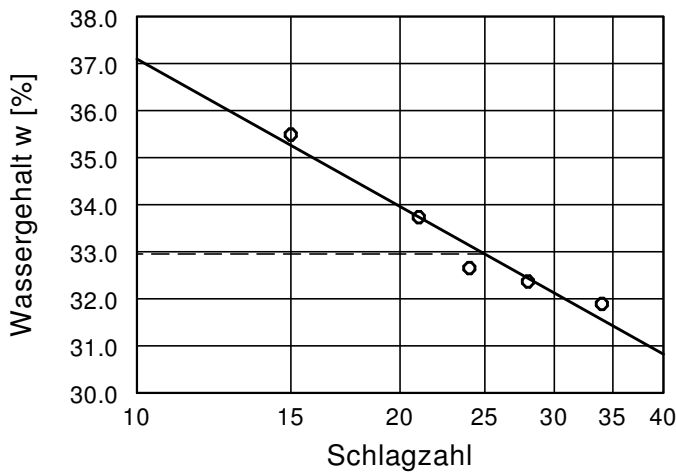
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

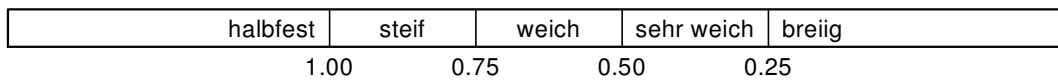
Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18122 - LM/ - P

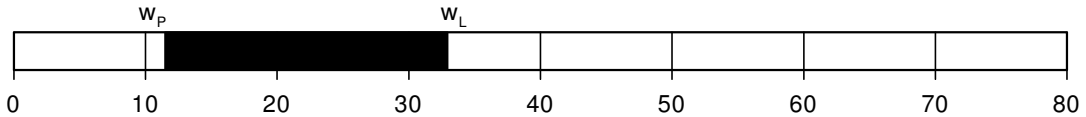


Fließgrenze  $w_L = 33.0 \%$   
 Ausrollgrenze  $w_P = 11.5 \%$   
 Plastizitätszahl  $I_P = 21.5 \%$   
 Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 5.0 \%$   
 Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

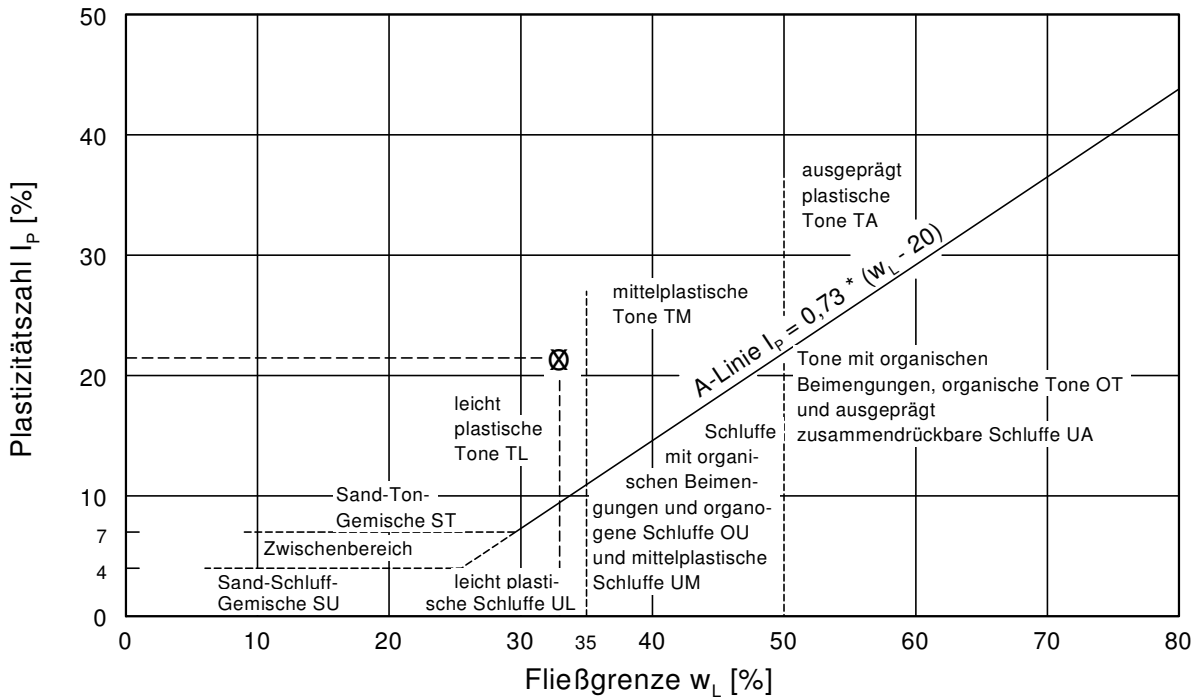
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Zustandsgrenzen nach DIN 18 122

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

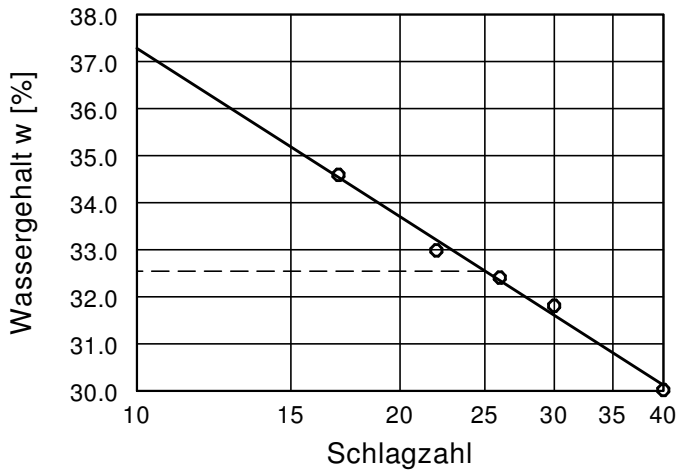
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

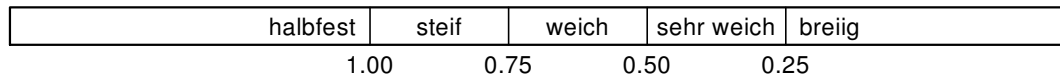
Probe entnommen am: U, t, fs' (TL)

Bezeichnung Versuch DIN 18122 - LM/- P

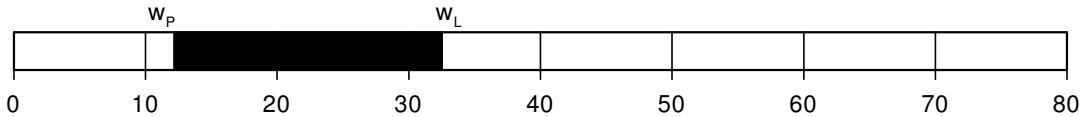


Fließgrenze  $w_L = 32.5 \%$   
 Ausrollgrenze  $w_P = 12.2 \%$   
 Plastizitätszahl  $I_P = 20.3 \%$   
 Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 5.0 \%$   
 Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

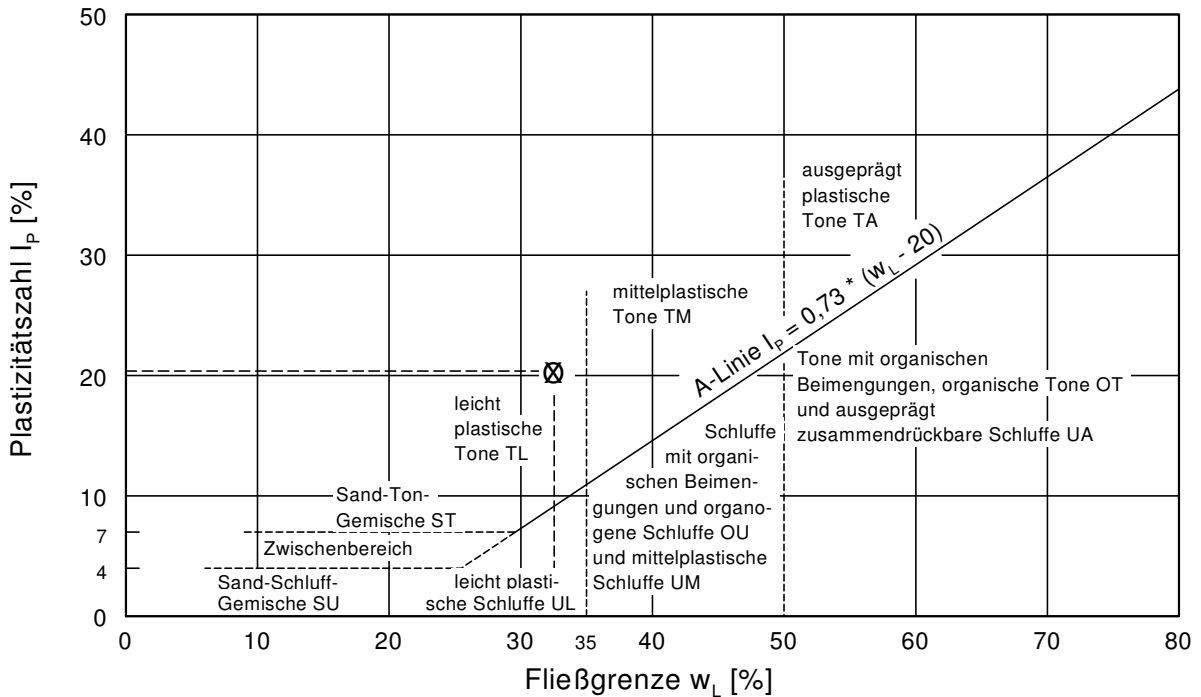
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



GGU-ATTERBERG - CampusLicence HS Regensburg  
 CampusLicenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Zustandsgrenzen nach DIN 18 122

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 22.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

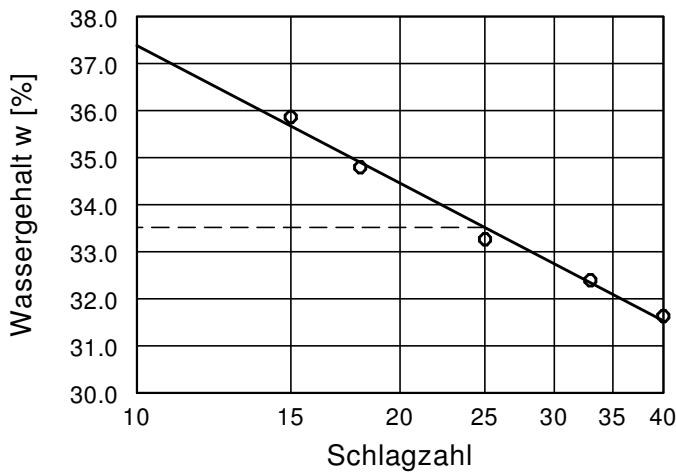
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

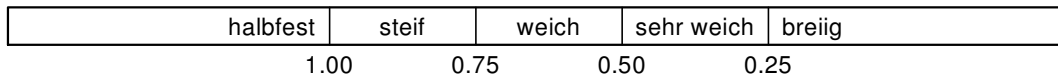
Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18122 - LM/ - P

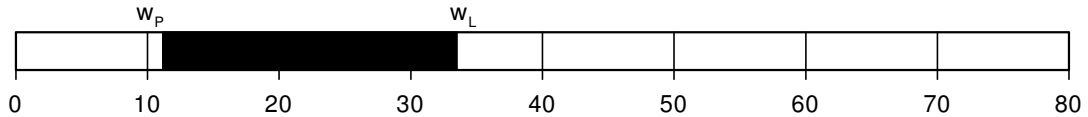


Fließgrenze  $w_L = 33.5 \%$   
 Ausrollgrenze  $w_P = 11.2 \%$   
 Plastizitätszahl  $I_P = 22.3 \%$   
 Anteil Überkorn  $\ddot{u} = 4.0 \%$   
 Wassergeh. Überk.  $w_{\ddot{u}} = 0.0 \%$

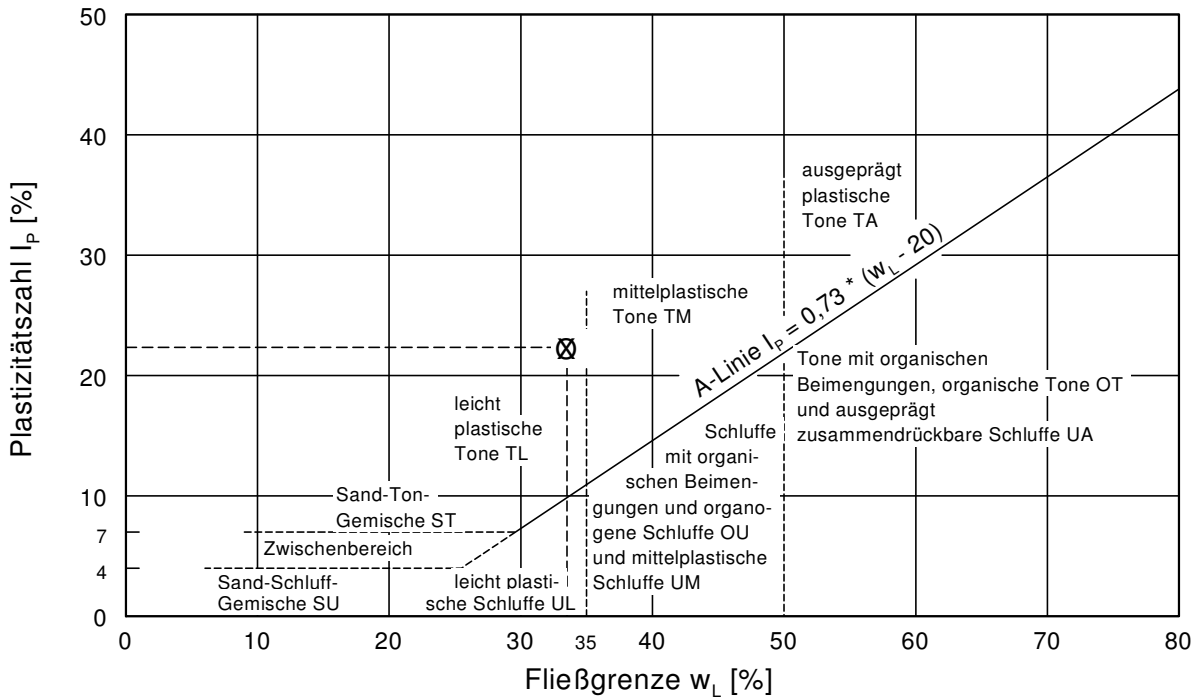
Zustandsform



Plastizitätsbereich ( $w_L$  bis  $w_P$ ) [%]



Plastizitätsdiagramm



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Korndichte in Anlehnung an DIN EN 1097-6 (Weithalspyknometer) und DIN 18124

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Lösslehm

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung (Anlehnung an): Versuch DIN 18124 - WP/ DIN EN 1097-6, Abschnitt 8

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 24.01.2013

Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Probenbezeichnung	Lösslehm, Big Bag 1	Lösslehm, Big Bag 2	Lösslehm, Big Bag 3
Pyknometer-Nr.	1	2	3
Masse Pyknometer mp [g]	741.380	742.300	742.500
Trockene Probe + Pyknometer m1 [g]	1947.300	1604.400	1406.500
Probe + Pyknometer + Wasser m2 [g]	2805.000	2591.500	2466.000
Temperatur Wasser T [°C]	23.600	22.600	20.000
Volumen Pyknometer V(pT) [cm <sup>3</sup> ]	1307.940	1307.940	1307.940
Dichte Wasser bei T rho(wT) [g/cm <sup>3</sup> ]	0.99742	0.99766	0.99823
Masse Wasser m(wT) = m2 - m1 [g]	857.700	987.100	1059.500
Volumen Wasser V(wT) = m(wT) / rho(wT) [cm <sup>3</sup> ]	859.918	989.416	1061.377
Volumen Körner Vk = V(pT) - V(wT) [cm <sup>3</sup> ]	448.022	318.524	246.563
Trockene Probe md = m1 - mp [g]	1205.920	862.100	664.000
Korndichte rhos = md / Vk [g/cm <sup>3</sup> ]	2.692	2.707	2.693
Mittelwert [g/cm <sup>3</sup> ]	2.697		

Probenbezeichnung			
Pyknometer-Nr.			
Masse Pyknometer mp [g]			
Trockene Probe + Pyknometer m1 [g]			
Probe + Pyknometer + Wasser m2 [g]			
Temperatur Wasser T [°C]			
Volumen Pyknometer V(pT) [cm <sup>3</sup> ]			
Dichte Wasser bei T rho(wT) [g/cm <sup>3</sup> ]			
Masse Wasser m(wT) = m2 - m1 [g]			
Volumen Wasser V(wT) = m(wT) / rho(wT) [cm <sup>3</sup> ]			
Volumen Körner Vk = V(pT) - V(wT) [cm <sup>3</sup> ]			
Trockene Probe md = m1 - mp [g]			
Korndichte rhos = md / Vk [g/cm <sup>3</sup> ]			
Mittelwert [g/cm <sup>3</sup> ]			

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

## Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

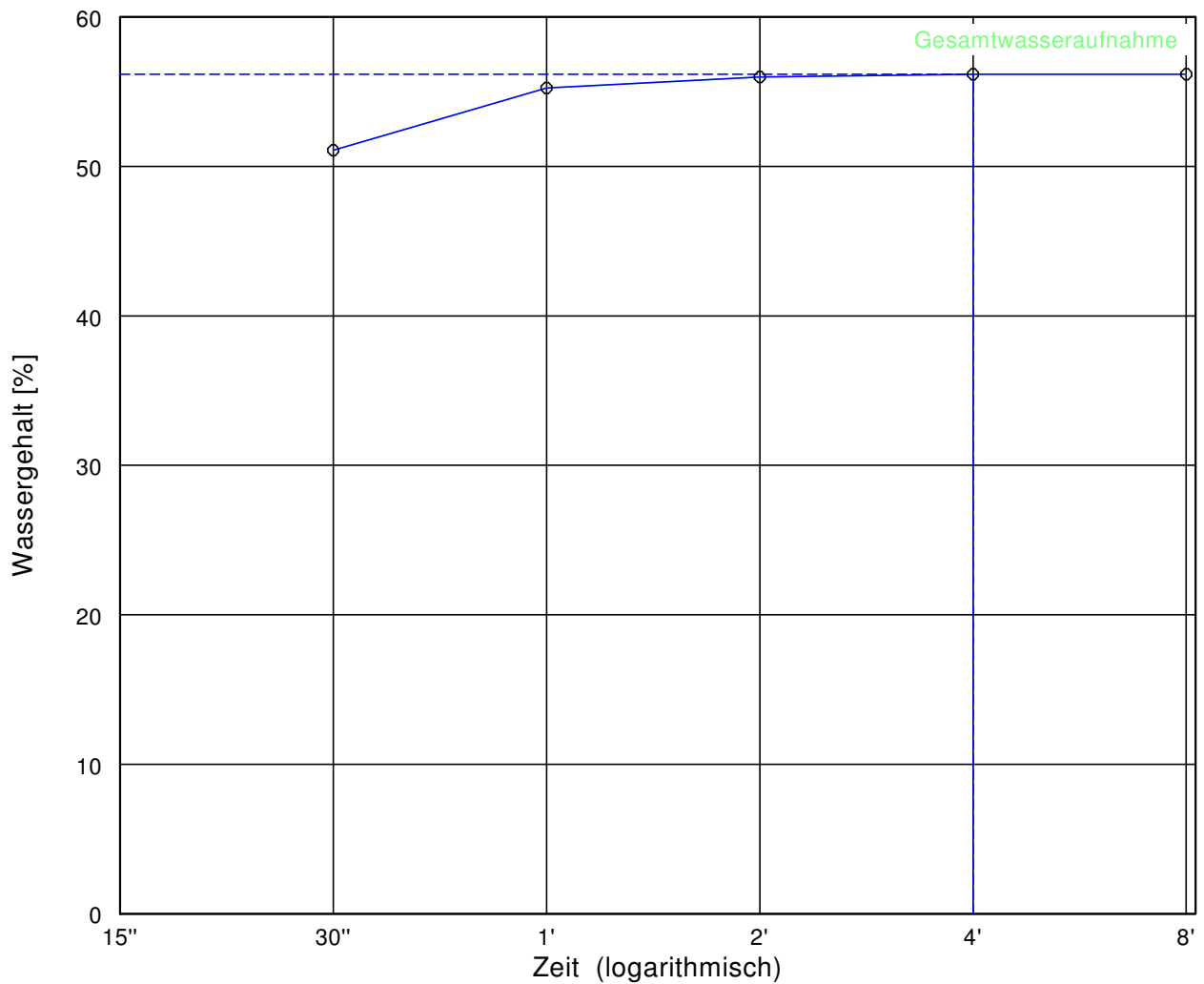
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Wasseraufnahmevermögen [%] = 56.2	Wasseraufnahmevermögen: niedrig
Plastizität: leicht plastisch	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 2.760	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 39.2	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 95
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

Wasseraufnahmevermögen

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

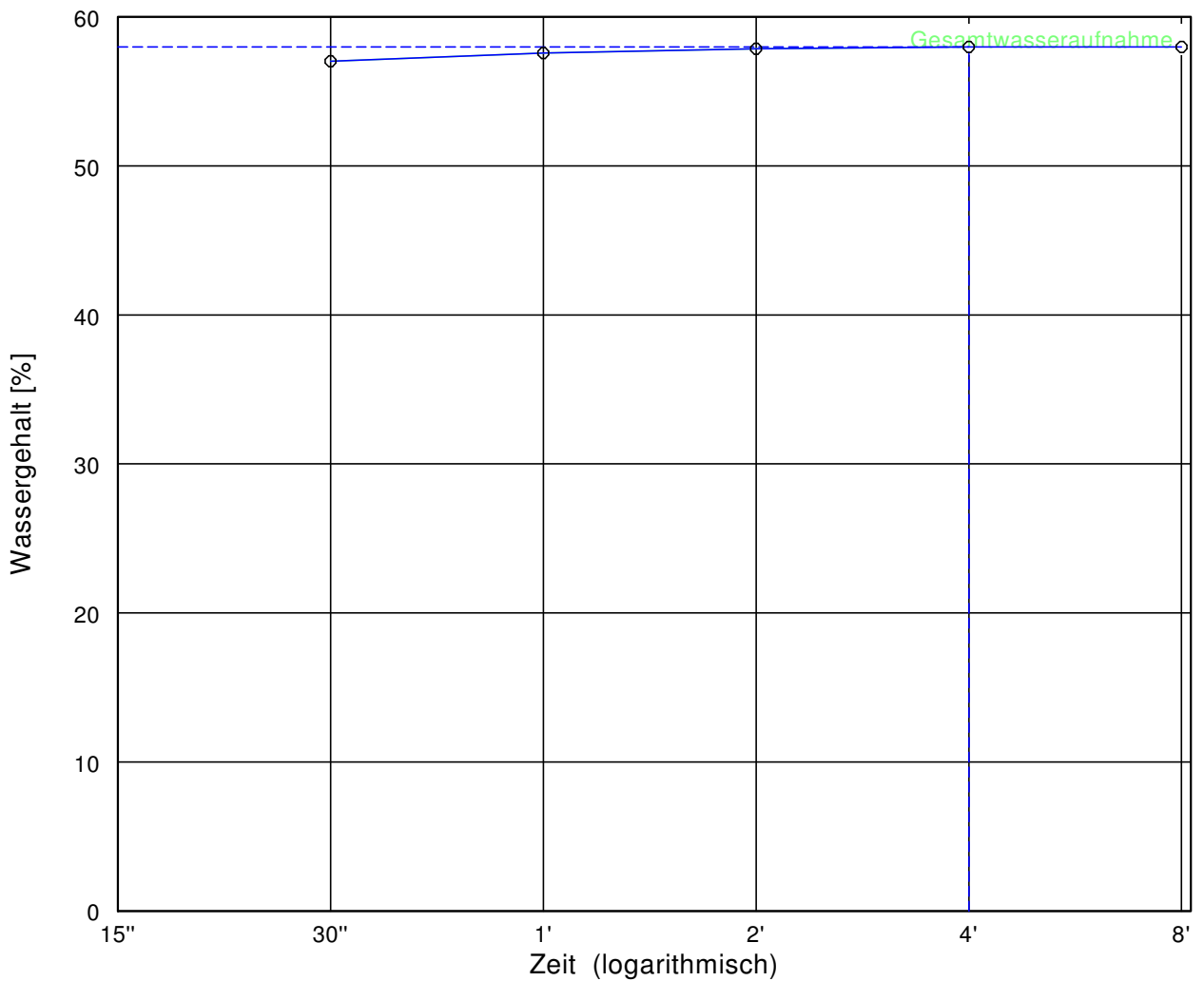
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A



Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Wasseraufnahmevermögen [%] = 58.0	Wasseraufnahmevermögen: niedrig
Plastizität: leicht plastisch	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 1.780	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 41.0	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 95
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

Wasseraufnahmevermögen

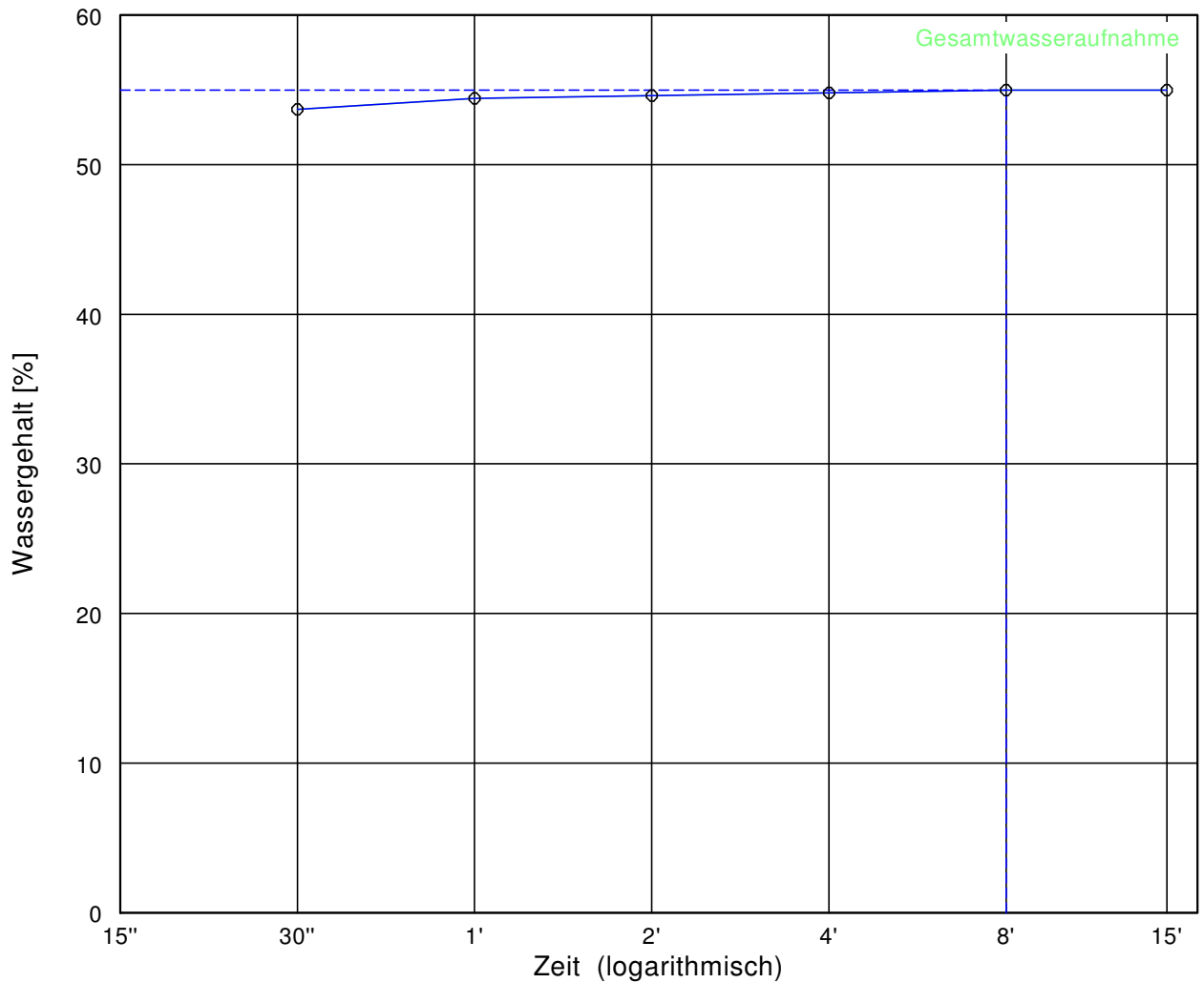
EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung

Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen  
 Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 3  
 Entnahmestelle: Big Bag 3  
 Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag  
 Probe entnommen am: 14.01.2013  
 Bezeichnung: Versuch DIN 18132 - A

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013



Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Wasseraufnahmevermögen [%] = 55.0	Wasseraufnahmevermögen: niedrig
Plastizität: leicht plastisch	Wasserbindevermögen [-] = -
Trockengewicht [g] = 2.710	nat. Wassergehalt [%] = -
Fließgrenze [%] = 38.0	Konsistenz [-] = -
Raumtemperatur [°C] = 23,2	Anteil der Körner < 0.4 mm [%] = 96
Bemerkung: Probengewinnung durch Nasssiebung	und Trocknung bei 60 °C

Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

**Kalkgehalt** nach DIN 18 129

**EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung**

**Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik**

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 17.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Lösslehm

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18129 - G

Probenbezeichnung	Lösslehm, Big Bag 1	Lösslehm, Big Bag 2	Lösslehm, Big Bag 3
Trockenmasse der Probe [g]	3.92	4.57	4.05
Temperatur [°C]	22.00	22.00	22.00
Absoluter Luftdruck [kPa]	101.50	101.50	101.50
Volumen nach 30 Sekunden [cm <sup>3</sup> ]	43.40	35.50	41.20
Volumen Versuchsende [cm <sup>3</sup> ]	69.40	55.40	63.20
Calcitanteil [-]	4.60	3.23	4.23
Dolomitanteil [-]	2.75	1.81	2.26
Kalkgehalt [-]	7.35	5.04	6.48

Hochschule Regensburg UAS  
 Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:  
 Anlage:

**Glühverlust** nach DIN 18 128

**EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung**

**Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik**

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

Bezeichnung: Lösslehm

Entnahmestelle: Big Bag 1/ Big Bag 2/ Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18128 - GL

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 16.01.2013

Kurzzeichen (DIN 18196): TL

Probenbezeichnung	Lösslehm, Big Bag 1	Lösslehm, Big Bag 2	Lösslehm, Big Bag 3
Ungeglühte Probe + Behälter [g]	183.42	196.99	292.72
Geglühte Probe + Behälter [g]	181.23	193.26	289.95
Behälter [g]	109.57	78.48	200.59
Massenverlust [g]	2.19	3.73	2.77
Trockenmasse vor Glühen [g]	73.85	118.51	92.13
Glühverlust [-]	2.97 229	3.15	3.01

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung  
 Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

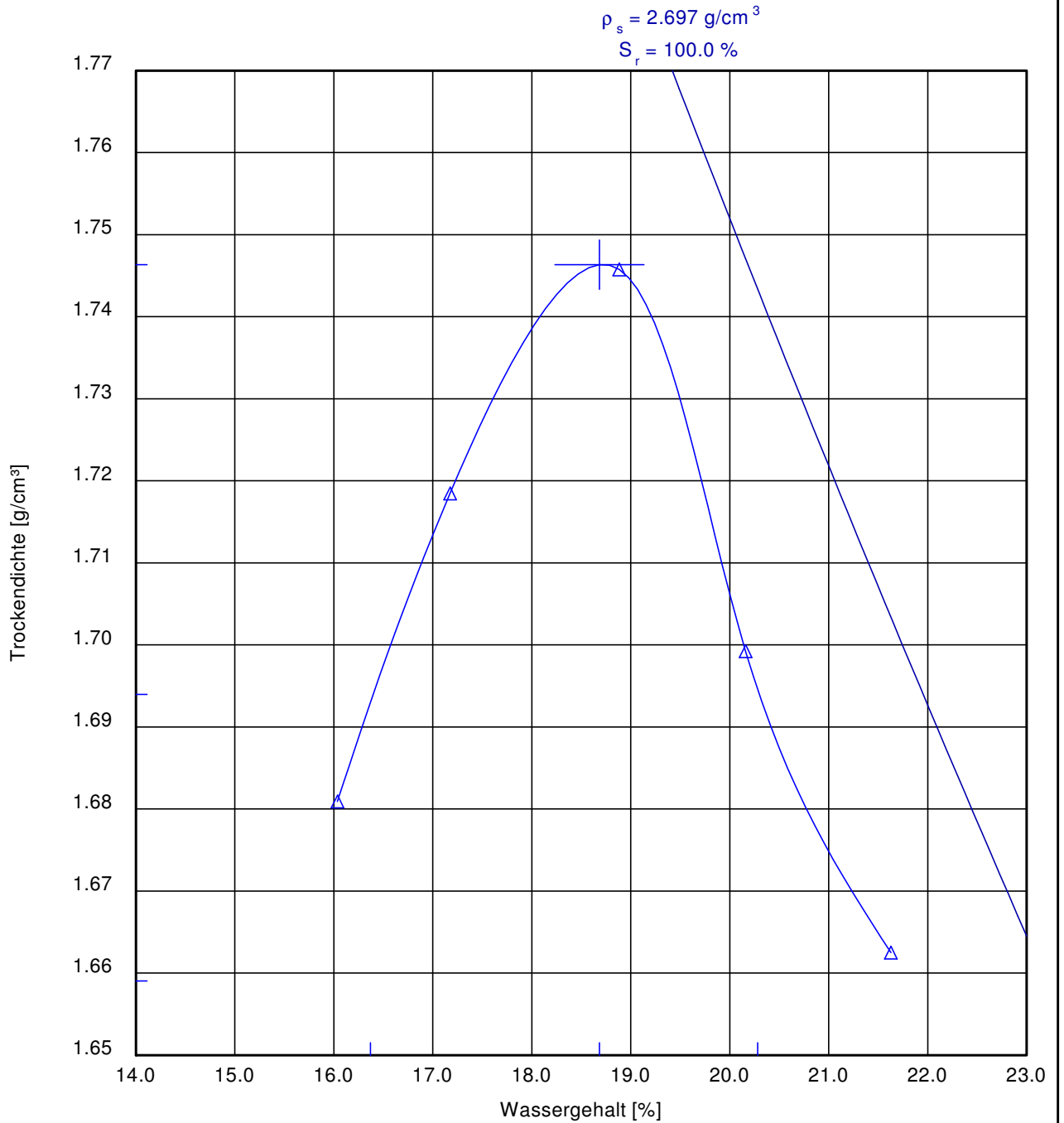
Bezeichnung Lösslehm, Big Bag 1

Entnahmestelle: Big Bag 1

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 100 Y



Kurzzeichen (DIN 18196): TL

100 % der Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1.746 \text{ g/cm}^3$

Optimaler Wassergehalt  $w_{Pr} = 18.7 \%$

97.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.694 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = 16.4 / 20.3 \%$

95.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.659 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / - \%$



Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
Prüfeninger Straße 58  
93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung  
Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

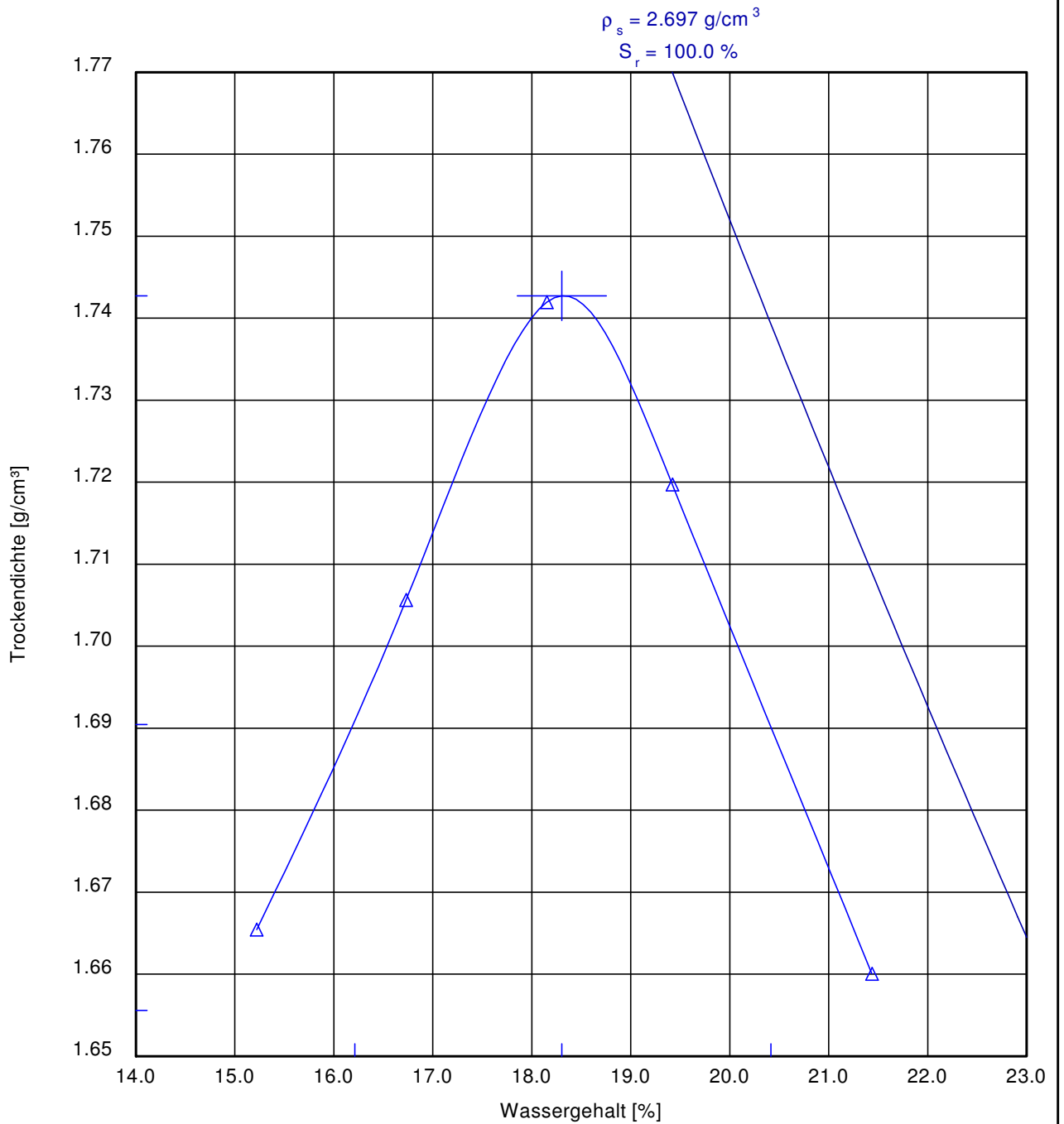
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 2

Entnahmestelle: Big Bag 2

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 100 Y



Kurzzeichen (DIN 18196): TL

100 % der Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1.743 \text{ g/cm}^3$

Optimaler Wassergehalt  $w_{Pr} = 18.3 \%$

97.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.690 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = 16.2 / 20.4 \%$

95.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.656 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / - \%$

Hochschule Regensburg UAS

Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58  
 93049 Regensburg

Bericht:

Anlage:

# Proctorkurve

EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung  
 Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik

Bearbeiter: Wagb/ Gömm

Datum: 15.01.2013

Prüfungsnummer: Arbeitsschritt II, Phase I - Vorversuchsreihen

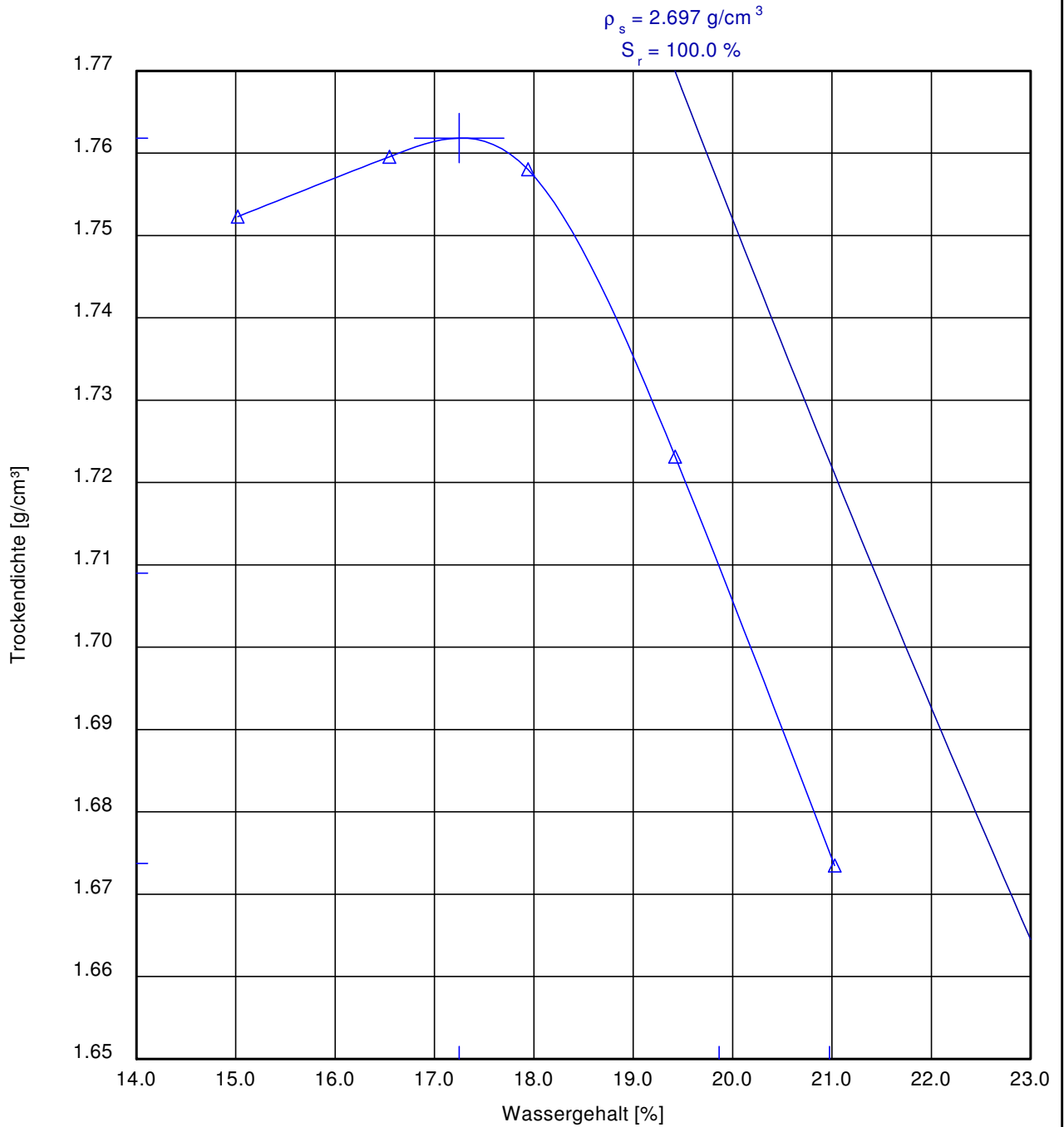
Bezeichnung: Lösslehm, Big Bag 3

Entnahmestelle: Big Bag 3

Art der Entnahme: Eimerprobe Big Bag

Probe entnommen am: 14.01.2013

Bezeichnung: Versuch DIN 18127 - P 100 X



Kurzzeichen (DIN 18196): TL

100 % der Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1.762 \text{ g/cm}^3$

Optimaler Wassergehalt  $w_{Pr} = 17.2 \%$

97.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.709 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 19.9 \%$

95.0 % der Proctordichte  $\rho_d = 1.674 \text{ g/cm}^3$

min/max Wassergehalt  $w = - / 21.0 \%$

**Leitfähigkeits- und pH-Wert-Messung des Wassers an der Hochschule Regensburg**

Tag der Messung: 28.05.2013

Verwendetes Gerät: Hanna Combo pH & EC; HI 98129

Gerätedaten:	Messbereich	Anzeigegenauigkeit	Messgenauigkeit bei 20°C
Temperatur	0,0 - 60,0 °C	Temperatur 0,1 °C	Temperatur ±0,5 °C
pH-Wert	0,00 - 14,00 pH	pH-Wert 0,01 pH	pH-Wert ±0,05 pH
Leitfähigkeit	0 - 3999 µS/cm	Leitfähigkeit 1 µS/cm	Leitfähigkeit ±2% vom Messwert µS/cm

Vorgehensweise:

- Wasserhahn 1 Minute voll geöffnet lassen, um abgestandenes Wasser ablaufen zu lassen
- Ausspülen eines 1-l-Kunststoffmesszylinders mit Leitungswasser aus dem jeweiligen Labor und Befüllen des Zylinders
- Spülen der Messfühler des Messgerätes unter fließendem Wasser
- Eintauchen des Gerätes, 1 Minute Wartezeit, anschließend Ablesung aller drei Messwerte

Messergebnisse:	Labor für Geotechnik	Labor für Baustoffkunde	Angaben der REWAG (lokaler Wasserversorger)
Temperatur	18,9 °C	Temperatur 18,2 °C	Temperatur --- °C
pH-Wert	7,13 pH	pH-Wert 7,06 pH	pH-Wert 7,4 pH
Leitfähigkeit	573 µS/cm	Leitfähigkeit 584 µS/cm	Leitfähigkeit 630 µS/cm
			Gesamthärte 17 °dH

OTH Regensburg - EnEff: Wärme - Labor für Geotechnik  
 Prüfeninger Straße 58 - 93049 Regensburg  
 Vorhaben: EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung  
 Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe - AP Bodenmechanik

Bericht: Vorabzug  
 Anlage:

Dreiaxialversuch DIN 18137 (Teil 2)

Produkt: C\_ST\*  
 Alter: 29d - 39d  
 Herstellungsdatum: 01.10.2013  
 Lagerungsbed.: gesättigtes System  
 Prüfbeginn/ Alter: 30.10.2013/ 29d  
 Probe eingebaut am: 30.10.2013

Phase: Arbeitsschritt II, Phase II, Bodenmech. Eigenschaften ZFSV

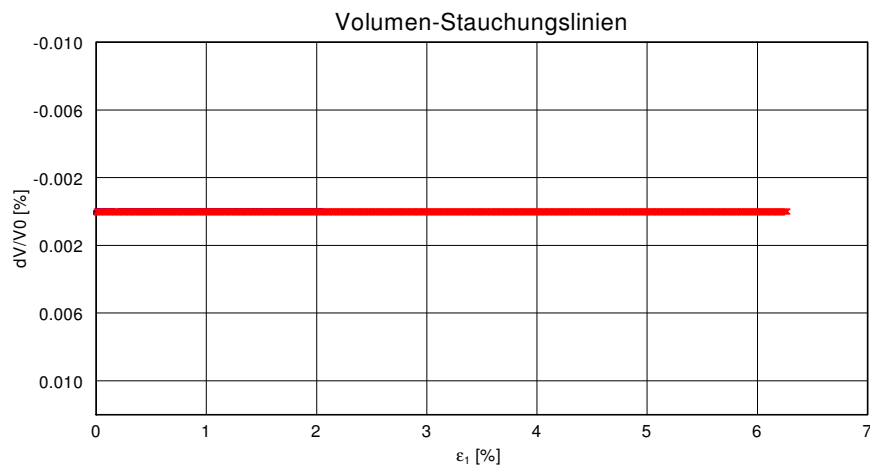
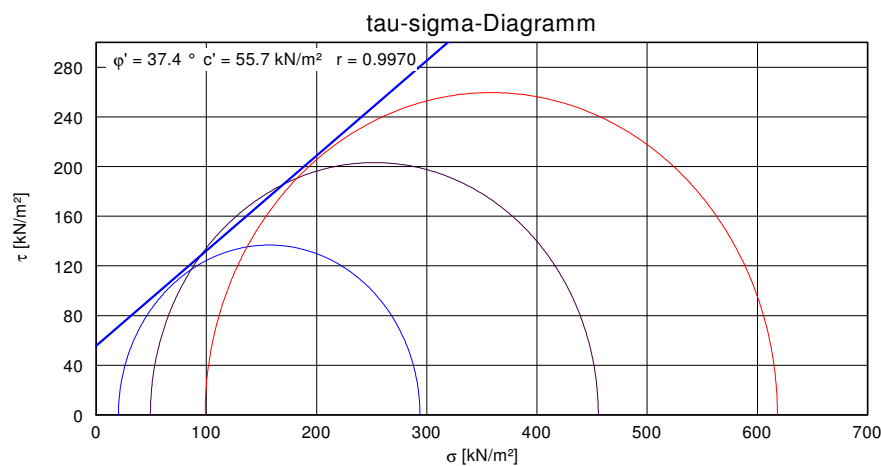
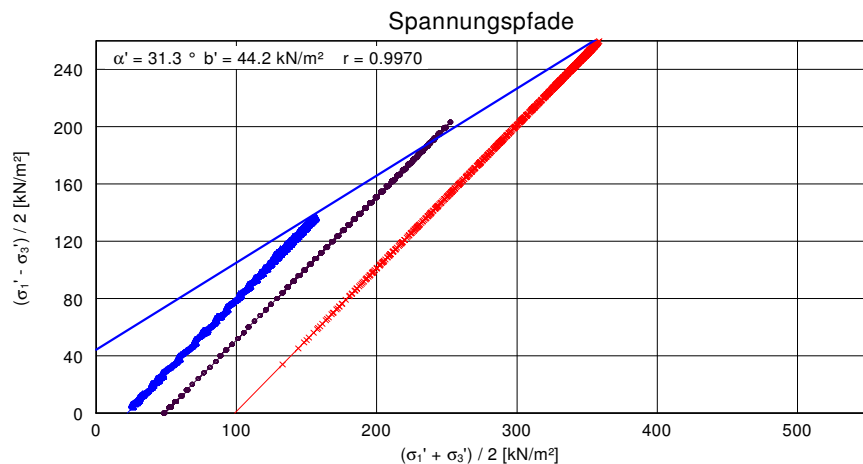
Probenserie: AS2\_PhII\_Prod\_C\_CD\_29-39d\_ST

Bearbeiter: Gömr

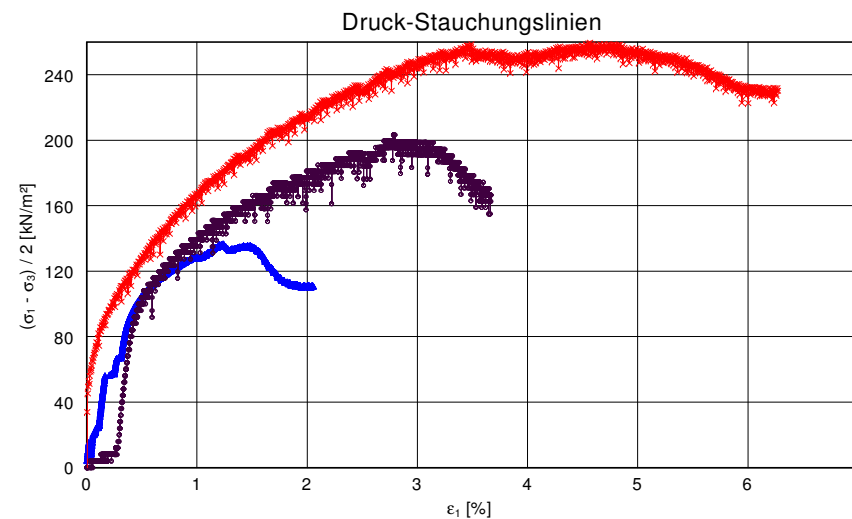
Datum: 25.11.2013

**D-Versuch**

Konsolidation nach vorheriger Sättigung, Sättigungsdruck  $u_0 = 600$  kPa und  $500$  kPa



Versuchs-Nr.	1 ▲	2 °	3 ×
Probendurchmesser [cm]	3.900	3.900	3.900
Probendurchmesser [cm]	3.900	3.900	3.900
Druckbeaufschlagung [kPa]:	625-600-600	650-600-600	700-600-600
effekt. Konsolidationsspannung [kPa]:	25	50	100
Alter Prüfbeginn Scheren [d]:	38	36	35
Abschergeschwindigkeit [mm/min]:	0,002	0,002	0,002
Anfangswassergehalt (Vergleichspr.) [%]:	34,2	34,2	34,2
Endwassergehalt [%]:	34,2	31,9	29,4
Anfangsfeuchtdichte [g/cm³]:	1,888	1,869	1,907
Anfangstrockendichte [g/cm³]:	1,407	1,392	1,421



Dreiaxialversuch DIN 18137 (Teil 2)

Phase: Arbeitsschritt II, Phase II, Bodenmech. Eigenschaften ZFSV

Probenserie: AS2\_PhII\_Prod\_C\_UU\_7d-8d\_ST

Bearbeiter: Gömr

Datum: 26.11.2013

Produkt: C\_ST\*

Alter: 7d

Herstelldatum: 01.10.2013

Lagerungsbed.: gesättigtes System

Prüfbeginn/ Alter: ab 08.10.2013/ ab 7d

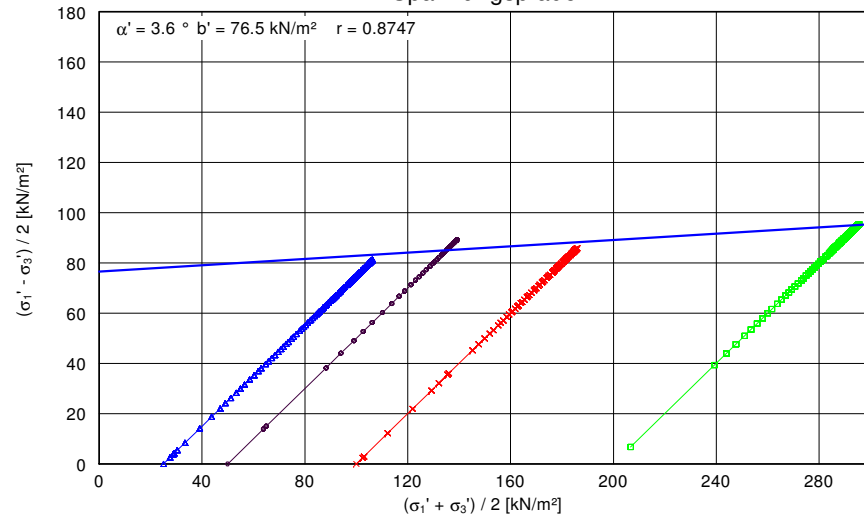
Probe eingebaut ab: 08.10.2013

UU-Versuch

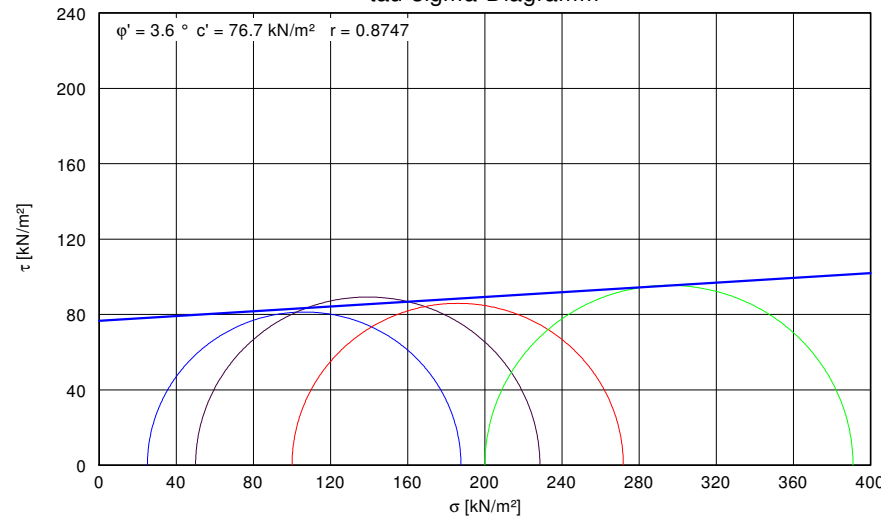
keine Konsolidation, keine Sättigung

GGU-TRIAXIAL - CampusLicence HS Regensburg  
 CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre

Spannungspfade

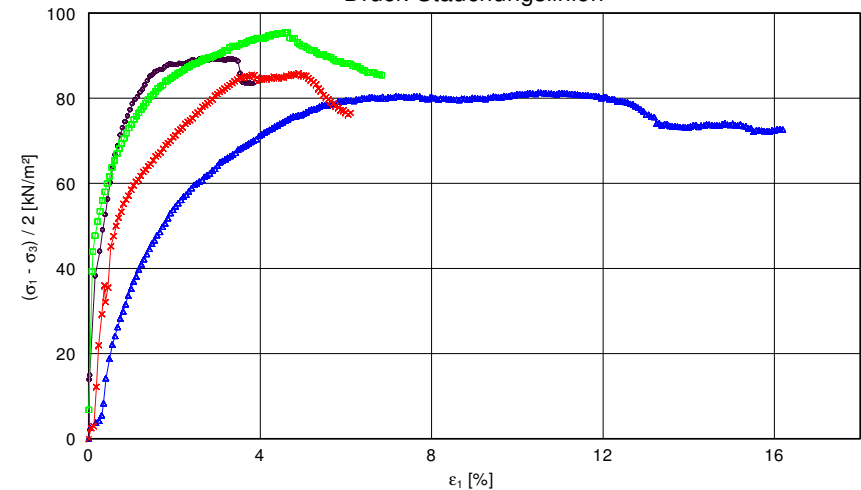


tau-sigma-Diagramm



Versuchs-Nr.	1 $\triangle$	2 $\circ$	3 $\times$	4 $\square$
Probenhöhe [cm]	10.000	10.680	10.680	10.900
Probindurchmesser [cm]	3.900	3.900	3.900	3.900
Druckbeaufschlagung [kPa]:	25	50	100	200
effekt. Konsolidationsspannung [kPa]:	---	---	---	---
Alter Prüfbeginn Scheren [d]:	7	7	7	8
Abschergeschwindigkeit [mm/min]:	0,500	0,500	0,500	0,500
Anfangswassergehalt (Vergleichspr.) [%]:	34,2	34,2	34,2	34,2
Endwassergehalt [%]:	33,5	33,9	33,2	33,7
Anfangsfeuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]:	1,893	1,883	1,891	1,857
Anfangstrockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]:	1,418	1,406	1,409	1,384

Druck-Stauchungslinien



Dreiaxialversuch DIN 18137 (Teil 2)

Phase: Arbeitsschritt II, Phase II, Bodenmech. Eigenschaften ZFSV

Probenserie: AS2\_PhII\_Prod\_C\_UU\_28d\_ST

Bearbeiter: Gömr

Datum: 27.11.2013

Produkt: C\_ST\*

Alter: 28d

Herstelldatum: 01.10.2013

Lagerungsbed.: gesättigtes System

Prüfbeginn/ Alter: 29.10.2013/ 28d

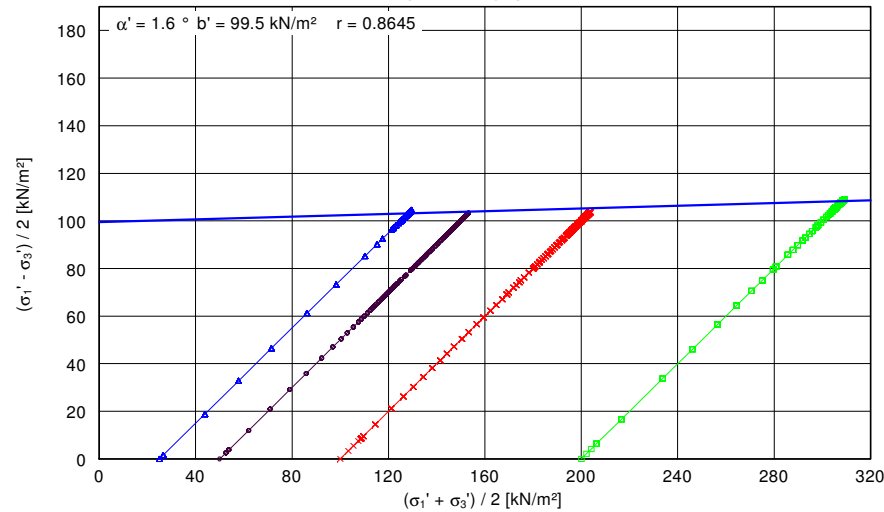
Probe eingebaut am: 29.10.2013

**UU-Versuch**

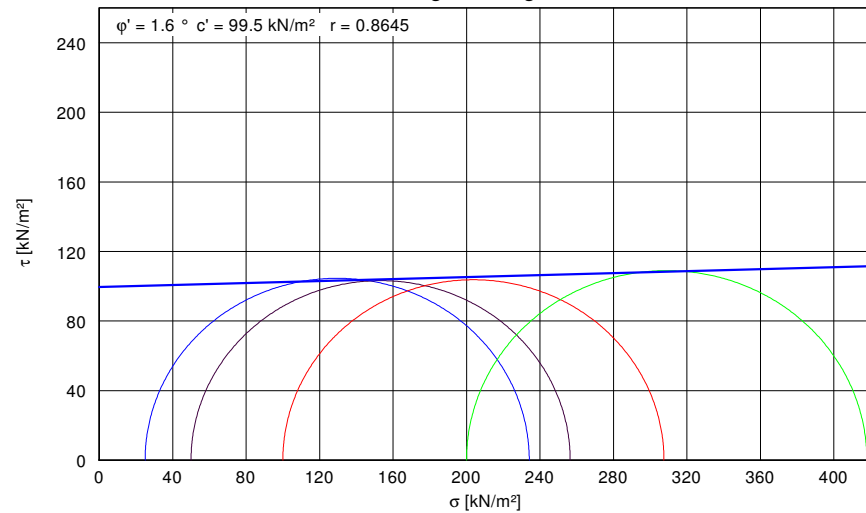
keine Konsolidation, keine Sättigung

Versuchs-Nr.	1 $\triangle$	2 $\circ$	3 $\times$	4 $\square$
Probenhöhe [cm]	11.060	10.900	10.900	10.950
Probendurchmesser [cm]	3.900	3.900	3.900	3.900
Druckbeaufschlagung [kPa]:	25	50	100	200
effekt. Konsolidationsspannung [kPa]:	---	---	---	---
Alter Prüfbeginn Scheren [d]:	28	28	28	28
Abschergeschwindigkeit [mm/min]:	0,500	0,500	0,500	0,500
Anfangswassergehalt (Vergleichspr.) [%]:	34,2	34,2	34,2	34,2
Endwassergehalt [%]:	32,8	31,9	31,5	33,1
Anfangsfeuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]:	1,868	1,891	1,878	1,880
Anfangstrockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]:	1,407	1,434	1,428	1,412

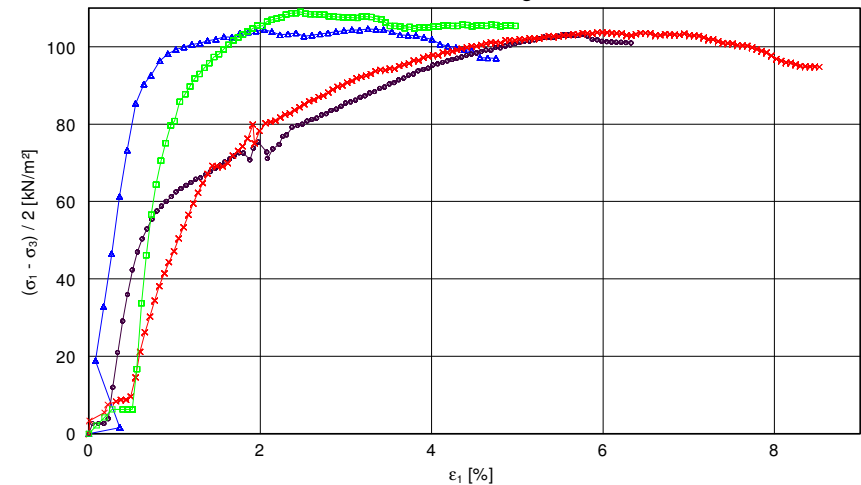
**Spannungspfade**




**tau-sigma-Diagramm**



**Druck-Stauchungslinien**



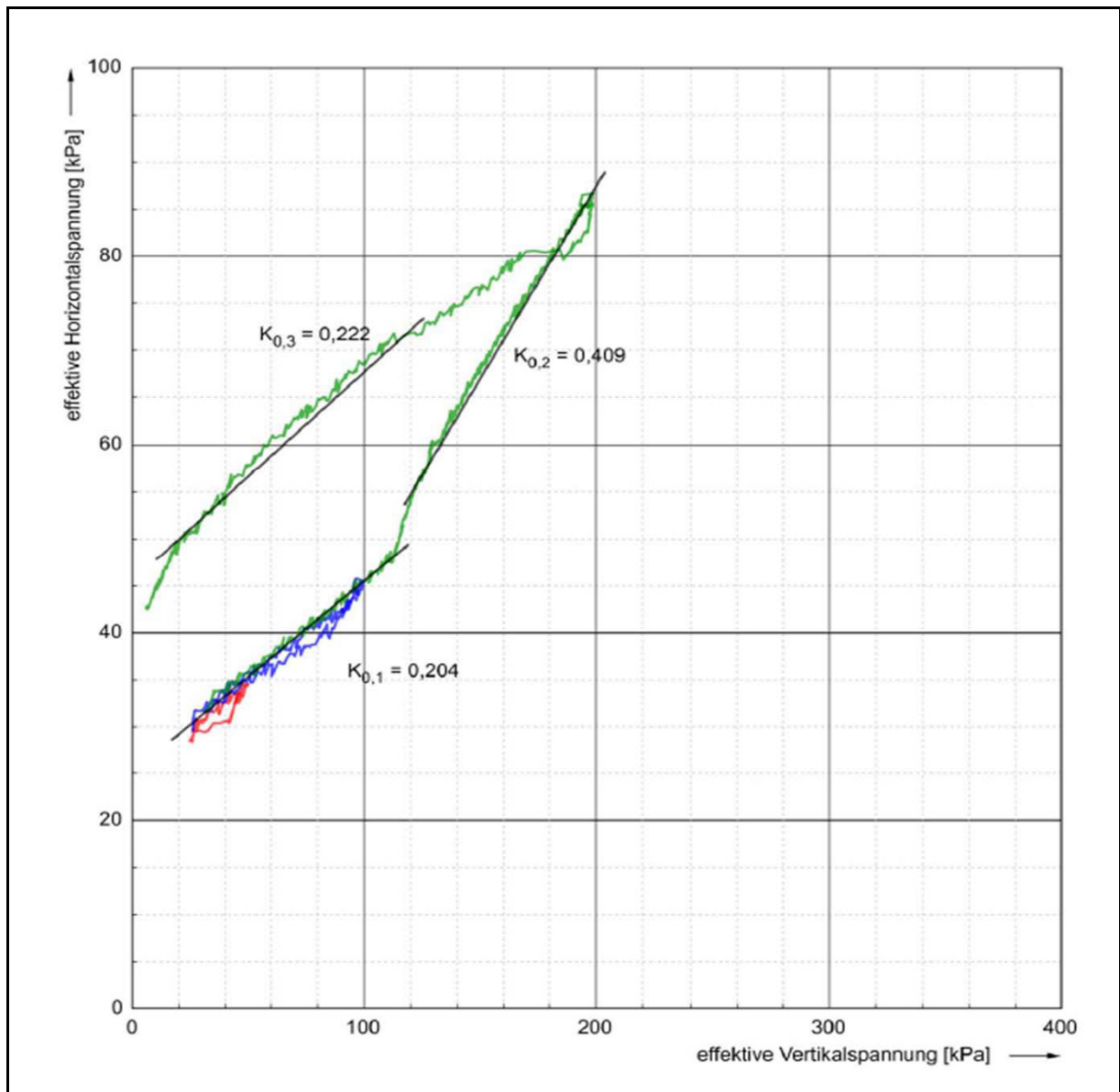
# Anlage 8: Zusammenfassung K<sub>0</sub>-Versuche

 <b>OSTBAYERISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE REGENSBURG</b> GEO GEOTECHNIK	<b>OTH Regensburg</b> Labor für Geotechnik Prüfening Straße 58 93049 Regensburg	Vorhaben: EnEff: Wärme - Innovative Fernwärmeverteilung Einsatz fließfähiger Verfüllbaustoffe, AP Bodenmechanik
		Bearbeiter / Datum-Probeneinbau Gömr; 22.04.2015

## Zusammenfassung K<sub>0</sub>-Versuch

K<sub>0</sub> - Produkt A - Charge 2 - 17d

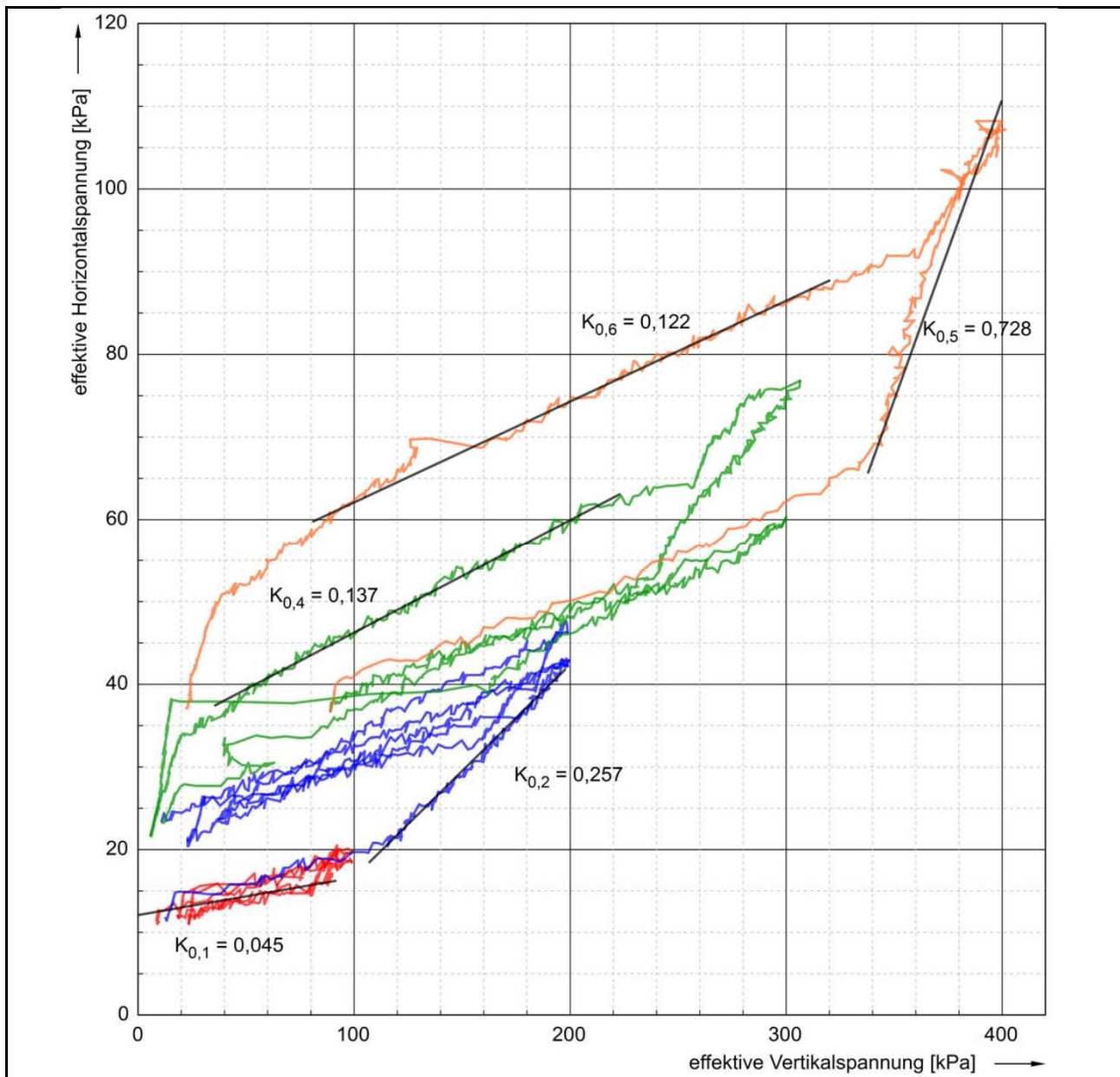
<b>Bodenart / Produkt:</b>	Ch.2				
<b>Für Flüssigboden:</b>	Lagerungsbedingungen: gesättigt	Herstelldatum / Alter bei Einbau (bei ZFSV): 29.08.2015			
<b>Für Ausgangsboden:</b>	Herstellungsverfahren:				
	Probenmasse (feucht) [g]:	Höhe [cm]:	Durchmesser [cm]:	Feuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Probendetails bei Einbau</b>	2420,3	20,32	9,81	1,576	0,949
<b>Probendetails nach Konsolidierung:</b>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Probendetails nach Versuchsende:</b>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Wassergehaltsbestimmung bei Ausbau:</b>	Schüssel-Nr. 16	Masse tara [g] 32,55	Masse br., f. [g] 2368,00	Masse br., tr. [g] 1453,10	Ausbauwassergeh. [%] 64,40
<b>Isotrope Konsolidierung vor K<sub>0</sub>-Konsolidierung</b>	Start Konsolidierung: 15.09.2015	Ende Konsolidierung / Konsolidierungsdauer: 16.09.2015		Cell-Pressure [kPa] Backpressure [kPa]	820 800
<b>K<sub>0</sub>-Konsolidierung</b>	Start K <sub>0</sub> -Konsolidierung: 16.09.2015	Versuchsende 18.09.2015		Druckänderungsraten [min/kPa] 40	



### Zusammenfassung $K_0$ -Versuch

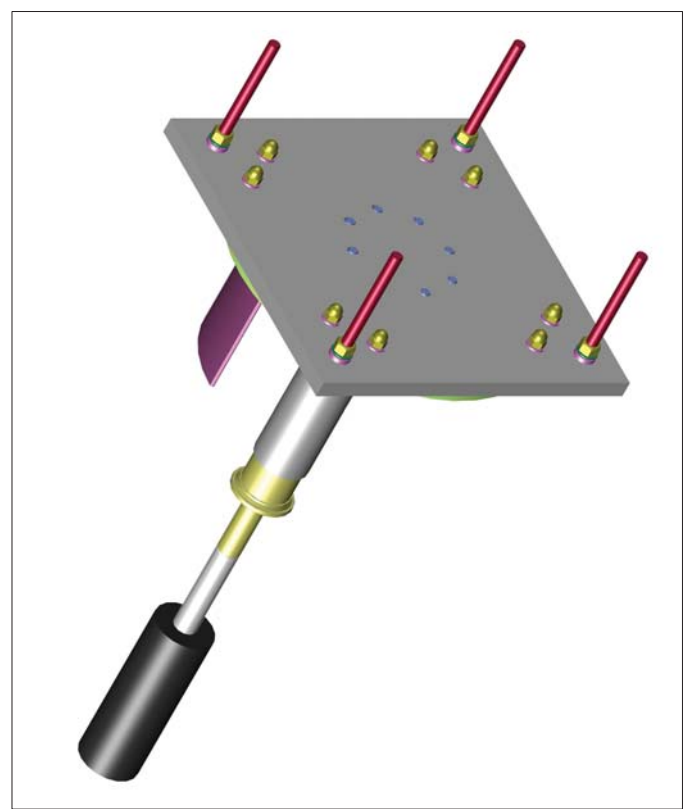
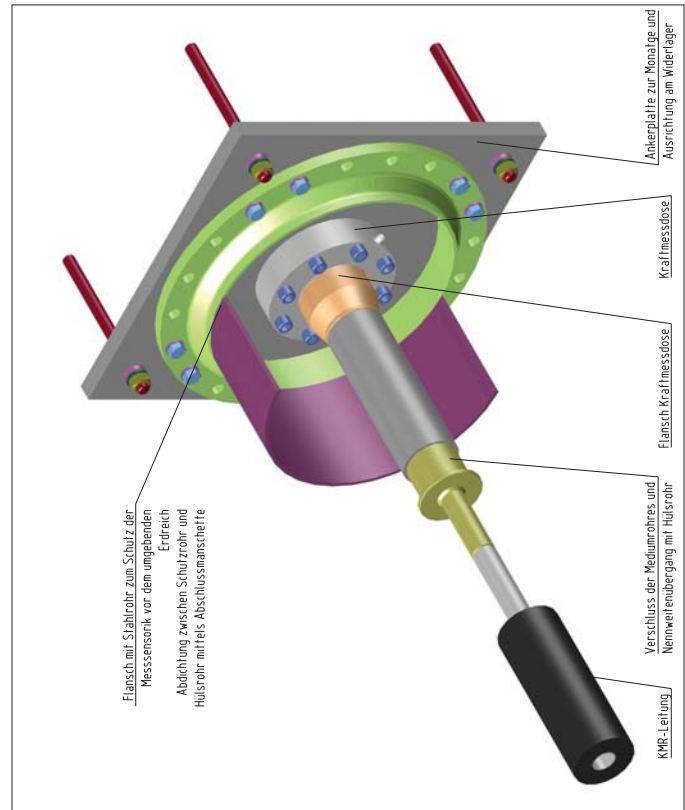
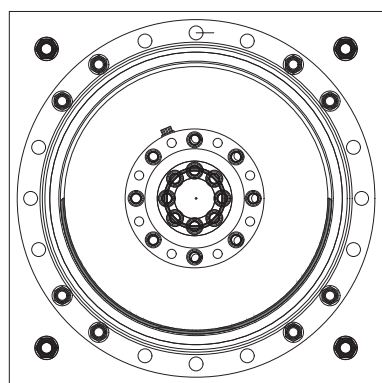
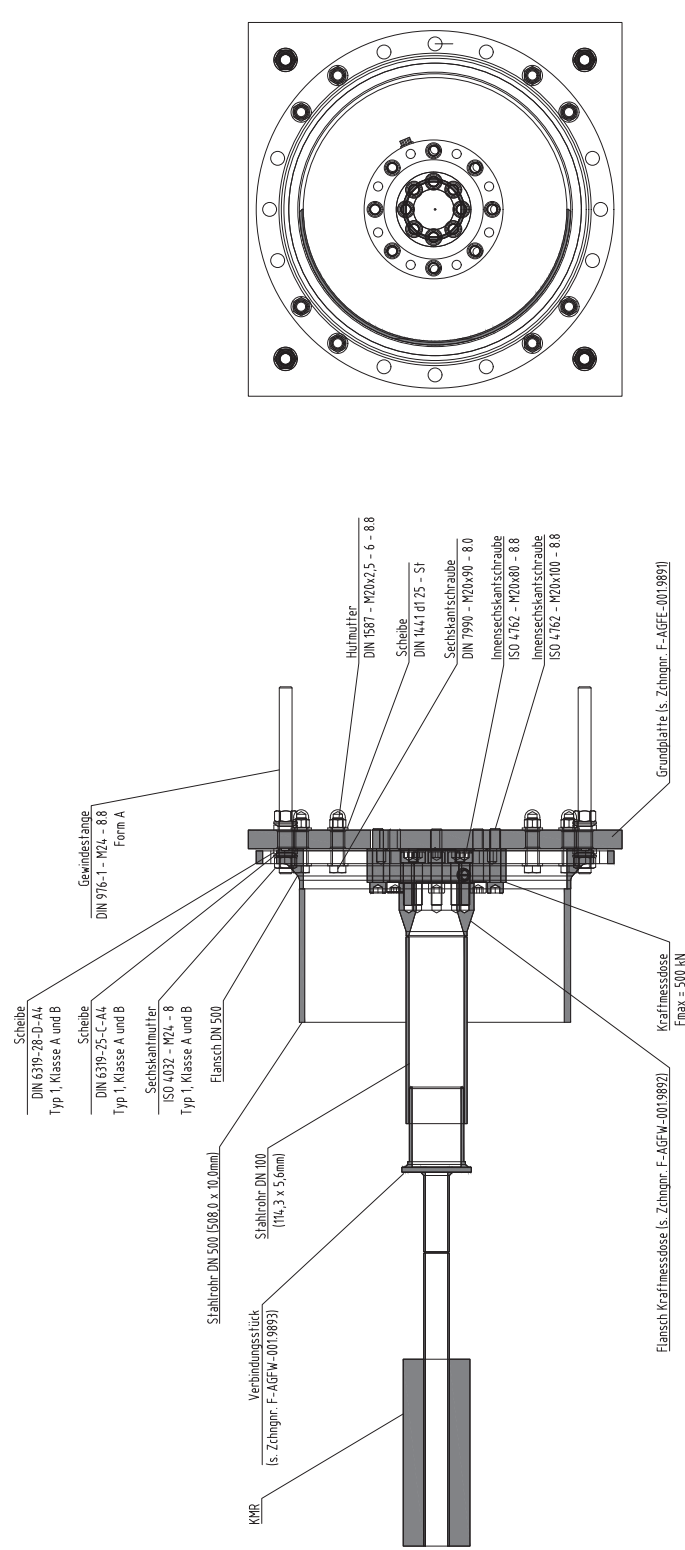
#### $K_0$ - Produkt C-ST - Charge 1 - 81d

<b>Bodenart / Produkt:</b>	Ausgangsboden - Waschrückstand ST*			
<b>Für Flüssigboden:</b>	Lagerungsbedingungen: gesättigt	Herstelldatum / Alter bei Einbau (bei ZFSV): 10.02.2015 (81d)		
<b>Für Ausgangsboden:</b>	Herstellungsverfahren: Charge 2 aus Großversuch Schöpfprobe			
	Probenmasse (feucht) [g]:	Höhe [cm]:	Durchmesser [cm]:	Feuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Probendetails bei Einbau:</b>	2556,6	17,8	9,86	1,881
<b>Probendetails nach Konsolidierung:</b>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
<b>Probendetails nach Versuchsende:</b>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
<b>Wassergehaltsbestimmung bei Ausbau:</b>	Schüssel-Nr.	Masse tara [g]	Masse br., f. [g]	Masse br., tr. [g]
		31,98	3558,40	1995,55
				Ausbauwassergeh. [%]
				28,66
<b>Isotrope Konsolidierung vor <math>K_0</math>-Konsolidierung</b>	Start Konsolidierung: 10.02.2015	Ende Konsolidierung / Konsolidierungsdauer: 10.02.2015 (82d)		Cell-Pressure [kPa] Backpressure [kPa]
				810 800
<b><math>K_0</math>-Konsolidierung</b>	Start $K_0$ -Konsolidierung: 10.02.2015	Versuchsende 16.02.2015		Druckänderungsraten [min/kPa] 30





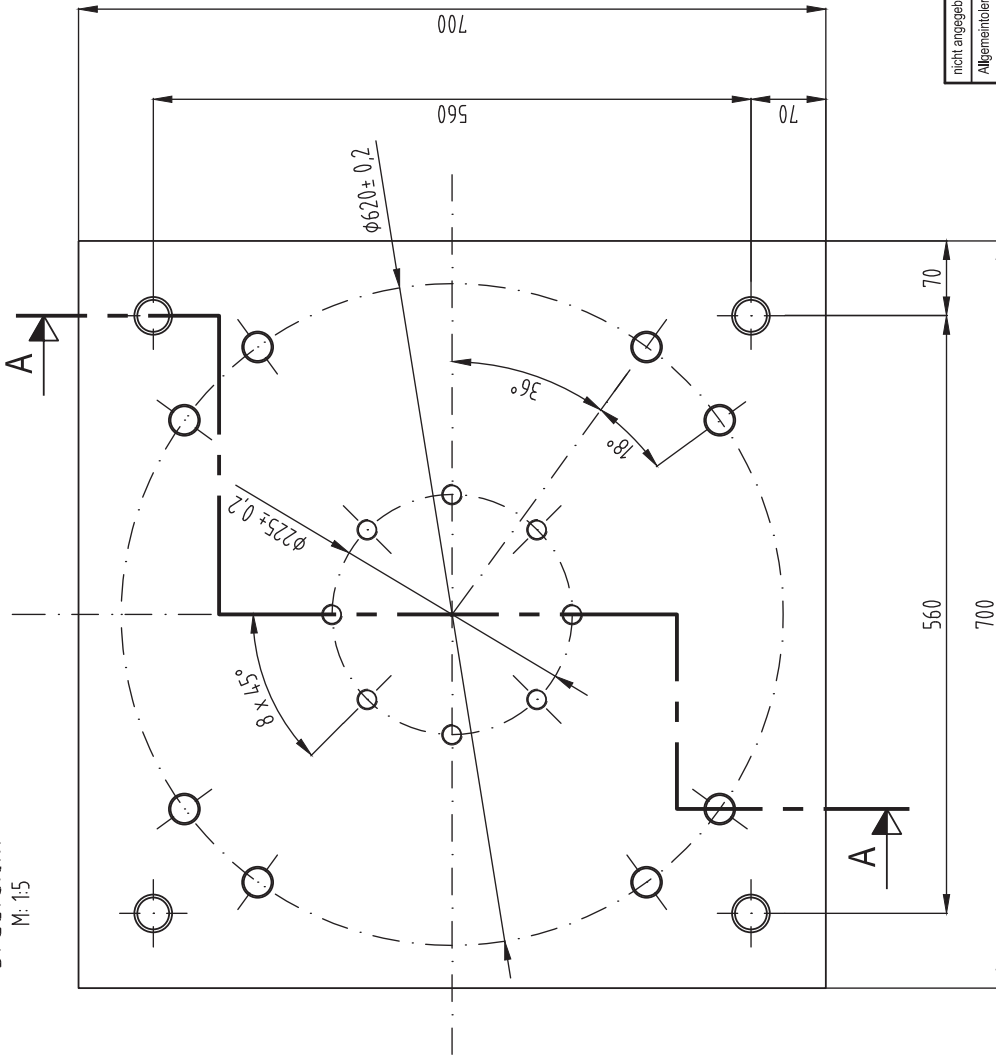
# Anlage 9: Entwurf Festpunktanbindung



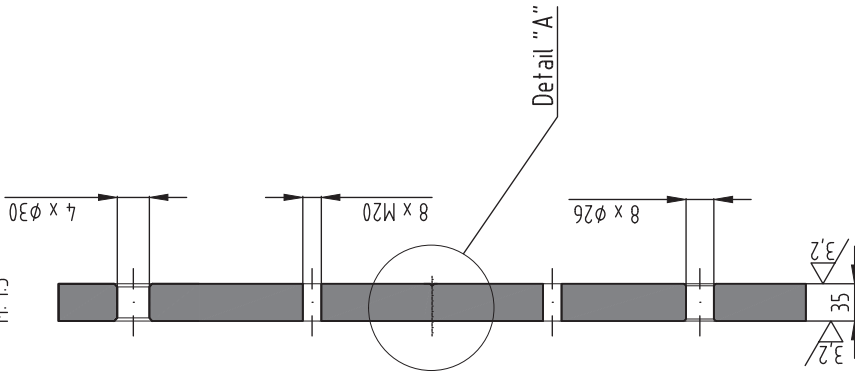
mit zugehörigen: Flansch mit Hydromutter Messsensoren nach BS2 270644 Innensechskanten nach (NF 810 1315) Normdatei: 033 Zeichnung: 423		Durchprüfungen: 051 Überprüfen nach DIN EN ISO 1302 ✓ <input type="checkbox"/> Maß ✓ <input type="checkbox"/> Form ✓ <input type="checkbox"/> Farbe ✓ <input type="checkbox"/> Funktion	Gewichtsangaben: 051 052 053 054 055 056 057 058 059 060	Festhaltungen: 050 051 052 053 054 055 056 057 058 059 060
Stand: 02.04.2015				
MAIAP: 1:5 Entw.: 02.02.2015 Gepr.: Freig.:		Name: Lieferant: Preis:		
Bypassleitung Römischer Ring/Frankfurt. a. M. Berechnung: Entwurf Festpunkt mit Kraftmessdose (500 kN)				
Planverfasser: GEF Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. G. G. G. Prof. Dr. G. G. G.		Zeichnungsnummer: F-AGFW-001.9831 Blatt: 1 Form: A1		
GEF Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. G. G. G. Prof. Dr. G. G. G.				
CAD Datei F-AGFE-entwurf/Festpunkt/Festpunkt_Festpunkt				
Screenshot nach DIN BS2 270644				

# Anlage 10: Grundplatte

Draufsicht  
M: 1:5

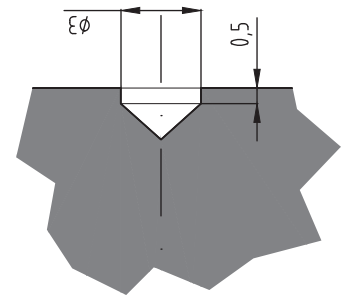


Schnitt A  
M: 1:5



$12,5 / \sqrt{3,2}$   
 $3,2 / \sqrt{3,2}$

Detail "A"  
M: 5:1



nicht angegebene Toleranzen bei Bohrungen	Durchgangsbohrungen	$\pm 0,1$	Gewindebohrungen	$\pm 0,1$	Passbohrungen	$\pm 0,01$	$\checkmark$
Allgemeintoleranzen nach ISO 2768-mk	Oberflächen nach DIN ISO 1302						
Werkstückkanten nach DIN ISO 13715	$\checkmark$ $Rz 3,2$		Werkstoff		S235JRG2 (1,0038)		
Innenkanten +0,3	$\checkmark$ $Rz 12,5$		Gewicht		-		
Außenkanten -0,5	$\checkmark$ $Rz 12,5$		Rohmaße		-		

Bypassleitung Römischer Ring/Frankfurt. a. M.

Benennung  
Festpunkt mit Kraftmessdose (500 kN)  
Grundplatte

Zeichnungsnummer  
F-AGFW-001.9891

Blatt  
Index  
1

Format  
A3

Maßstab  
1:5

Planverfasser:  
GEF Ingenieur AG  
Ferd.-Porsche-Str. 4a  
69181 Leimen  
Tel. 06224/9713-0 Fax -40

Name  
Lustmetz

Datum  
28.01.2015

Erst.  
Gepr.  
Freig.

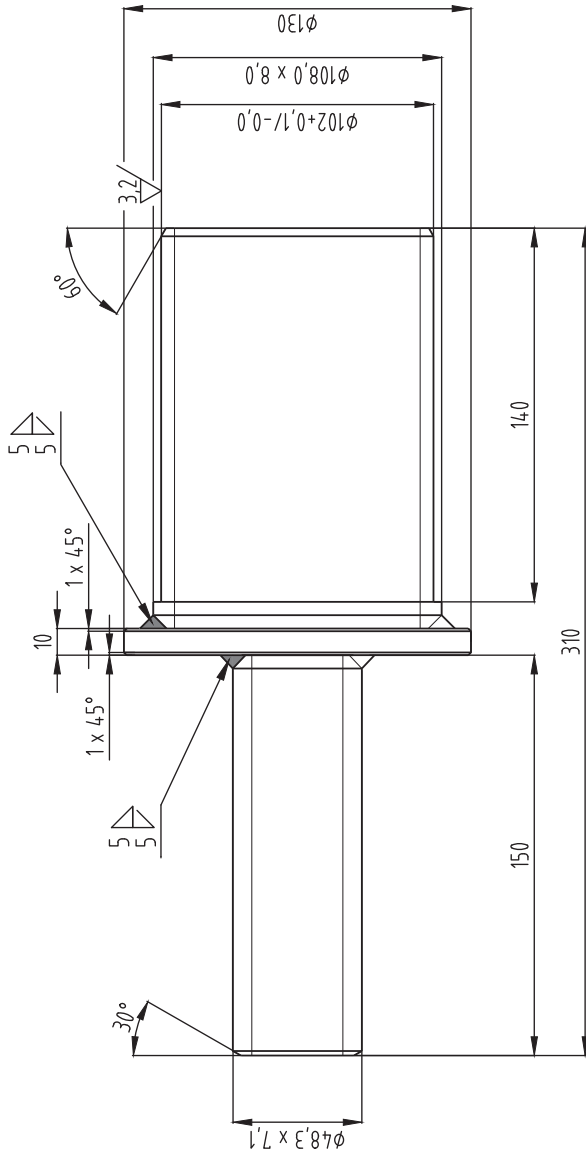
GEF  
Ingenieur AG

CAD Datei  
P:\F-AGFW-001\082\ech\Detail\Festpunkt Römischer Ring neu.dwg



# Anlage 12: Verbindungstück KMR - Kraftmessung

12.5 / ( 3.2 / )



nicht angegebene Toleranzen bei Bohrungen		Durchgangsbohrungen $\pm 0,1$		Gewindebohrungen $\pm 0,1$		Passbohrungen $\pm 0,01$	
Allgemeintoleranzen nach ISO 2768-mK		Oberflächen nach DIN ISO 1302					
Werkstückkanten nach DIN ISO 13715		$\sqrt{\text{Ra}}$	$\sqrt{\text{Ra}}$	Werkstoff			
Innenkanten $+0,3$		$\sqrt{\text{Ra}}$	$\sqrt{\text{Ra}}$	Gewicht		-	
Außenkanten $-0,5$		$\sqrt{\text{Ra}}$	$\sqrt{\text{Ra}}$	Rohmaße		-	

Benennung		Bypassleitung Römischer Ring/Frankfurt. a. M.	
Festpunkt mit Kraftmessdose (500 kN)			
Verbindungsstück KMR - Kraftmessung			
Zeichnungsnummer		F-AGFW-001.9893	
Blatt Index		1	
Format		A3	

Maßstab		1:5	
Datum		26.01.2015	
Name		Lustmetz	
Erst.		-	
Gepr.		-	
Freig.		-	

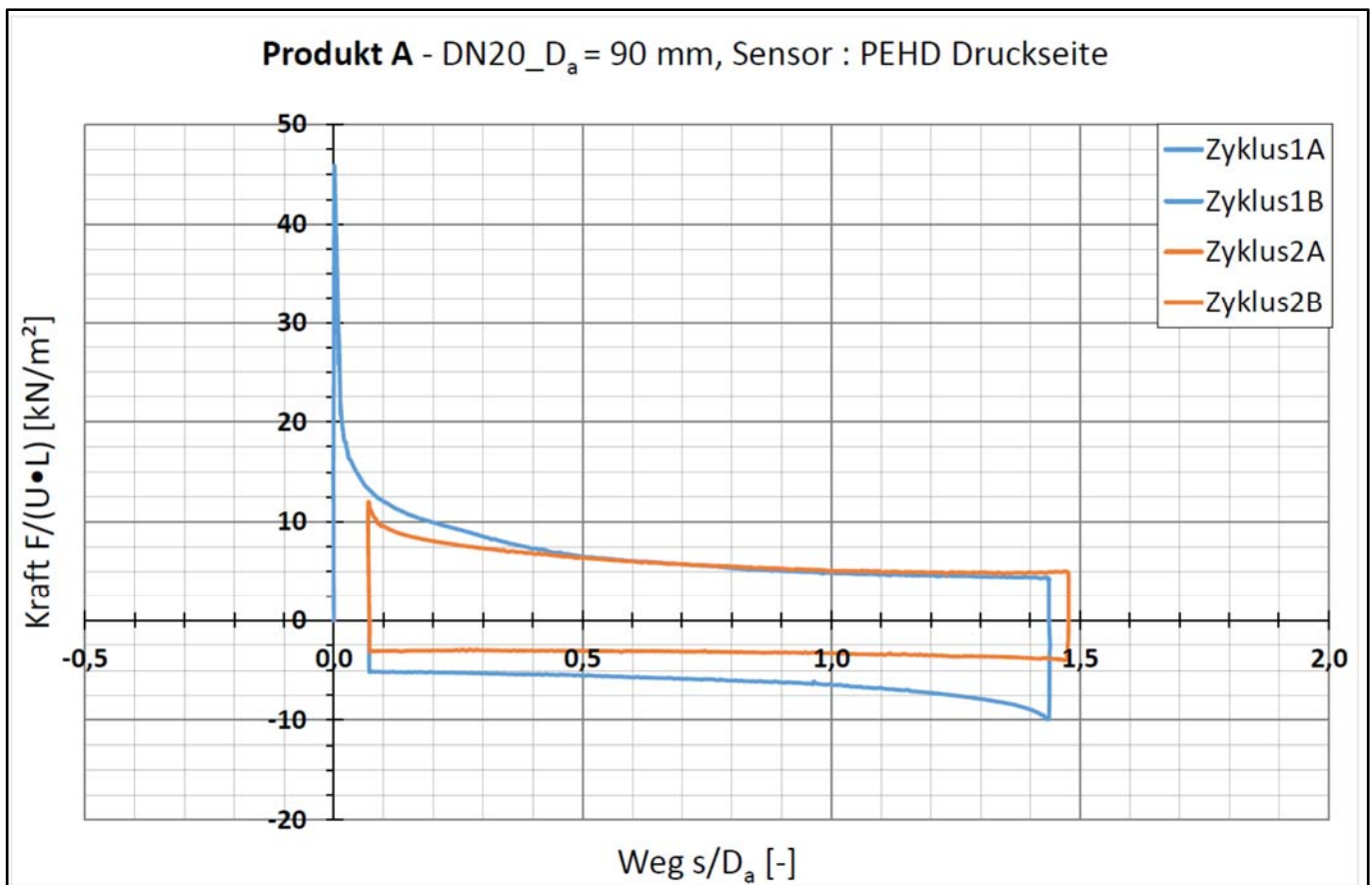
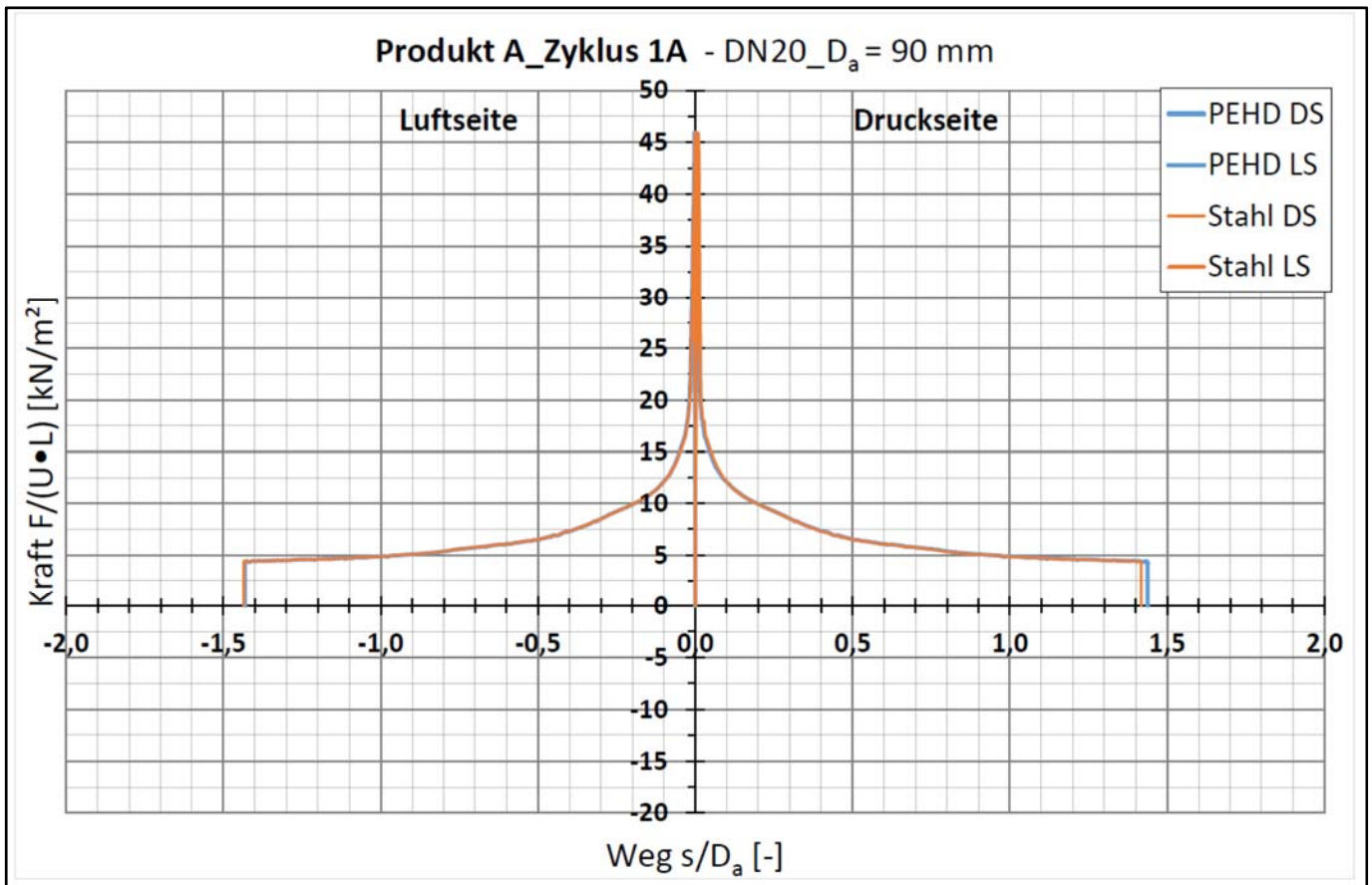
Planverfasser:		GEF Ingenieur AG	
GEF Ingenieur AG		Ferd.-Porsches-Str.4a	
69181 Leimen		Tel. 06224/9713-0 Fax -40	

	
Schutzvermerk nach DIN ISO 18016 beachten!	

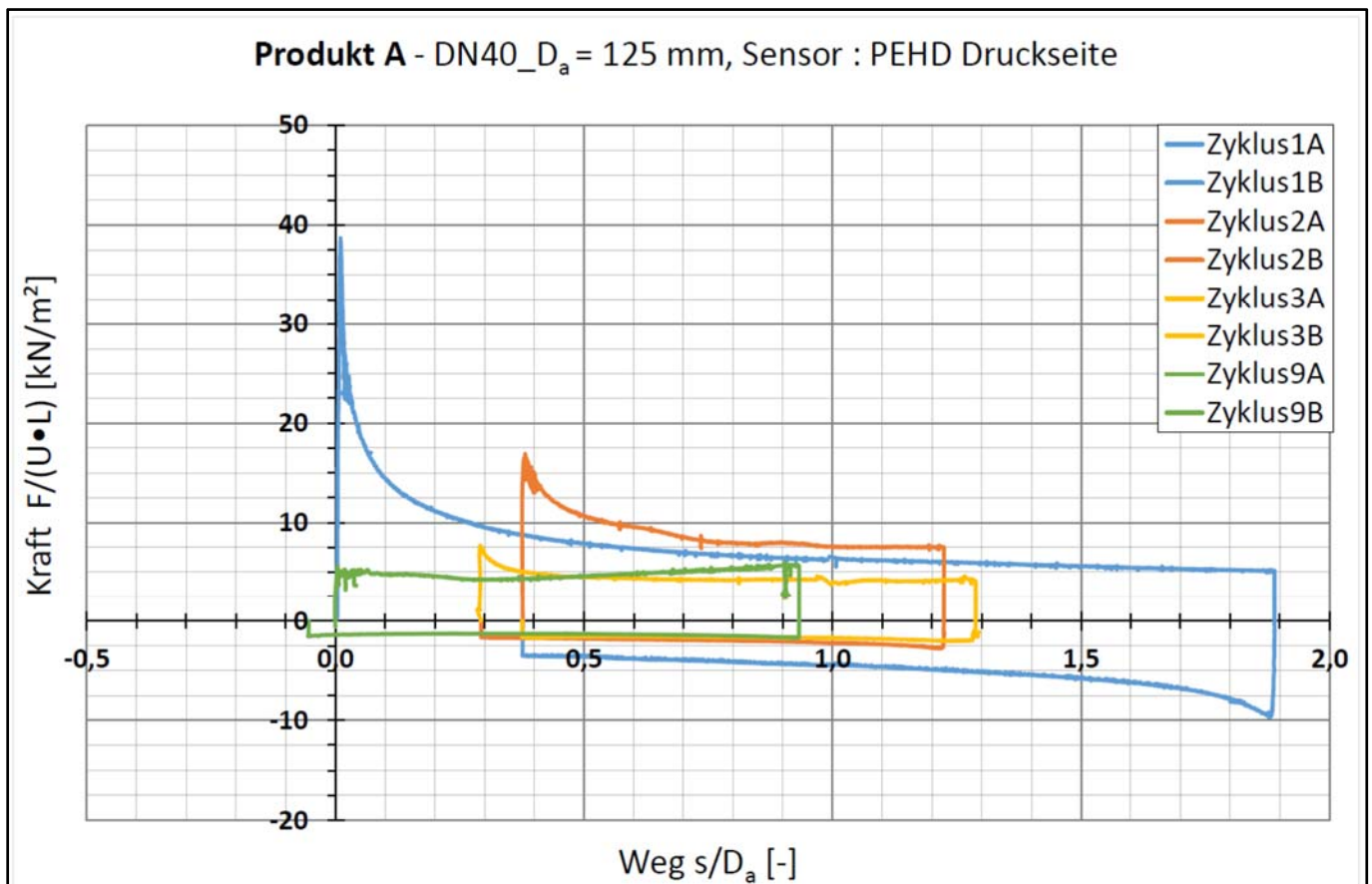
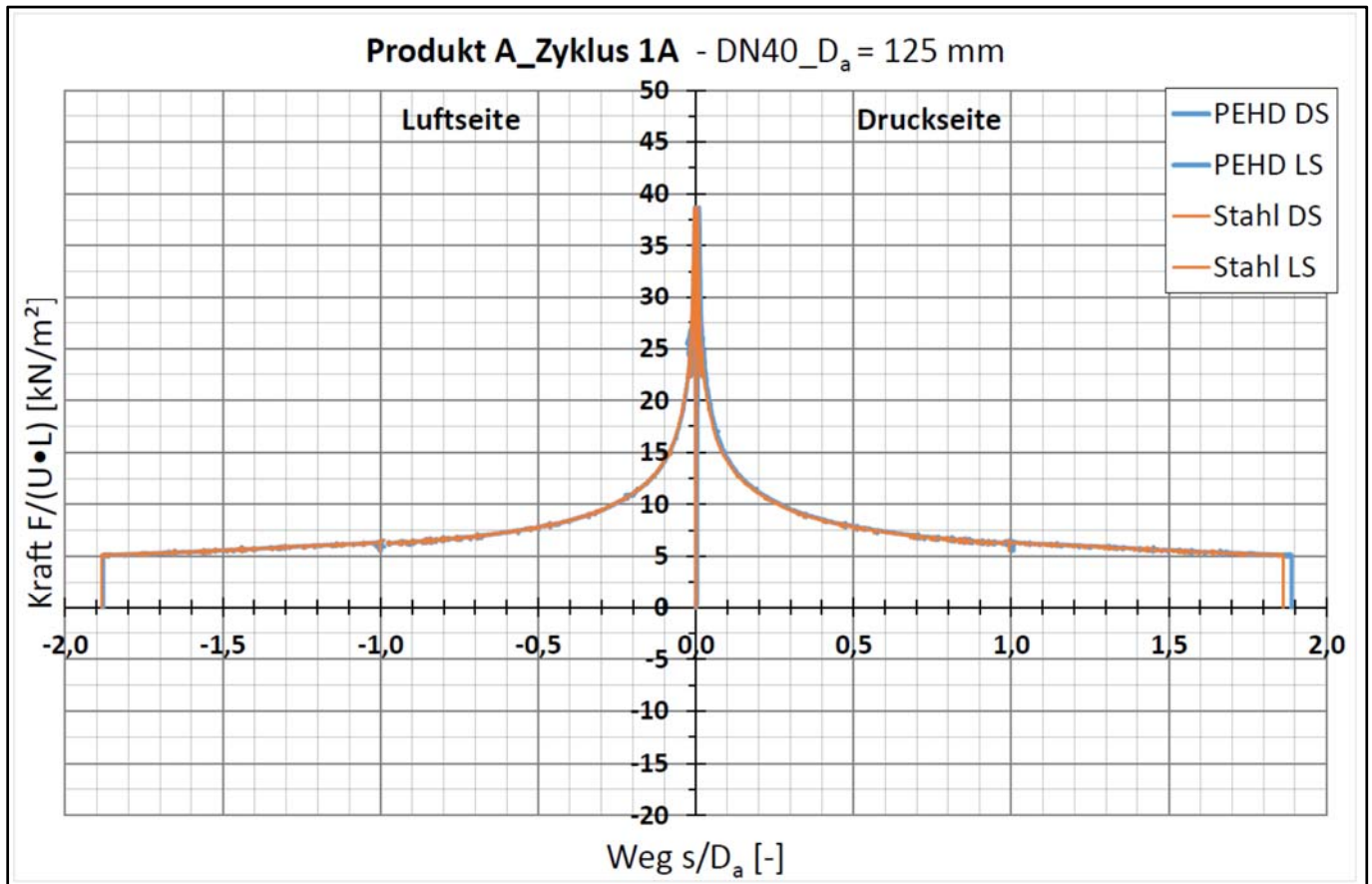
Anlage 13.1: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt A**

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



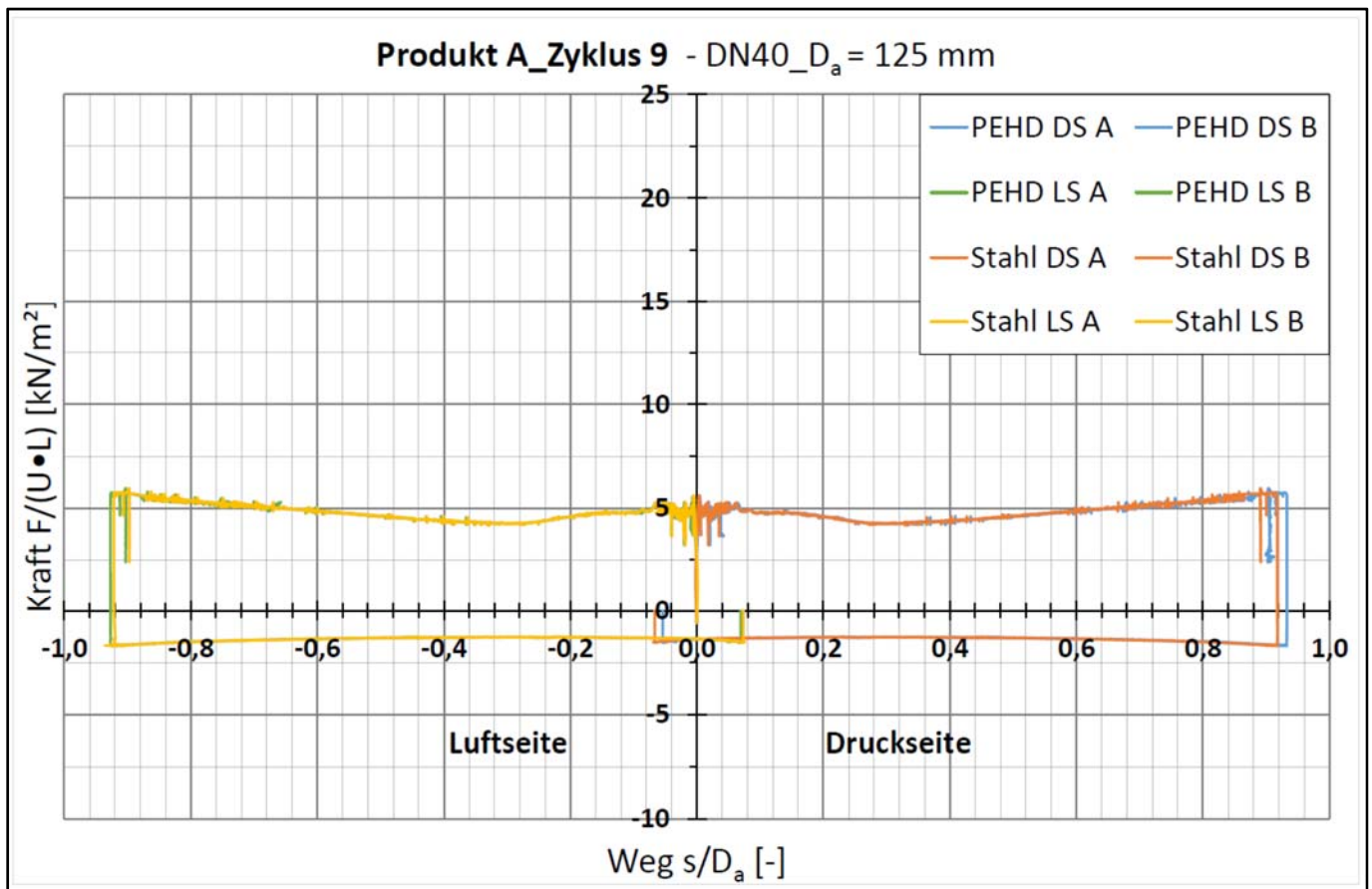
Anlage 13.1: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt A**

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



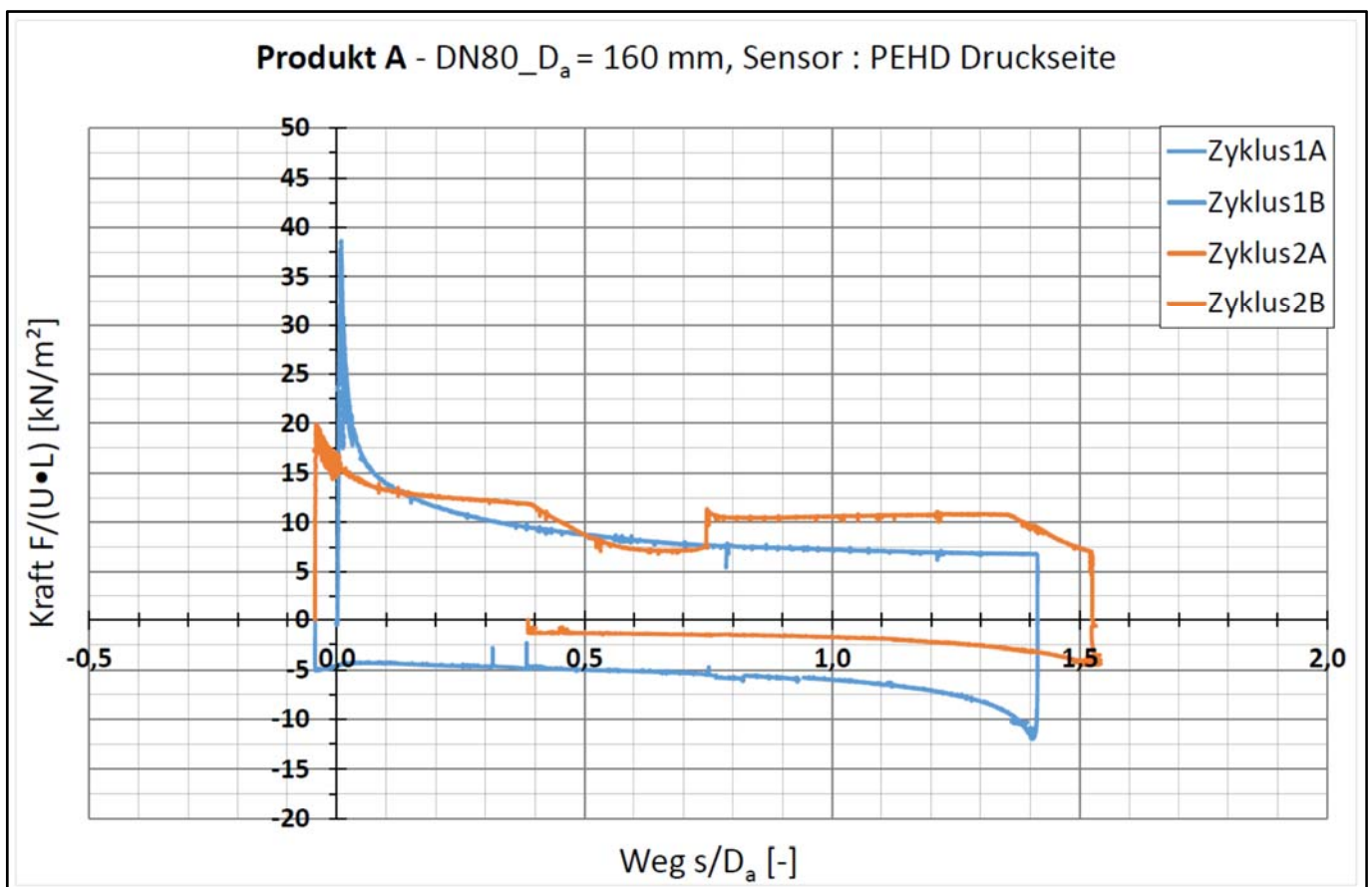
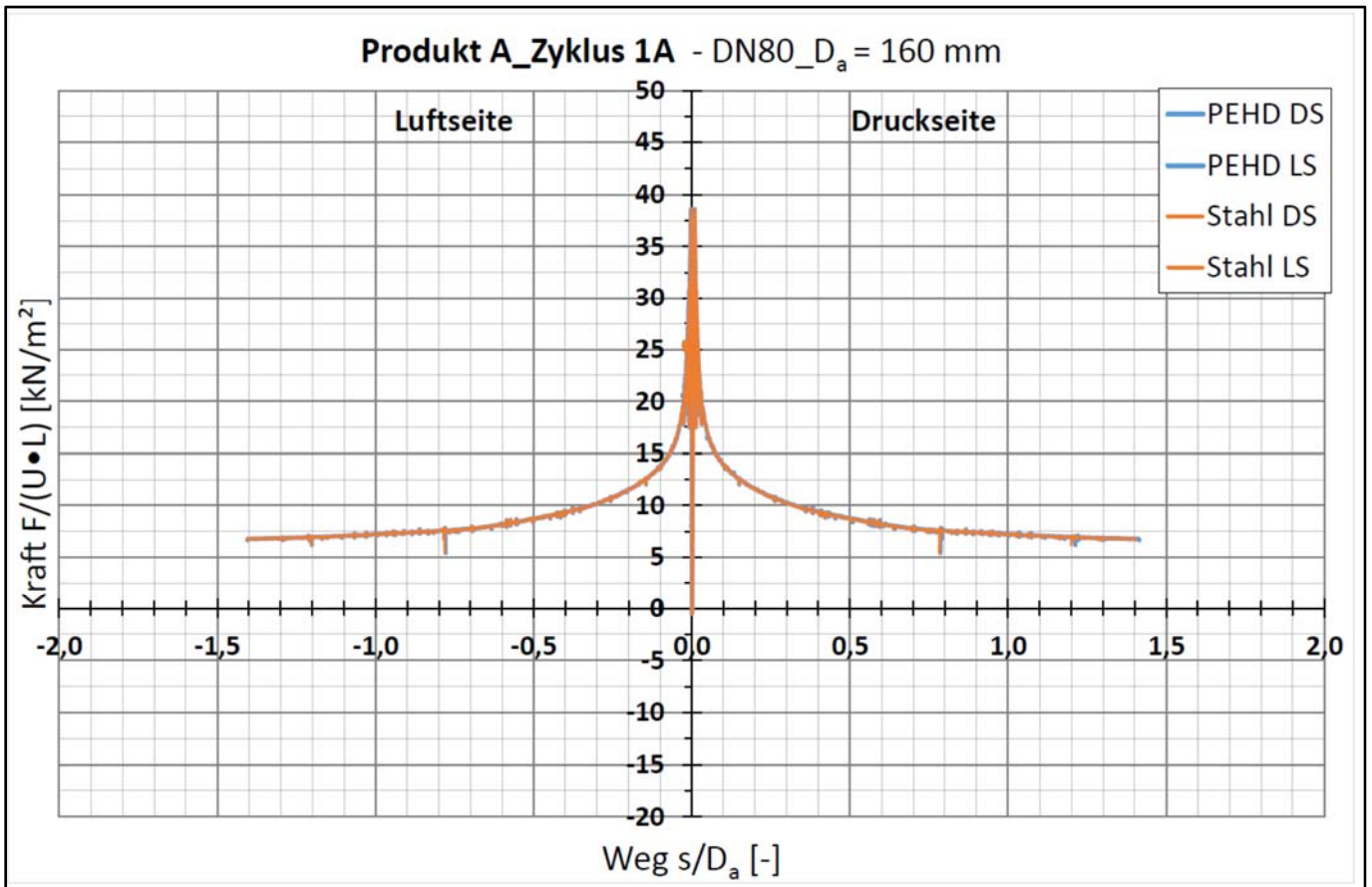
# Anlage 13.1: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt A**

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



Anlage 13.1: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt A**

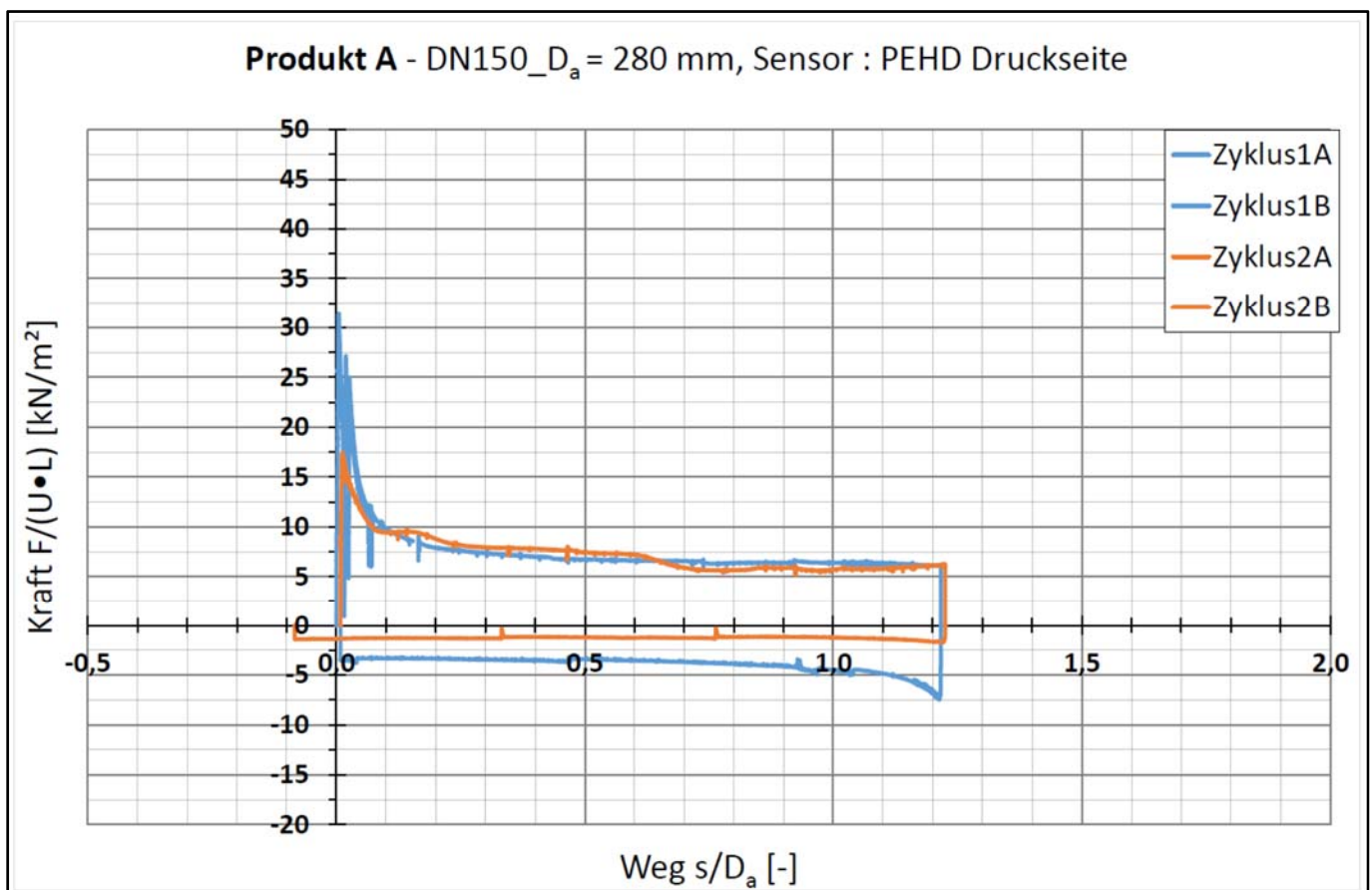
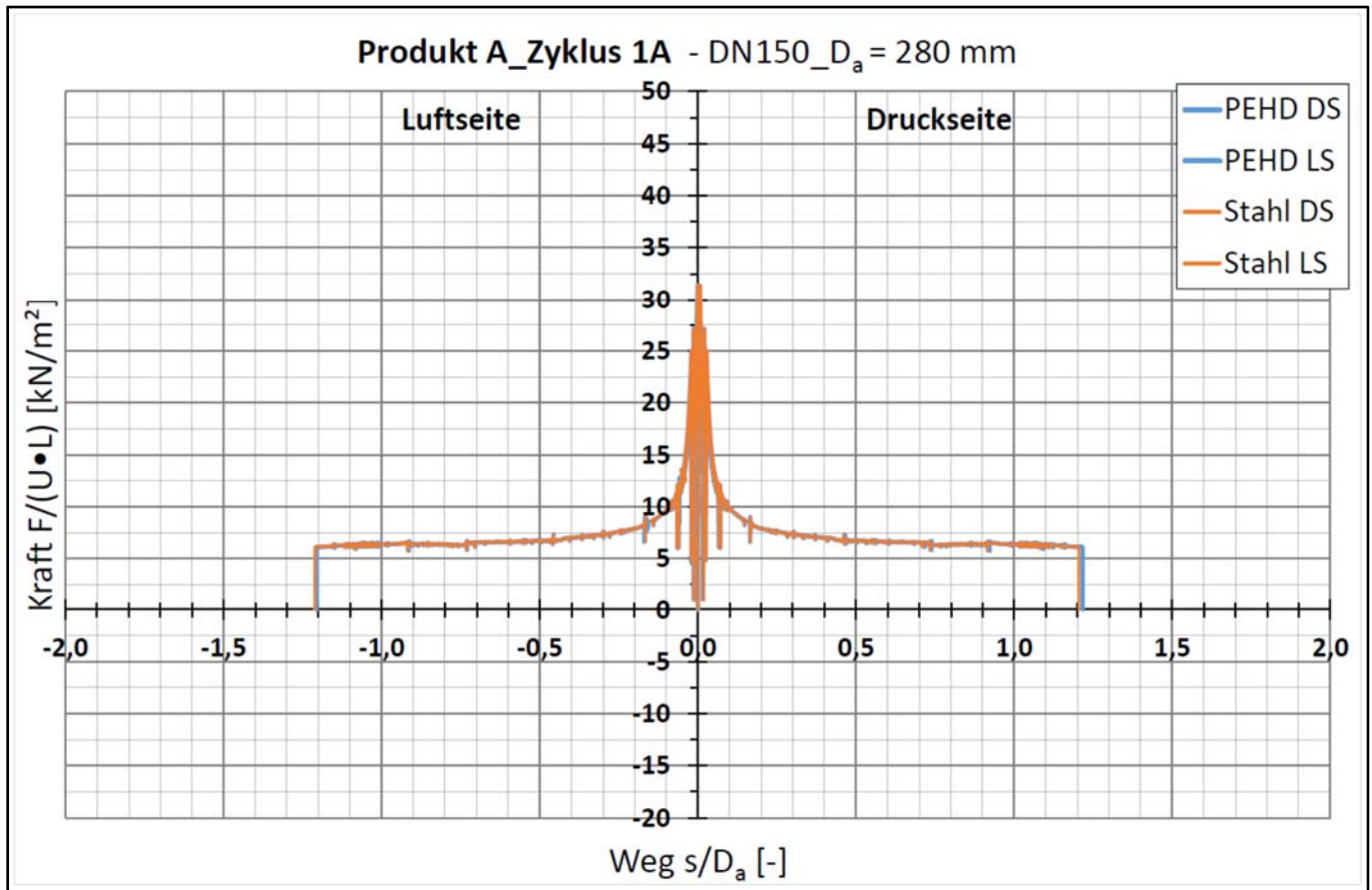
Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300





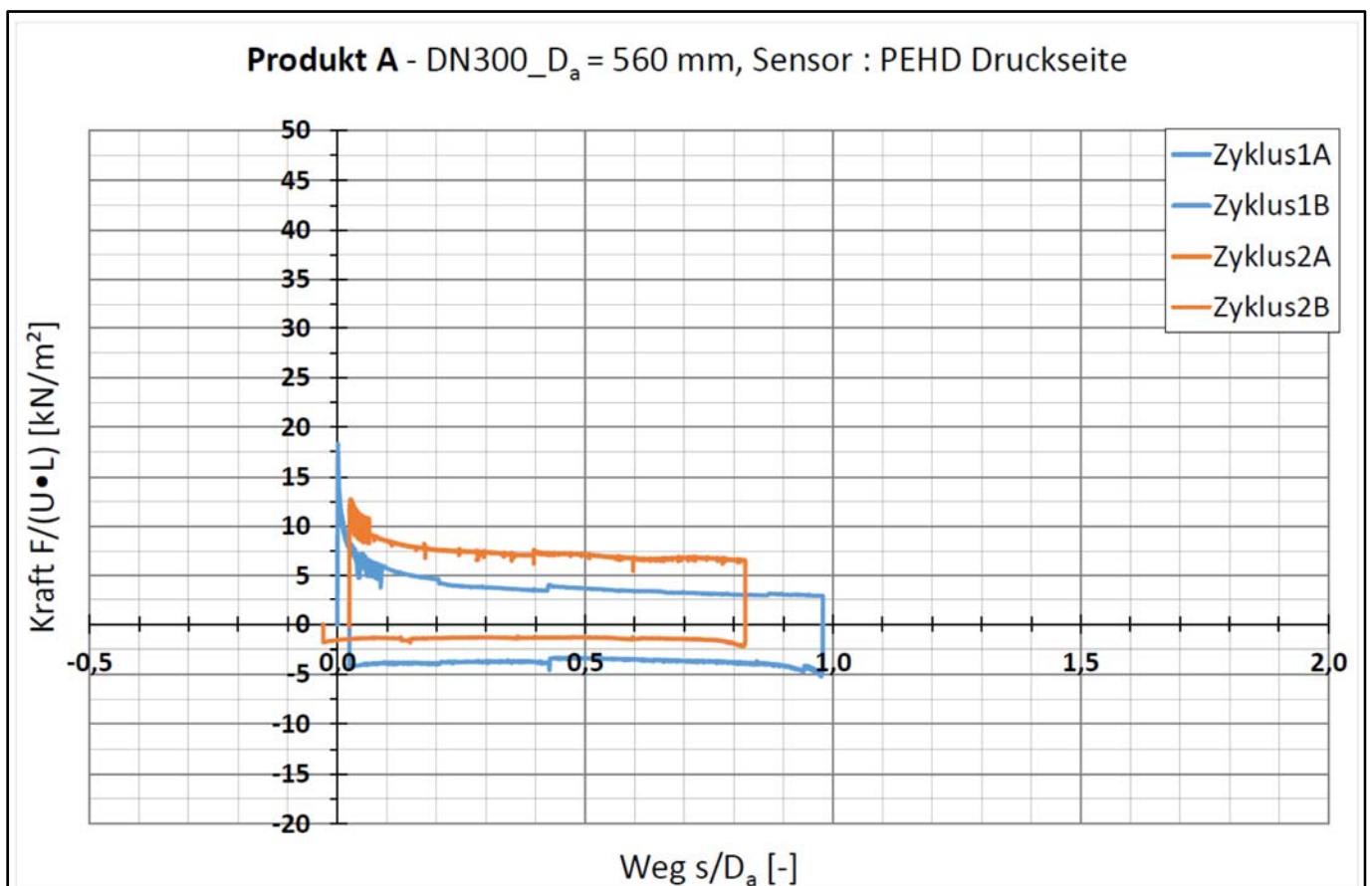
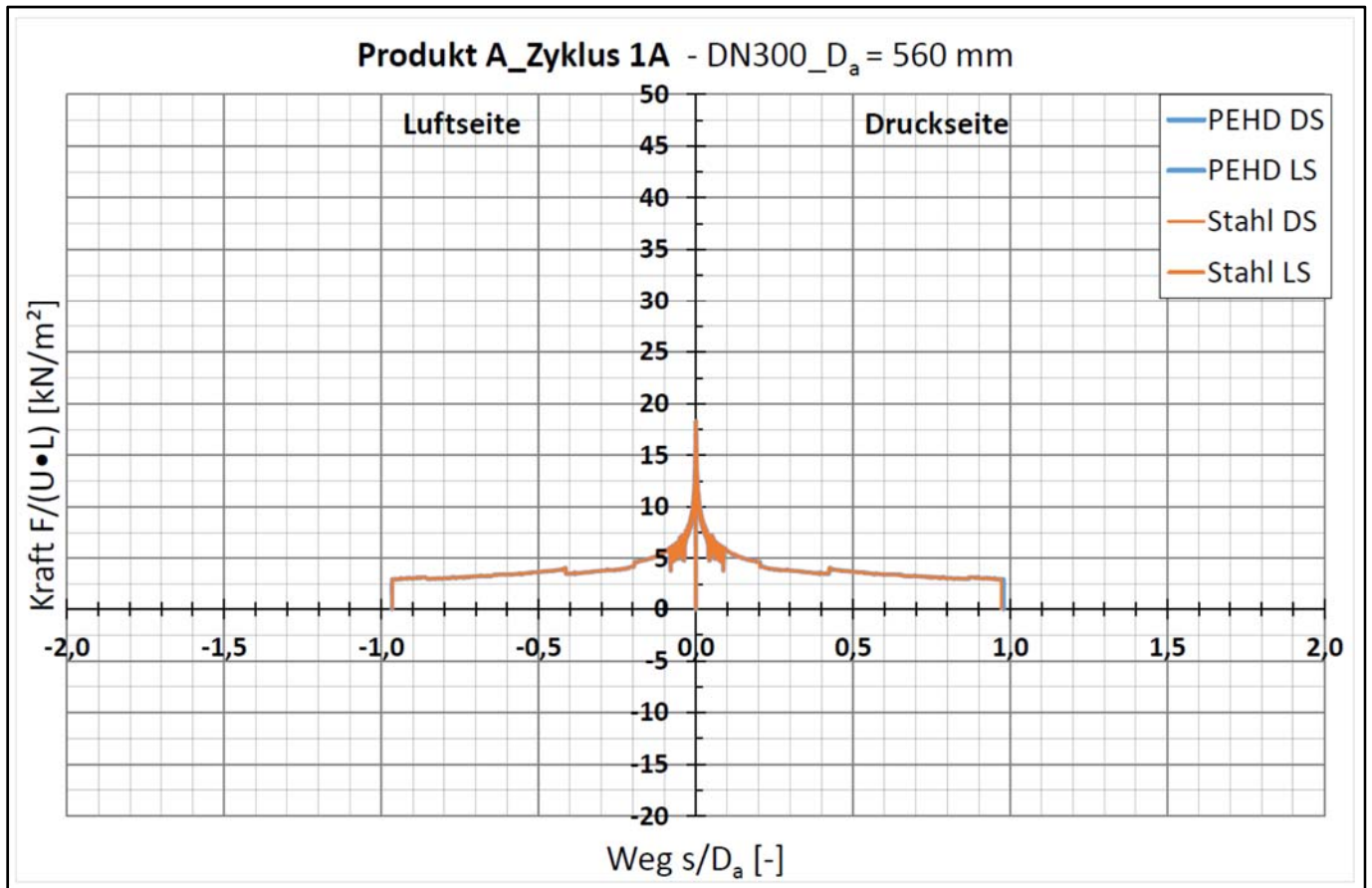
Anlage 13.1: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt A**

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



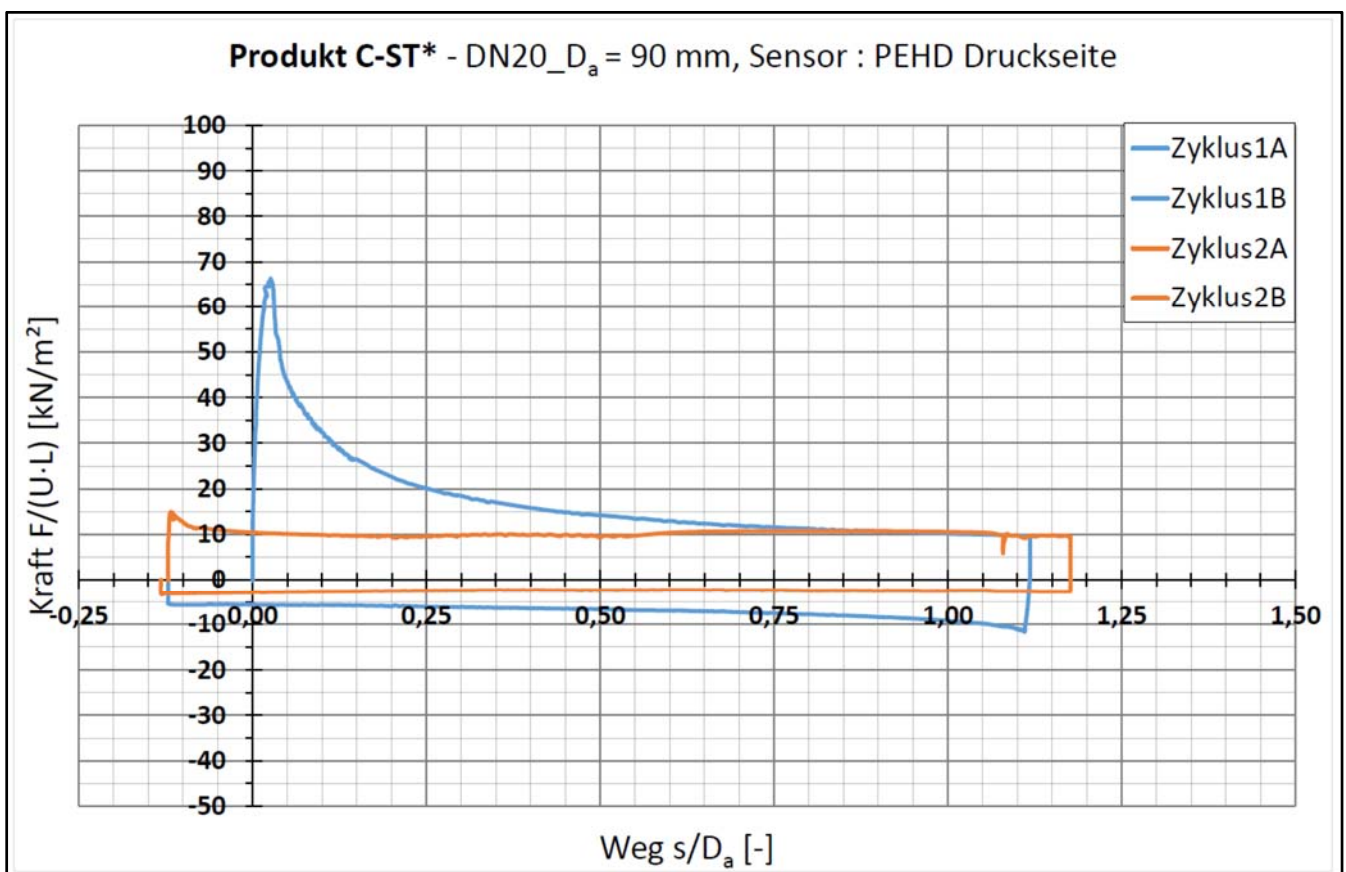
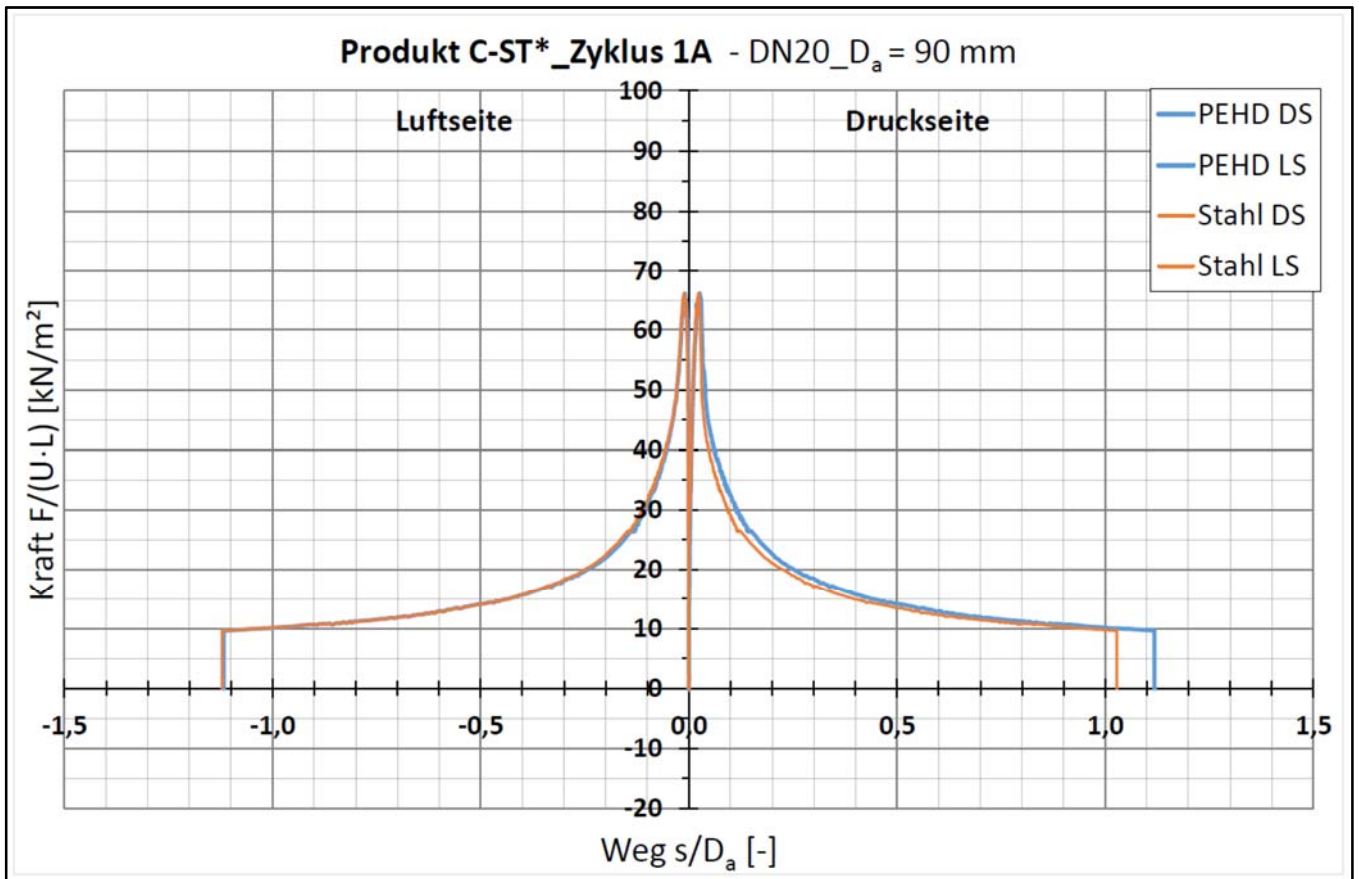
Anlage 13.1: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt A**

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



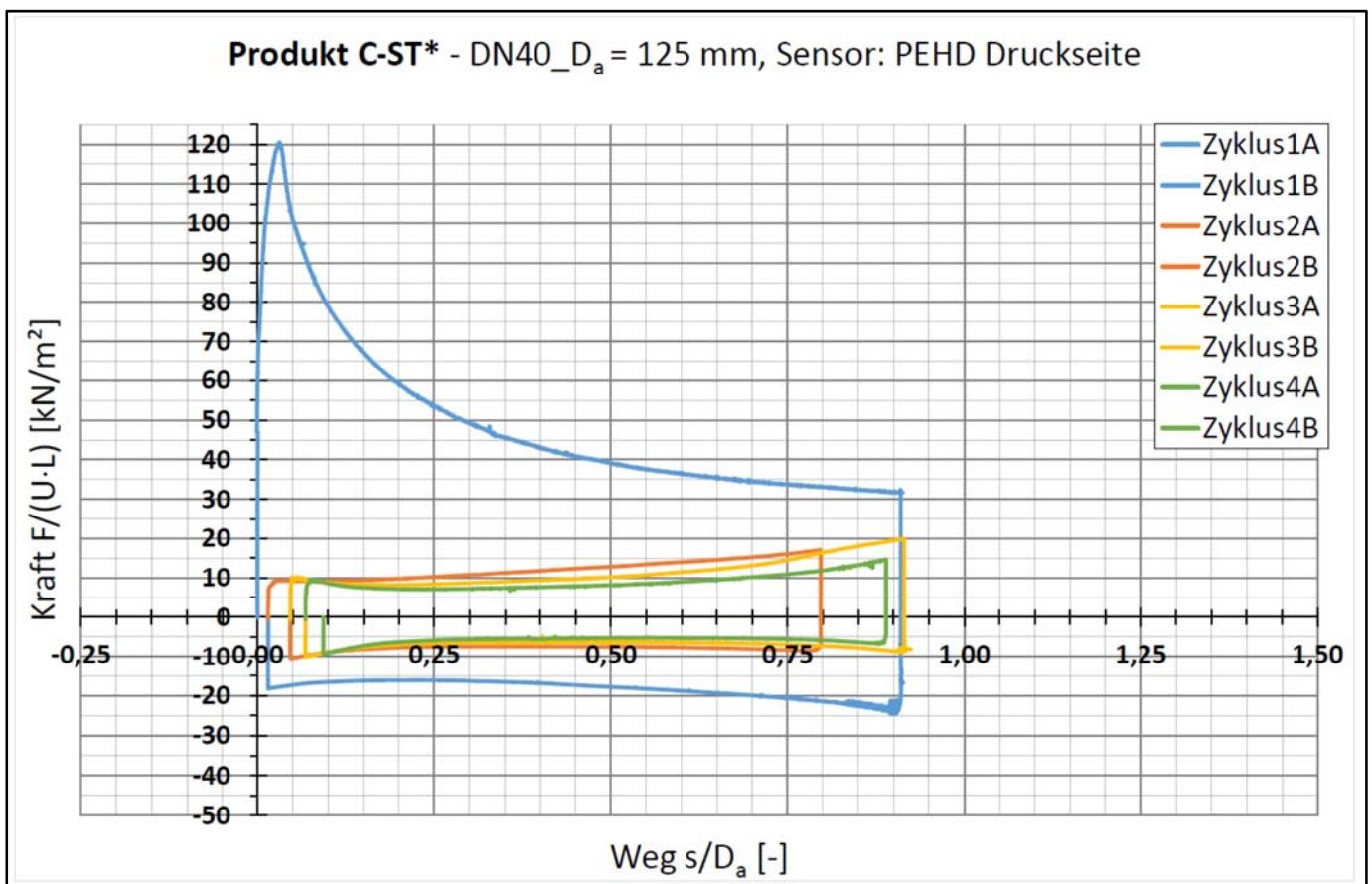
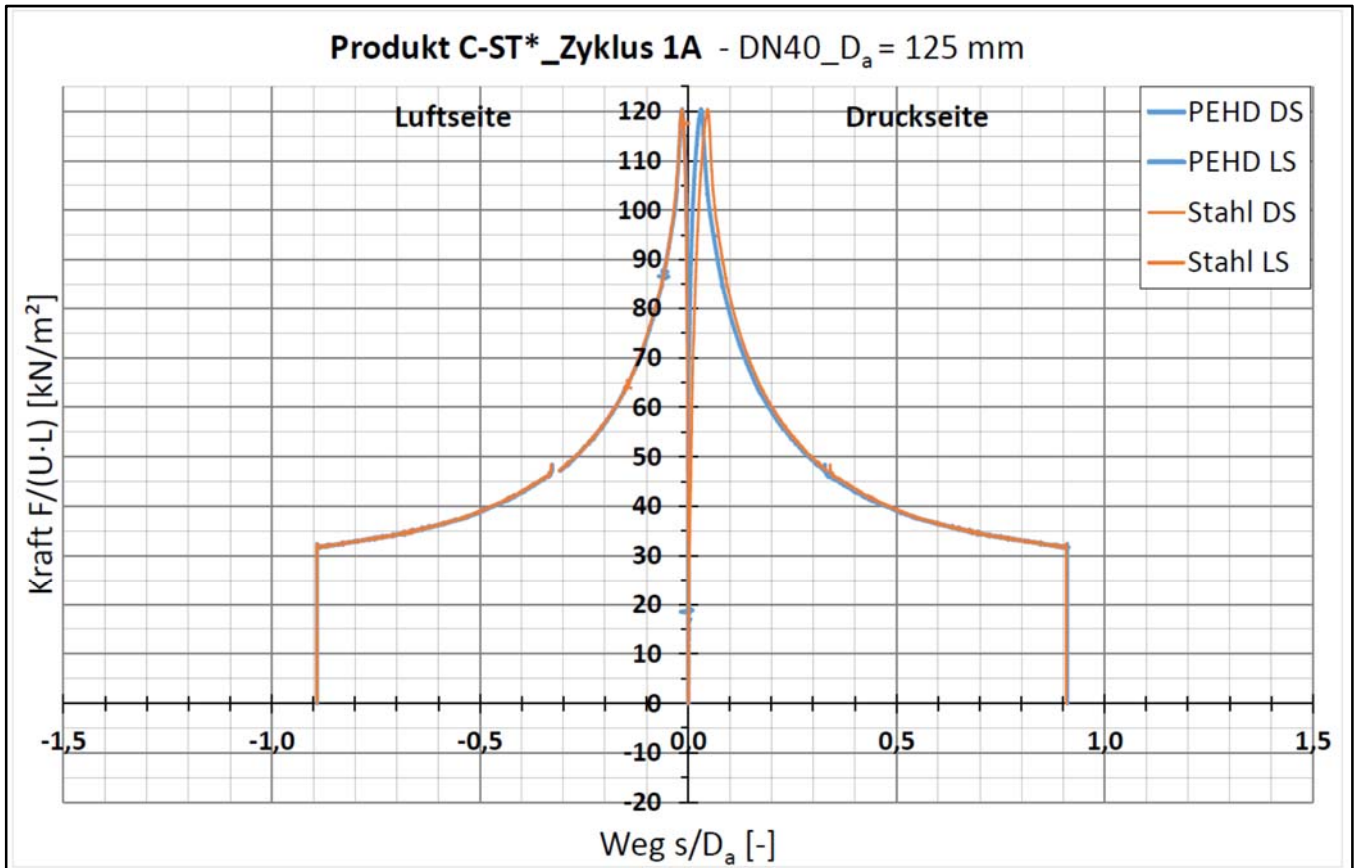
Anlage 13.2: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt C-ST\***

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



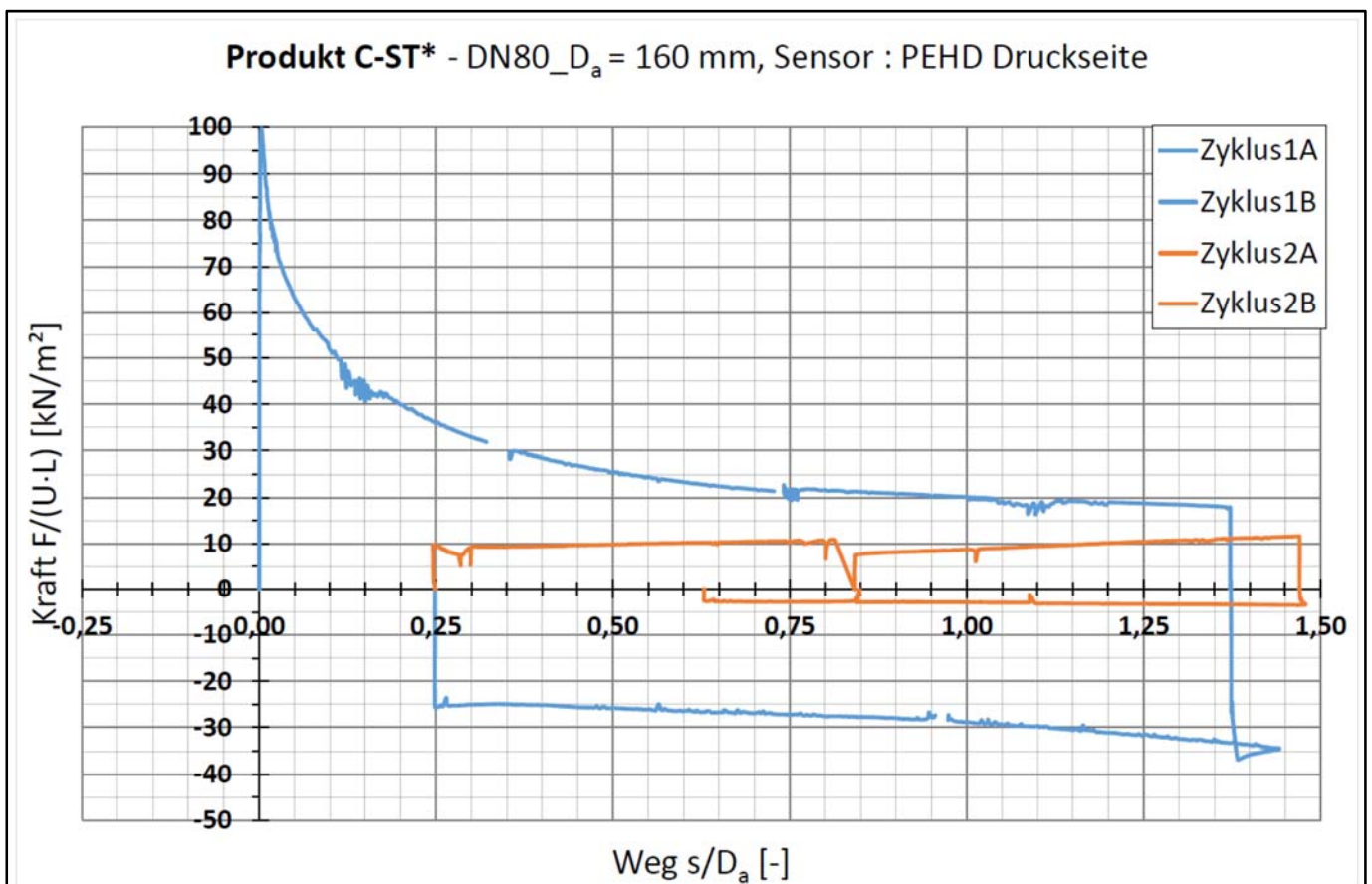
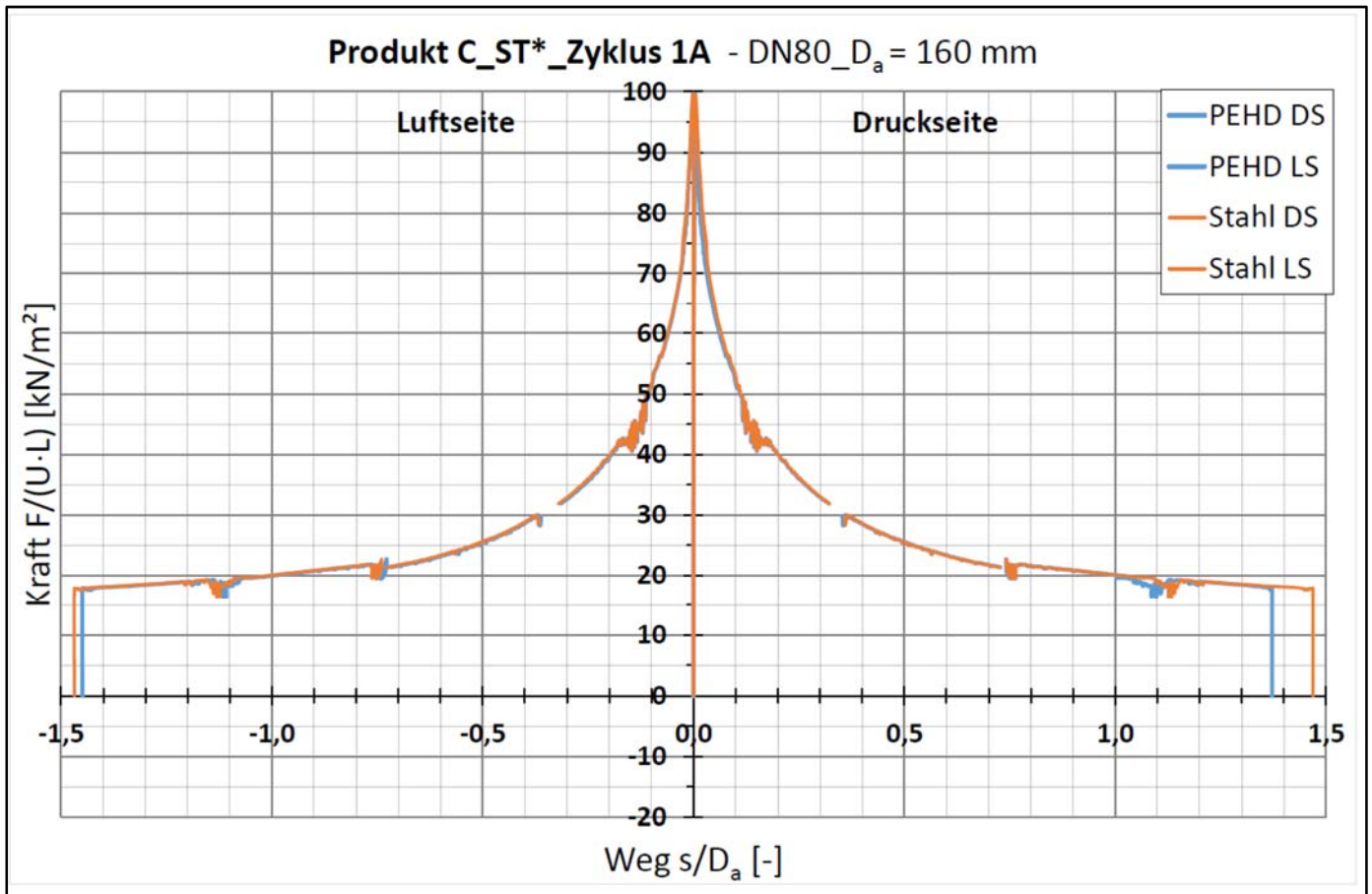
Anlage 13.2: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt C-ST\***

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



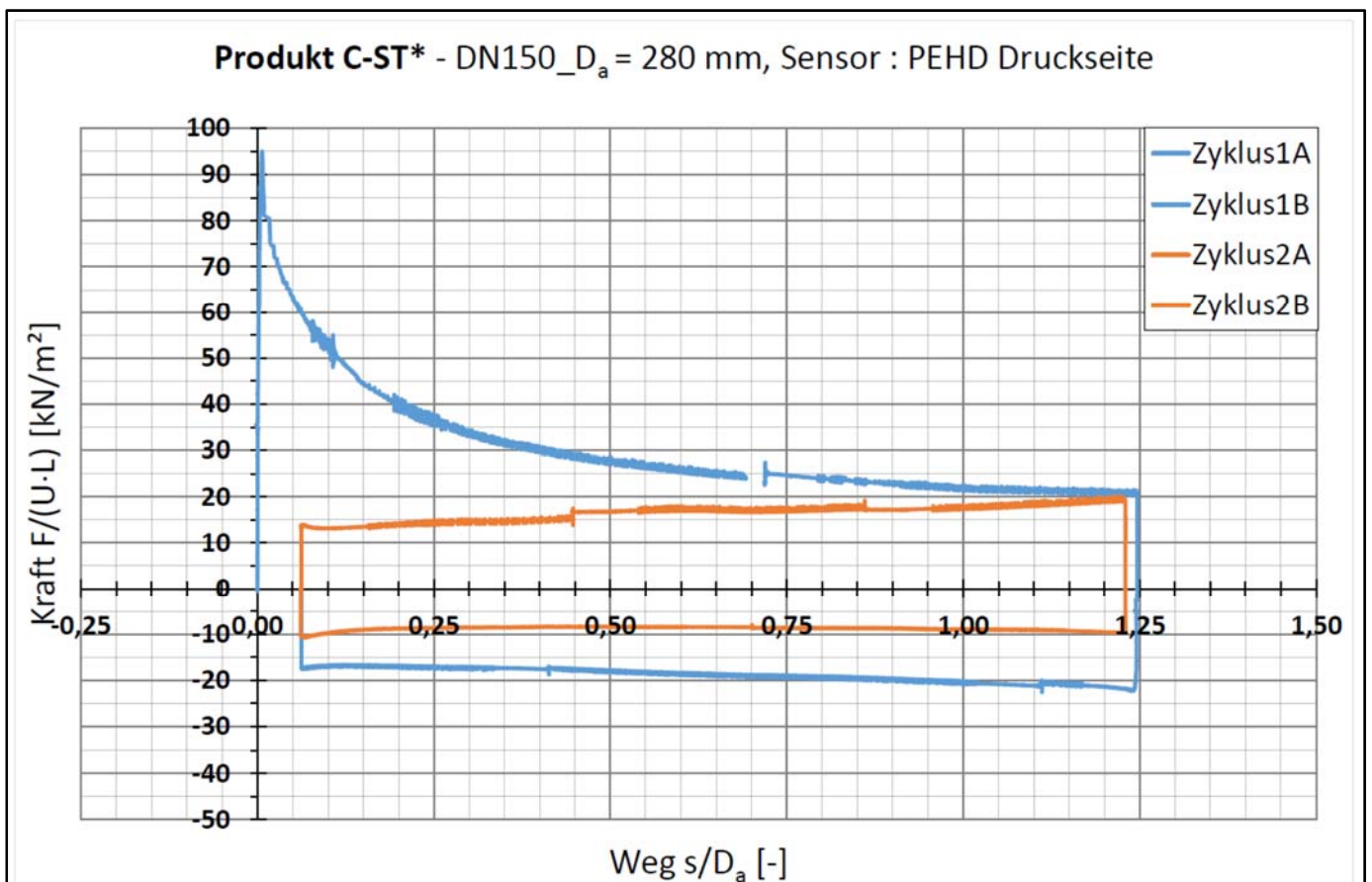
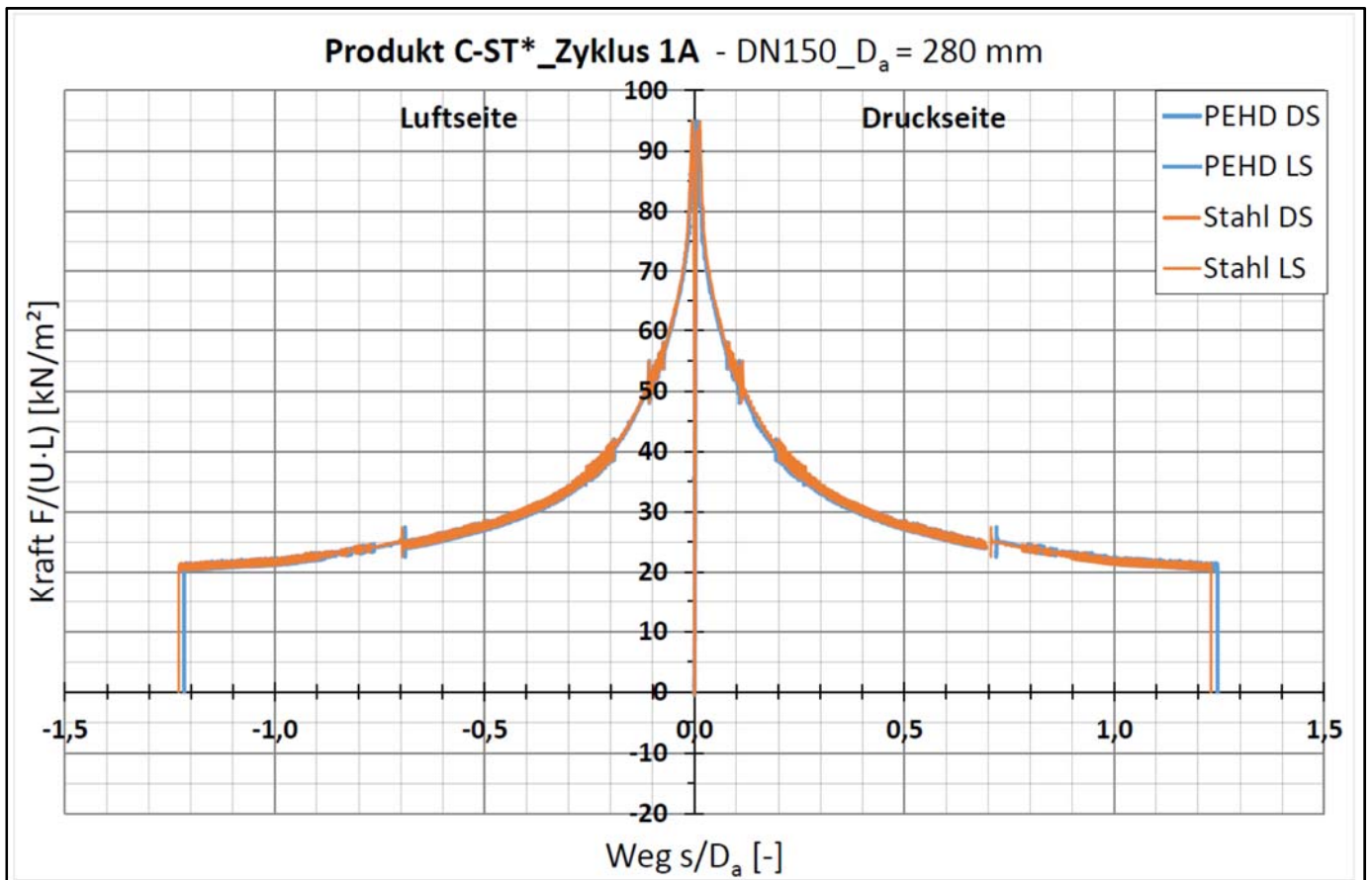
Anlage 13.2: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt C-ST\***

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



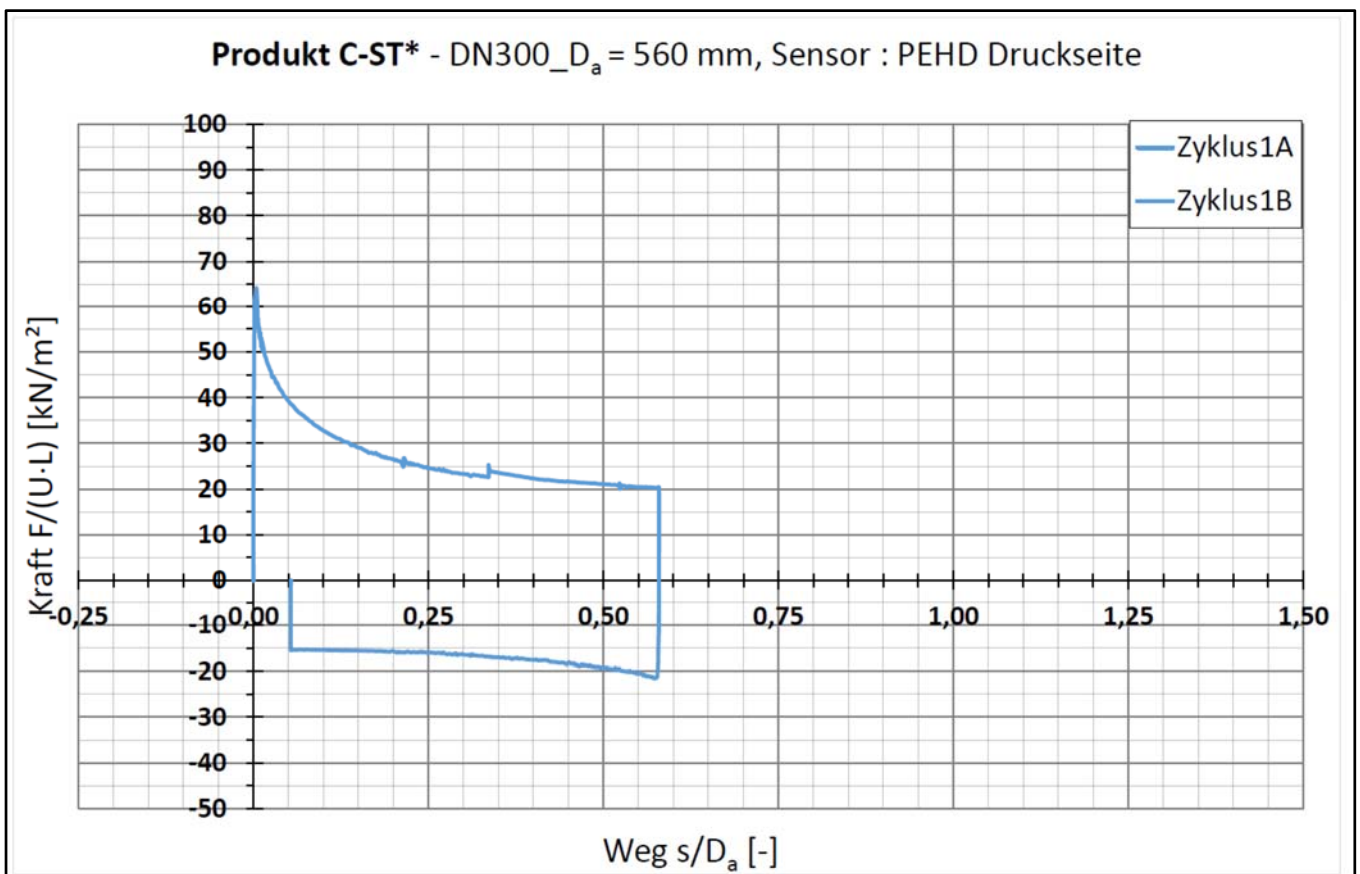
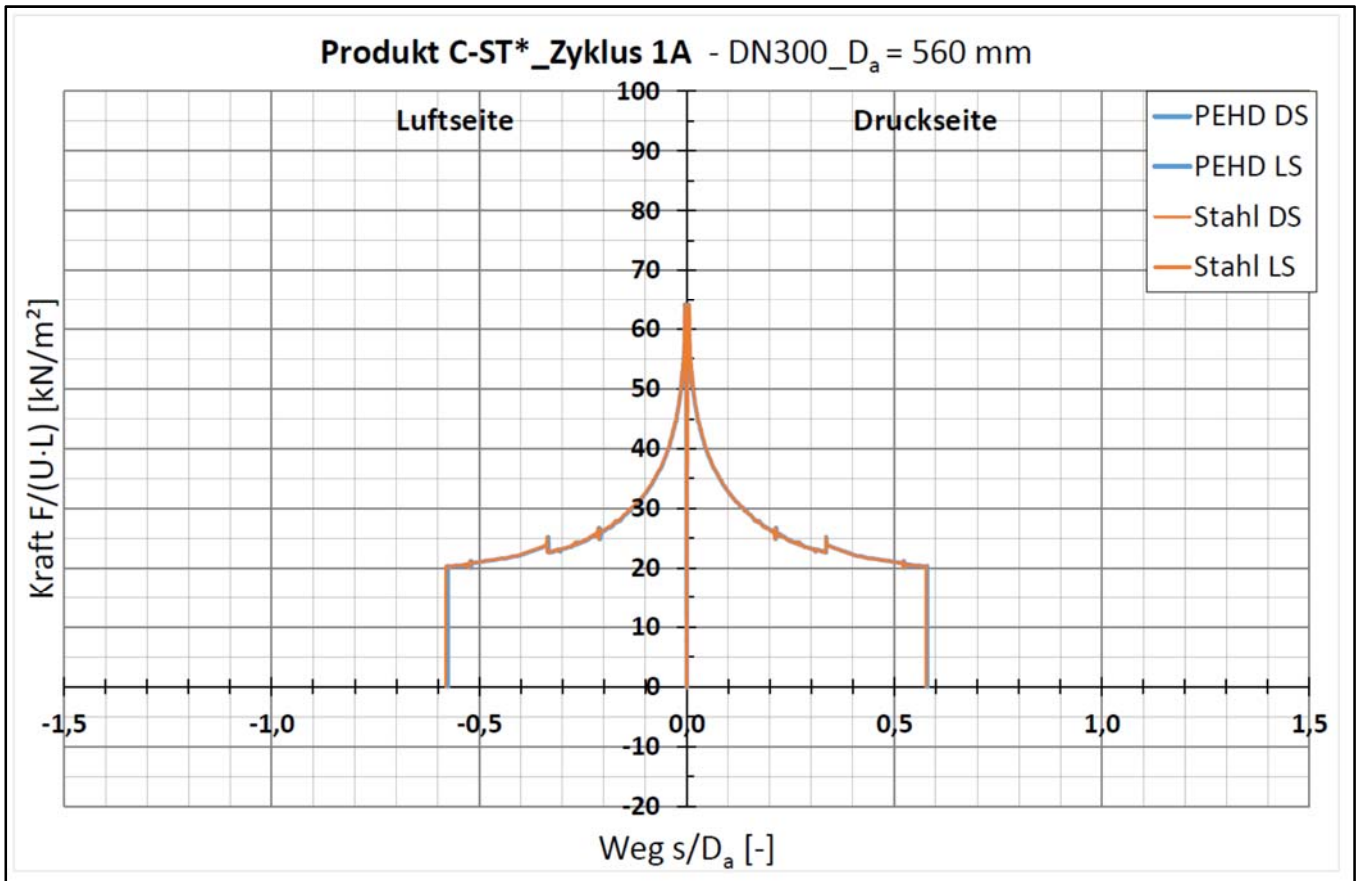
# Anlage 13.2: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit Produkt C-ST\*

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



Anlage 13.2: Technikumsversuche im Maßstab 1:1 mit **Produkt C-ST\***

Versuchskurven der Spitzen- und Plateauwerte der untersuchten KMR DN 20, 40, 80, 150 und 300



## Anlage 14:

### Normierung der Ergebnisse der Großversuche

Um die Ergebnisse der Großversuche untereinander vergleichbar zu machen, müssen die Zeit  $t$  in Tagen [d] und die jeweilige mittlere Normalspannung  $\sigma'_N$  in [kPa] oder [bar] auf die KMR berücksichtigt werden, was mit Hilfe der Ergebnisse der durchgeführten kleinmaßstäblichen Durchschiebversuche im Rahmen der versuchstechnischen Schwankungen der Ergebnisse gelingt. Dazu wird zunächst folgende Beziehung zwischen den kleinmaßstäblichen Durchschiebeversuchen (Index „M“) und den Großversuchen (Index „GV“) aufgestellt:

$$\left(\frac{\tau(t_1)}{\tau(t_2)}\right)_M \stackrel{!}{=} \left(\frac{\tau(t_1)}{\tau(t_2)}\right)_{GV} \quad \left(\frac{\tau(\sigma'_{N,1})}{\tau(\sigma'_{N,2})}\right)_M \stackrel{!}{=} \left(\frac{\tau(\sigma'_{N,1})}{\tau(\sigma'_{N,2})}\right)_{GV}$$

Formel 1: Beziehungen zwischen kleinmaßstäblichen Durchschiebeversuchen (Index „M“) und den Großversuchen (Index „GV“) zu den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  sowie mit den Normalspannungen  $\sigma'_{N,1}$  und  $\sigma'_{N,2}$ .

Durch Umstellen der Formel 1 ergeben sich:

$$\tau(t_1)_{GV} = \left(\frac{\tau(t_1)}{\tau(t_2)}\right)_M \cdot \tau(t_2)_{GV} \quad \tau(\sigma'_{N,1})_{GV} = \left(\frac{\tau(\sigma'_{N,1})}{\tau(\sigma'_{N,2})}\right)_M \cdot \tau(\sigma'_{N,2})_{GV}$$

Formel 2: Wichtung der Messergebnisse des Großversuche („GV“) zum Zeitpunkt  $t_2$  und der Normalspannung  $\sigma'_{N,2}$  mit den Quotienten ( $f_t$ ;  $f_\sigma$ ) der Versuchswerte der kleinmaßstäblichen Versuche („M“) zur überschlägigen Ermittlung der Werte des Großversuche zum Zeitpunkt  $t_1$  und der Normalspannung  $\sigma'_{N,1}$ .

Die beiden Gleichungen in Formel 1 können zusammengefasst werden, da der Durchschiebewiderstand  $\tau(t, \sigma'_N)$  eine Funktion der Zeit  $t$  und der Normalspannung  $\sigma'_N$  ist.

$$\tau(t_1, \sigma'_{N,1})_{GV} = \underbrace{\left(\frac{\tau(t_1, \sigma'_{N,1})}{\tau(t_2, \sigma'_{N,1})}\right)_M}_{f_t} \cdot \underbrace{\left(\frac{\tau(t_2, \sigma'_{N,1})}{\tau(t_2, \sigma'_{N,2})}\right)_M}_{f_\sigma} \cdot \tau(t_2, \sigma'_{N,2})_{GV}$$

Formel 3: Kombination der Gleichungen aus Formel 2 zur Herleitung der Gewichtungsfaktoren  $f_t$  und  $f_\sigma$ .

Für die zeit- und spannungsabhängige Wichtung der Ergebnisse der Großversuche können die Diagramme des Produktes A in Abbildung 1 und Abbildung 2 und die Diagramme des Produktes C-ST\* in Abbildung 3 und Abbildung 4 bzw. die darin eingezeichneten Ausgleichsfunktionen zur Ableitung der Faktoren  $f_t$  und  $f_\sigma$  verwendet werden. Empfohlen zur Ermittlung von  $f_t$  und  $f_\sigma$  werden als Bezugsspannung  $\sigma'_{N,1} = 0,125 \text{ bar} = 12,5 \text{ kPa}$  und als Bezugszeit  $t_1 = 28\text{d}$ , da letztere aufgrund der Versuchsanzahl den am besten abgesicherten Werte zugeordnet ist. Sind alle Faktoren  $f_t$  und  $f_\sigma$  für die Adhäsionsspitze ( $f_{t,max}$ ;  $f_{\sigma,max}$ ) und für den Restwert ( $f_{t,pl}$ ;  $f_{\sigma,pl}$ ) bestimmt, können die korrigierten bzw. normierten Werte  $\tau^*_{R,max}$  und  $\tau^*_{R,pl}$  mittels Formel 4 ermittelt werden.

$$\tau^*_{R,max} = \underbrace{f_{\sigma,max} \cdot f_{t,max}}_{f_{max}} \cdot \tau_{R,max} \quad \tau^*_{R,pl} = \underbrace{f_{\sigma,pl} \cdot f_{t,pl}}_{f_{pl}} \cdot \tau_{R,pl}$$

Formel 4: Korrektur der Zeit- und Druckabhängigkeit bzw. Normierung von  $\tau_{R,max}$  und  $\tau_{R,pl}$  auf  $0,125 \text{ bar} = 12,5 \text{ kPa}$  und  $t = 28\text{d}$ .

Dem zuvor beschriebenen Vorgehen liegen die Annahmen gemäß Formel 1 zu Grunde, dass zeitliche und druckabhängige Entwicklung von Modellversuch und Großversuch gleich sind.

Beim Vergleich aller Diagramme in Abbildung 1 bis Abbildung 4 wird erkennbar, dass sowohl bei Produkt A als auch C-ST\* offensichtlich nur die Zeitabhängigkeit der Adhäsionsspitze  $F_{Peak}$  bzw.  $\tau_{R,max}$  einer logarithmischen Gesetzmäßigkeit folgt und alle anderen Zusammenhänge durch lineare Ausgleichskurven angenähert werden können. Die Zeitabhängigkeit des



Plateauwert  $\tau_{R,pl}$  ist tendenziell sehr gering und kann vernachlässigt werden. Da die untersuchten KMR fast alle dieselbe Überdeckungshöhe aufwiesen, führt im W. der Korrekturfaktor  $f_{max}$  zu einer Verringerung von  $\tau_{R,max}^*$  gegenüber den Messwerten  $\tau_{R,max}$ ; bei  $\tau_{R,pl}^*$  ist die Korrektur erwartungsgemäß vernachlässigbar bis gering.

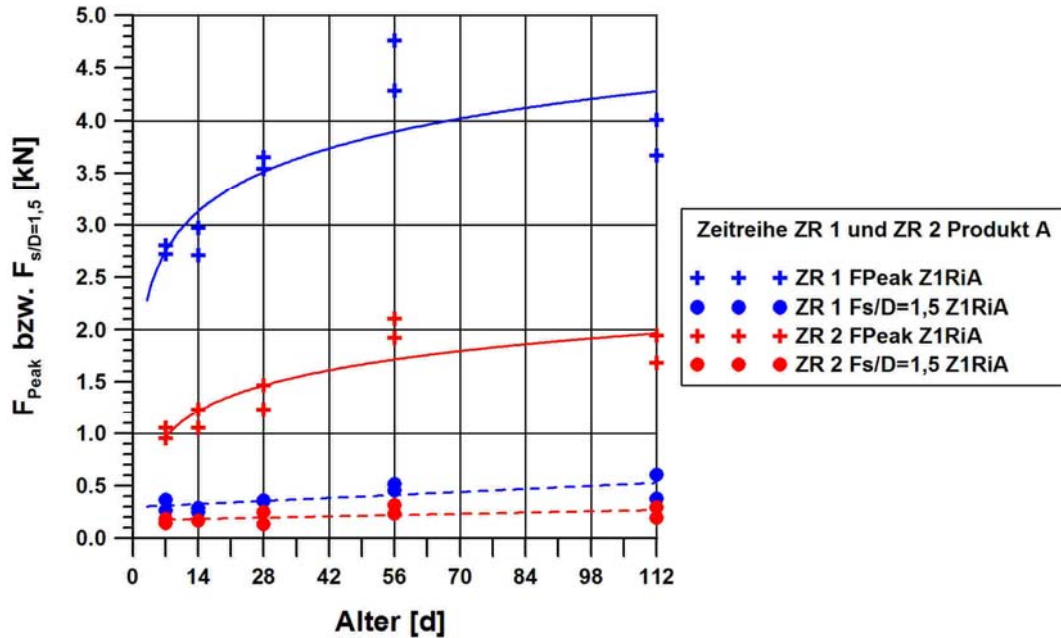


Abbildung 1: Z1 RiA: ZR 1 und ZR 2 Produkt A -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

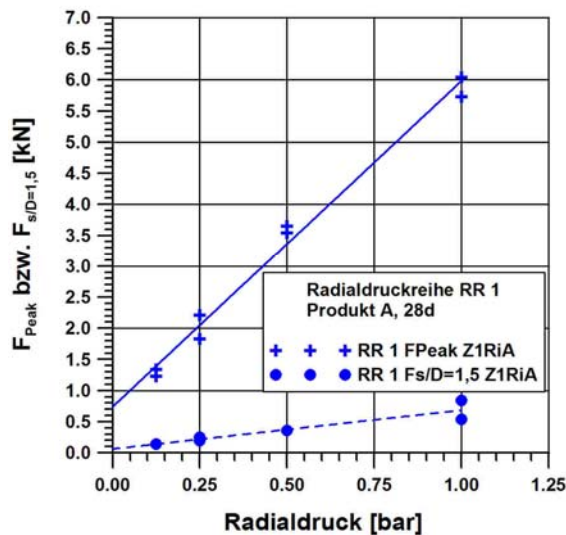


Abbildung 2: Z1 RiA - RR 1 Produkt A -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

Die Ausgleichsfunktionen für **Produkt A** der Zeitreihe ZR1 in Abbildung 1 und für die Druckreihe RR1 in Abbildung 2 lauten, worin  $A_{PE}$  die Oberfläche des Modellrohrs in Kontakt mit dem ZFSV beschreibt.

$$\tau_{R,max}(t, \sigma'_N = 0,5 \text{ bar})_M = \frac{[0,55 \cdot \ln(t) + 0,17]}{A_{PE}} \quad \tau_{R,max}(t = 28d, \sigma'_N)_M = \frac{[5,24 \cdot \sigma'_N + 0,74]}{A_{PE}}$$

Formel 5: Ausgleichsfunktionen für  $\tau_{R,max} = F_{Peak} / A_{PE}$  des Produkts A: Links – Zeitabhängigkeit, rechts – Druckabhängigkeit.

Durch Einsetzen der Bezugszeit  $t_1 = 28$  d und der Zeit  $t_2$ , zu dem der Großversuch durchgeführt wurde, in Formel 5 links, erhält man Zahlenwerte für  $\tau_{R,max}(t_2, \sigma'_N = 0,5 \text{ bar})$  und  $\tau_{R,max}(t_2, \sigma'_N = 0,5 \text{ bar})$  aus den der Quotient bzw. Faktor  $f_{t,max}$  gemäß der Formel 3 bzw. Formel 4 berechnet werden kann. Das gleiche Vorgehen erfolgt für den Faktor  $f_{\sigma,max}$  jedoch in Formel 5 rechts und  $\tau_{R,max}(t_1, \sigma'_{N,1} = 0,5 \text{ bar})$  und  $\tau_{R,max}(t_2, \sigma'_{N,2})$ , wobei  $\sigma'_{N,2}$  das Spannungsniveau beim Großversuch kennzeichnet.

Für den Plateauwert  $\tau_{R,pl}$  des Produkts A ergaben sich die folgenden Ausgleichsfunktionen der Zeitreihe ZR1 in Abbildung 1 und für die Druckreihe RR1 in Abbildung 2.

$$\tau_{R,pl}(t, \sigma'_N = 0,5 \text{ bar})_M = \frac{[0,002 \cdot (t) + 0,297]}{A_{PE}} \quad \tau_{R,pl}(t = 28d, \sigma'_N)_M = \frac{[0,62 \cdot (\sigma'_N) + 0,06]}{A_{PE}}$$

Formel 6: Lineare Ausgleichsfunktionen für  $\tau_{R,pl} = F_{Peak} / A_{PE}$  des Produkts A: Links – Zeitabhängigkeit, rechts – Druckabhängigkeit.

Entsprechend dem zuvor beschriebenen Vorgehen können nun die Faktoren  $f_{t,pl}$  und  $f_{\sigma,pl}$  berechnet werden.

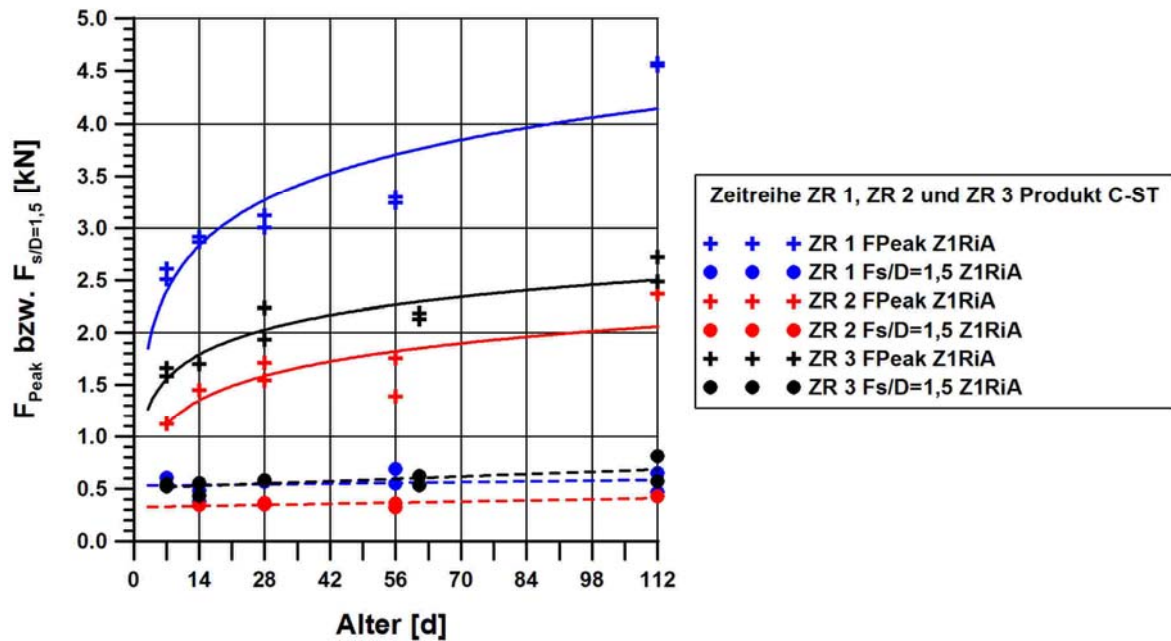


Abbildung 3: Z1 RiA- ZR 1, ZR 2 und ZR 3 Produkt C-ST -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  - alle Proben

Die Ausgleichsfunktionen für **Produkt C-ST\*** der Zeitreihe ZR3 mit Bezugsspannung 0,32 bar in Abbildung 3 und für die Druckreihe RR1 in Abbildung 4 lauten:

$$\tau_{R,max}(t, \sigma'_N = 0,32 \text{ bar})_M = \frac{[0,34 \cdot \ln(t) + 0,89]}{A_{PE}} \quad \tau_{R,max}(t = 28d, \sigma'_N)_M = \frac{[5,20 \cdot \sigma'_N + 0,43]}{A_{PE}}$$

Formel 7: Ausgleichsfunktionen für  $\tau_{R,max} = F_{Peak} / A_{PE}$  des Produkts A: Links – Zeitabhängigkeit, rechts – Druckabhängigkeit.

Für den Plateauwert  $\tau_{R,pl}$  des Produkts A ergaben sich die Ausgleichsfunktionen der Zeitreihe ZR1 in Abbildung 3 und für die Druckreihe RR1 in Abbildung 4:

$$\tau_{R,pl}(t, \sigma'_N = 0,5 \text{ bar})_M = \frac{[0,002 \cdot (t) + 0,507]}{A_{PE}} \quad \tau_{R,pl}(t = 28d, \sigma'_N)_M = \frac{[0,771 \cdot (\sigma'_N) + 0,176]}{A_{PE}}$$

Formel 8: Lineare Ausgleichsfunktionen für  $\tau_{R,pl} = F_{Peak} / A_{PE}$  des Produkts A: Links – Zeitabhängigkeit, rechts – Druckabhängigkeit.

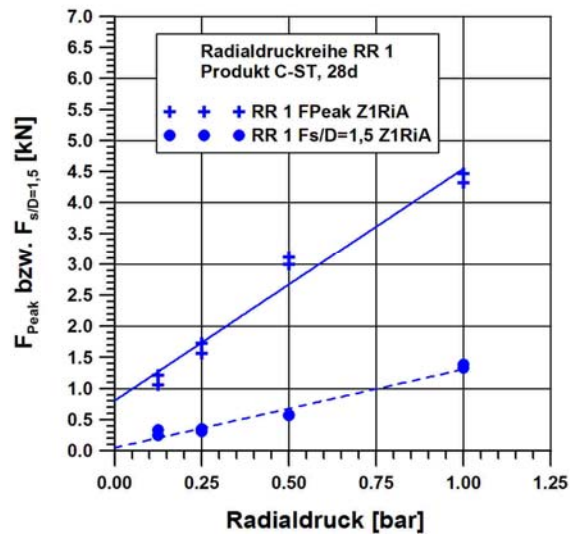


Abbildung 4: Z1 RiA - RR 1 Produkt C-ST -  $F_{Peak}$  und  $F_{s/D=1,5}$  – alle Proben

Auch für Produkt C-ST\* können die Faktoren  $f_{t,max}$  und  $f_{\sigma,max}$  sowie  $f_{t,pl}$  und  $f_{\sigma,pl}$  entsprechend dem zuvor für Produkt A beschriebenen Vorgehen ermittelt werden.

## **Anlage 15: Anforderungen an zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR**

### **1. Vorbemerkungen**

Zur Sicherung der für die Kunststoffmantelrohre (KMR) erforderlichen Dehnungsbehinderung sind gemäß AGFW-Forschungsprojekt 03ET1063 sowohl aus der Gruppe Mixed on Site (MoS) als auch aus der Gruppe Mixed in Plant (MiP) geeignete ZFSV verfügbar.

Der Bieter hat dem Auftraggeber zu benennen, welches Produkt von welchem Hersteller und Lieferanten angeboten wird und welche Komponenten beinhaltet sind. Die Umweltverträglichkeit des in den Graben einzugießenden Produkts ist darzustellen.

Der Bieter muss eine vollständige Verfahrensbeschreibung von der Eignungsprüfung bis zur Inbetriebnahme der Fernwärmeleitung einschließlich aller technischen und zeitlichen Abhängigkeiten für Qualitätssicherungszwecke vorlegen.

Bieter müssen mit Angebotsabgabe und während der Werkleistung die erforderliche Qualifikation (Fachkunde, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit) nachweisen.

### **2. Anforderungen**

Die in den "Hinweisen für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) im Erdbau" (H ZFSV 2012) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) genannten Qualitätsanforderungen sowie die in dieser Anlage genannten, fernwärmespezifischen Anpassungen und Ergänzungen sind einzuhalten. Werden vom Auftraggeber zusätzliche Anforderungen an die einzusetzenden ZFSV gestellt oder zusätzliche Prüfungen verlangt, sind diese in der Leistungsbeschreibung anzugeben.

Bei der Rezepturerstellung sind die Eigenschaften des umgebenden Bodens und des eventuell vorhandenen Grundwassers gemäß Bodengutachten zu berücksichtigen.

Bei ZFSV handelt es sich um herstellereigenspezifische und/oder projektspezifische Baustoffe, die auf die jeweilige Maßnahme angepasst werden müssen. Aus diesen Gründen kann für ZFSV keine universelle Rezeptur angegeben werden, die für jede Verlegung von KMR in ZFSV geeignet ist. Wie bei solchen Baustoffen und im Erdbau üblich, werden in solchen Fällen Anforderungen und Grenzwerte definiert, die das Produkt – hier ZFSV – erfüllen muss. Das Erreichen der Anforderungen und das Einhalten der Grenzwerte werden durch ein planungs- und baubegleitendes System an Untersuchungen, Prüfungen und Überwachungsmaßnahmen sichergestellt.

In Anlehnung an das im Erdbau bzw. Verkehrswegbau übliche Qualitätsüberwachungssystem werden 4 Prozesse empfohlen:

- A) Eignungsuntersuchungen und -prüfungen zumeist vor der Baumaßnahme
- B) Eigen- und Fremdüberwachung der Hersteller/Lieferanten
- C) Eigenüberwachung des Auftragnehmers auf der Baustelle und ggf. im Nachgang
- D) Kontrollprüfungen des Auftraggebers auf der Baustelle und ggf. im Nachgang

Auch die Tabelle 3 in (H ZFSV 2012) ist nach den o. g. 4 Prozessen aufgebaut, weshalb in den Abschnitten 2.1 bis 2.6 die aus dem AGFW-Forschungsprojekt 03ET1063 abgeleiteten,

fernwärmespezifischen Anforderungen, Grenzwerte und Randbedingungen benannt werden, die von Tabelle 3 abweichen oder darüber hinaus gehen. Anstelle von Tabelle 3 in (H ZFSV 2012) richten sich bei Fernwärmebaumaßnahmen Art und Umfang der Prüfungen nach der nachfolgenden Tabelle. Die Ergebnisse der Eignungsprüfung und die Prüfprotokolle der Eigenüberwachung sind dem Auftraggeber vorzulegen.

Alle in der folgenden Tabelle 1 benannten Anforderungen stellen Mindestprüfumfänge für Bauvorhaben der Projektklassen B und C nach DIN EN 13941 dar; bei der Projektklasse A dürfen nach Vorgaben des Auftraggebers die Mindestprüfumfänge unterschritten werden.

Im Zuge der Eignungsprüfungen und -untersuchungen werden Rezepturen mit zulässigen Bandbreiten und charakteristischen Mittelwerten ermittelt und festgelegt, mit denen die Anforderungen erfüllt werden. Das angewendete Prüfverfahren der Eignungsprüfung ist ausschlaggebend für die Eigenüberwachung und Kontrollprüfung.

Ändern sich gegenüber der Rezeptur die Zusammensetzung, Art und Eigenschaften der Böden, der Baustoffe, der Bindemittel, der Zusätze und des Anmischwassers sowie die Technologie des Mischvorgangs sind eine erneute Eignungsuntersuchungen und -prüfung vorzunehmen.

Es ist zweckmäßig, Untersuchungen an Proben mit gleichen Abmessungen zusammenzufassen. So können z. B. die Rohdichten, Volumenverlustmessungen und einaxiale Druckfestigkeits-Versuche an den denselben zylinderförmige Proben  $h/d = 1,9 - 2,5$  durchgeführt werden.

Von der Durchführung erneuter Eignungsuntersuchungen und Eignungsprüfungen kann abgesehen werden, falls bereits zuvor – bei z. B. andere Bauvorhaben - durchgeführte Eignungsuntersuchungen und Eignungsprüfungen mit gleichen Ausgangsmaterialien und Rezepturen in den zulässigen Bandbreiten vorliegen. Die Übertragbarkeit der bereits durchgeführten Eignungsuntersuchungen und Eignungsprüfungen ist von einem geeigneten Prüfinstitut durch Gegenüberstellung detailliert aufzuzeigen und in Berichtsform vorzulegen.

Aufgrund der Bedeutung der Dehnungsbehinderung für das KMR müssen kleinmaßstäbliche Durchschiebversuche im Re-SiST-Behälter gemäß Punkt 5.1 in folgender Tabelle 1 zur Ermittlung der Kontaktschubspannungen im Sinne einer Eignungsprüfung auch dann durchgeführt werden, wenn die Übertragbarkeit bereits durchgeführten Eignungsuntersuchungen und Eignungsprüfungen aufgezeigt wurde.

Tabelle 1: Art und Umfang der Prüfungen und Untersuchungen bei Fernwärmebaumaßnahmen mit ZFSV.

Lfd. NR.	Eigenschaften der Böden und Baustoffe	Prüfverfahren	Eignungsprüfung	Eigenüberwachung		Kontrollprüfung	Anmerkungen
				Hersteller	Baustelle		
1	2	3	4	5	6	7	
<b>1 Böden und sonstige Baustoffe</b>							
1.1	Bodenart	DIN EN ISO 14688-1; -2; DIN 4023, Anhang B	X	laufend, augenscheinlich		stichprobenweise	augenscheinlich, täglich
1.2	Korngrößenverteilung	DIN 18123	X	(*)			
1.3	Zustandsgrenzen	DIN 18121	X				
1.4	Wassergehalt	DIN 18121	X				
1.5	organische Bestandteile	TP BF-StB B 10.1, DIN 18128	X				
1.6	schädliche Bestandteile (z.B. Sulfate)	TP BF-StB B 10.1 und 11.3	X				
1.7	umweltrelevante Inhaltsstoffe	TL BuB E-StB	X				
<b>2 Bindemittel, Zusätze</b>							
2.1	Übereinstimmung der Lieferung mit der jeweilig festgelegten Art, Sorte, Zusammensetzung, Menge	Vergleich der Lieferscheine	X	jede Lieferung		stichprobenweise	
<b>3 Anmischwasser</b>							
3.1	ph-Wert, Leitfähigkeit, Temperatur	in Anlehnung an DIN EN 1008	X	jede Lieferung		stichprobenweise	Entfällt bei Trinkwasser
<b>4 ZFSV nach Eignungsprüfung / Rezeptur</b>							
4.1	ZFSV	Vergleich Lieferschein mit Rezeptur/ Eignungsprüfung			jede Lieferung	stichprobenweise	
4.2	Fließfähigkeit, Konsistenz, Verarbeitbarkeit	Ausbreitmaß, Ziehmaß <sup>(k)</sup>	X	X	X <sup>(d)</sup>	stichprobenweise	im frischen Zustand
4.3	Rohdichte <sup>(a)</sup>	in Anlehnung an DIN EN 12350-6 ohne Verdichtung	X	X <sup>(b)(e)</sup>	X <sup>(b)(d)</sup>	1 x je Baustelle ab 50 m <sup>3</sup> <sup>(b)</sup>	im frischen Zustand
		DIN 18125 DIN EN 12390-2	X	X <sup>(b)(e)</sup>	X <sup>(b)(d)</sup>	1 x je Baustelle ab 50 m <sup>3</sup> <sup>(b)</sup>	im angesteiften und festen Zustand
4.4	Zulässiges Größtkorn bzw. Aggregatsgröße d <sub>max</sub>	Siebsatz nach DIN ISO 3310	X	X	augenscheinlich, laufend	stichprobenweise	im frischen Zustand
4.5	Entmischungsneigung, Wassererabsonderung	In Anlehnung an DIN EN 445 Absetztest im Vertikalrohr	X <sup>(c)</sup>	X <sup>(b)(c)(e)</sup>	augenscheinlich, laufend	stichprobenweise	im frischen Zustand
4.6	Festigkeitsentwicklung	Flügelscherversuche DIN 4094-4	(X)	(X)	(X)	stichprobenweise	Ansteifen/ Auftrieb, Erstarren, Erhärten
		Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136 <sup>(a)</sup>	X	X <sup>(b)(e)</sup>	2 x je Baustelle <sup>(b)(h)</sup>	1 x je Baustelle <sup>(b)(h)</sup>	Aushubfähigkeit nach H ZFSV Prüfalter bis 56d
4.7	Raum- und Strukturbeständigkeit	Volumenverlustmessung an zylinderförmigen Proben <sup>(a)</sup>	X	X <sup>(b)(e)(h)</sup>	2 x je Baustelle <sup>(b)(h)</sup>	1 x je Baustelle <sup>(b)(h)</sup>	Langzeit Volumenstabilität
		Eindimensionaler Kompressionsversuch DIN 18135	(X)	(X) <sup>(b)</sup>			Strukturfestigkeit; Steifmodul E <sub>s</sub>
4.8	Verformungsmodul E <sub>v2</sub> bzw. E <sub>vd</sub> / Tragfähigkeit	in Anlehnung an DIN 18134 und TP BF-StB, Teil B 8.3	(X)		(X) <sup>(f)</sup>	(X) <sup>(f)</sup>	im eingebauten Zustand
<b>5 Fernwärmespezifische Eignungsprüfung mit ZFSV</b>							
5.1	Kontaktschubspannungen, Dehnungsbehinderung	Laborversuche (Re-SiST)	X <sup>(g)(i)</sup>	X <sup>(b)(e)(i)</sup>		X <sup>(b)(e)(i)</sup>	min. 4 Zyklen
		Großversuch M 1:1	(X)				
		Feldversuch M 1:1			(X)		

- (a) Zylinderförmige Proben h/d = 1,9 - 2,5
- (b) Als Schöpfproben im eingebauten Zustand bzw. direkt aus dem Graben; nicht unmittelbar aus der Mischanlage.
- (c) Standzylinder/ Probezylinder: h = 10 · d<sub>0</sub> ≥ 20 cm und d<sub>0</sub> ≥ 5,0 · d<sub>max</sub>
- (d) 1-te Lieferung am Tag insgesamt 3-mal täglich; bei Einbau von Kleinstmengen (< 25 m<sup>3</sup>) kann die Eigenüberwachung des Lieferwerkes herangezogen werden.
- (e) alle 20 Produktionstage oder 1-mal alle 500 m<sup>3</sup>, die größere Häufigkeit ist maßgebend
- (f) Nach ZTVE-StB unter Berücksichtigung der Festigkeitsentwicklung und Strukturbeständigkeit; ggf. auf ungebundener, geogitterbewehrter Tragschicht über ZFSV
- (g) Zeit- und Druckreihenuntersuchungen (7, 14, 28, 56d und 0,125 bis 1,0 bar Seitendruck)
- (h) Prüfalter 28d
- (i) Prüfumfang kann bei Projektklasse A nach DIN EN 13.941 reduziert werden.
- (k) Ausbreitmaß in Anlehnung an DIN EN 12350-5 ohne Stößelausgleich
- (X) Umfang und Häufigkeit gemäß den Vorgaben des AG oder Netzbetreiber/Ver- und Entsorgungsunternehmen
- (\*) Ändern sich gegenüber der Rezeptur die Zusammensetzung, Art und Eigenschaften der Böden, der Baustoffe, der Bindemittel, der Zusätze und des Anmischwassers sowie die Technologie des Mischvorgangs sind erneute Eignungsuntersuchungen und -prüfungen vorzunehmen.

## 2.1 Dehnungsbehinderung

Mittels kleinmaßstäbigen Durchschiebversuchen im ReSiST-Behälter gemäß AGFW-Forschungsprojekt 03ET1063 sind insbesondere bei den Eignungsuntersuchungen A mit relativ geringem Aufwand Zeit- und Druckreihenversuche durchzuführen, die sich an den nachfolgend genannten Parametern orientieren.

Für Leitungen, bei denen die Dehnungsbehinderung von großer Bedeutung ist, z. B. Projektklassen B und C nach DIN EN 13941, wird empfohlen, mit der so ermittelten Rezeptur einen Durchschiebeversuch im Maßstab 1:1 in situ in einem Graben oder alternativ als Großversuch im Labor durchzuführen.

Die Länge des mit ZFSV und repräsentativer Überdeckungshöhe verfüllten Rohrbereiches soll dabei mindestens 10-mal dem PE-Mantelrohrdurchmesser entsprechen. Das Rohr ist in 4 Zyklen mit einem Verschiebeweg von 0 mm - 50 mm - 0 mm mit einer Verschiebegeschwindigkeit von 0,1 mm/Minute zu verschieben. Der Nachweis erfolgt durch Vorlage eines Prüfprotokolls eines für solche Versuche geeigneten Prüfinstituts, z. B. OTH.R, Labor für Geotechnik.

Sofern ein Übereinstimmungsnachweis vorgelegt wird, kann das Ergebnis eines vorhandenen Durchschiebeversuchs mit vergleichbaren Randbedingungen anstelle des in dieser Position verlangten Großversuchs vorgelegt werden.

Folgende Parameter müssen eingehalten werden:

- für DN ..., PE-Mantelrohrdurchmesser ... mm
  - minimaler Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr: ... kN/m  
Dies entspricht einer Dehnungsbehinderung von 0,01 MPa.
  - maximaler Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr: ... kN/m  
Dies entspricht einer Dehnungsbehinderung von 0,02 MPa.
  - maximaler Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr beim ersten Anfahren: ... kN/m  
Dies entspricht einer Dehnungsbehinderung von 0,05 MPa.

## 2.2 Zulässiges Größtkorns $d_{max}$

Die Festlegung eines zulässigen Größtkorns muss sich u. a. an den Abständen zwischen und unter den Rohren beziehen, so dass ein gesichertes Umfließen und vollständiges Umschließen der KMR möglich ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ZFSV grundsätzlich ohne Verdichtung bzw. Rütteln eingebracht werden, weshalb empfohlen wird, das Größtkorn  $d_{max} \leq a_{min} / 5$  zu beschränken, wobei  $a_{min}$  den minimalen Abstand bezeichnet, durch den das ZFSV fließen soll. Bei dem üblichen Abstand KMR-Unterseite zu Grabensohle von 10 cm, führt dies zu einem zulässigen Größtkorn  $d_{max} \leq 20$  mm.

Dies gilt genauso für Haufwerke aus bindigen Böden, aus denen ZFSV hergestellt werden. Auch hier muss die maximale Aggregatsgröße ("Klumpengröße")  $d_{max} \leq a_{min} / 5$  gewährleistet sein. Eine Abweichung von der Vorgaben auf  $d_{max} \leq a_{min} / 3$  ist möglich, wenn durch Aufgraben in den Prozessen A, C und D gezeigt wird, dass damit ein gesichertes Umfließen und um vollständiges Umschließen der KMR gewährleistet ist. Die Ermittlung von  $d_{max}$  und dessen Masseprozentanteil erfolgt in den Ausgangsstoffen und im ZFSV im Zweifelsfall nach DIN 18123.

## 2.3 Raum- und Strukturbeständigkeit

Zur Sicherstellung der Raum- und Strukturbeständigkeit von ZFSV sind mehrere Versuche und Prüfungen notwendig. Zunächst muss überprüft werden, dass das ZFSV nicht zum Entmischen neigt, was zum einen durch Überprüfung der Wasserabsonderung ("Bluten") des frischen ZFSV in Anlehnung an DIN EN 445 mittels Absetztest in einem  $h = 10 \cdot d_{\varnothing} \geq 20$  cm hohen zylindrisches Standrohr erfolgt, dessen Durchmesser  $d_{\varnothing} \geq 5,0 \cdot d_{\max}$  entsprechen muss. Die Wasserabsonderung, die sich als freies Wasser auf der ZFSV-Oberfläche einstellt, sollte nach 3 h stets geringer als 2 % des Probenvolumens bleiben. Nach 24 Stunden wird an derselben Probe noch die Volumenstabilität (Kurzzeit) beurteilt, in dem überprüft wird, dass sich das ZFSV-Volumen nicht mehr als 3% verringert hat.

Im Zusammenhang mit diesem Versuch ist beim Ausbau der ZFSV zu prüfen, ob es zu einem Absinken der Körner und Anreicherung der größeren Kornfraktionen im unteren Bereich des zylinderförmigen Standrohrs gekommen ist. Dies erfolgt am einfachsten, indem in die säulenförmige Probe in 10 Scheiben  $\Delta h = d_{\varnothing}$  zerlegt wird und optisch beurteilt wird. Im Zweifel können die Korngrößenverteilungen der scheibenförmigen Proben nach DIN 18123 ermittelt werden.

Die Überprüfung der Volumenstabilität (Langzeit) erfolgt als Volumenverlustmessung zweckmäßigerweise an den zylinderförmiger Proben, die z. B. für die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit angefertigt werden, kurz nach dem Ausbau der Proben aus dem Probegefäßen durch Ausmessen der Proben z. B. mittels Schiebelehren. Hier sollte stets weniger als 3 % Volumenverringern auch nach  $\geq 56$  Tagen gemessen werden. Die Zeitdauer von 56 Tagen ergibt sich aus den Anforderungen des H ZFSV zur Beurteilung der Nacherhärtung mittels einaxialen Druckversuchen. Führt man z. B. nach 3, 7, 14 und 28 d Zwischenmessungen zur Volumenermittlung an, darf auch auf Basis der Entwicklung der Volumenveränderung auf Zeiträume  $\geq 56$  d zurückgeschlossen werden.

Die Untersuchungen zur langzeitlichen Raum- und Strukturbeständigkeit können wahlweise auch als eindimensionaler Kompressionsversuch nach DIN 18135 durchgeführt werden. Dieser Versuch ist bereits ausführlich in Abschnitt 3.7 des AGFW-Forschungsprojekts 03ET1063 beschrieben und lässt sich sehr einfach, neben der Beurteilung des Last-Verformungsverhaltens, auch zur Beurteilung des Schwindens/ Schrumpfens und des Schwellens/ Quellens von ZFSV einsetzen, zumal die Proben auch langfristig auf dem gewünschten Spannungsniveau gehalten und dabei kontrolliert bewässert/ befeuchtet oder getrocknet werden können. Auch dabei sind die Abmessungen der scheibenförmigen Probe  $h \geq 5,0 \cdot d_{\max}$  und  $d_{\varnothing} \geq 3,0 \cdot h$  unbedingt einzuhalten. Insbesondere gelingt es mit dem Kompressionsversuch auch, die Grenzspannung des "Strukturbruchs" zu ermitteln.

## 2.4 Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit

Die Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit der ZFSV wird – sofern vom Hersteller/ Lieferanten nichts anderes vorgegeben - mittels Ausbreitmaß ermittelt, das in Anlehnung an (DIN EN 12350-5:2009-08) jedoch ohne Stößelausgleich mit Anstoßen am Anschlag durchgeführt wird. Das Anstoßen ("Schocken") ist erforderlich, falls Bentonite oder andere wasseranlagernde Mineralien/ Stoffe mit thixotropen Eigenschaften eingesetzt werden. Bei dem im AGFW-Forschungsprojekt 03ET1063 untersuchten Produkt C haben sich Ausbreitmaße von 50 bis 60 cm bewährt. Bei Produkt A wurde dazu nach Herstellerangabe alternativ die Fließfähigkeit mittels Ziehmaß ermittelt (Abschnitt 3.6.1.1 im AGFW-Forschungsprojekt 03ET1063).

Auch das Ausbreitmaß ist neben dem Einhalten von  $d_{\max}$  ein wichtiges Kriterium für ein gesichertes Umfließen und vollständiges Umschließen der KMR und muss jeden Tag bei den ersten 3 Chargen sowie 1-mal gegen Mittag und bei der letzten arbeitstäglischen Charge im



Prozess B und C zwingend überprüft werden. Im Zweifelsfall sind alle Chargen vor dem Eingießen zu überprüfen.

Innerhalb eines ZFSV-spezifischen Zeitraums nach dem Beginn des Mischvorgangs kommt es aufgrund der Reaktionen der eingesetzten Bindemittel zum Ansteifen/Plastifizieren der ZFSV. Zwar kann durch Zugabe und Einmischen von weiterem Wasser das Ausbreitmaß wieder auf die gewünschte Größe gebracht werden, jedoch bleibt der Verfestigungsverlauf deutlich unter den Zielgrößen zurück. Deshalb dürfen die eingesetzten Produkte A und C nicht länger als 2,0 h nach Beginn des Mischens eingesetzt bzw. in den Graben eingegossen werden. Auch diese zeitliche Obergrenze der Verarbeitbarkeit ist mit den Herstellern/Lieferanten abzustimmen und in den Prozessen B bis D zumindest auf den Liefer­scheinen zu überprüfen.

## 2.5 Prüfkörperform, Probenahme und Probelagerung

Es sind bevorzugt zylinderförmige Prüfkörper einzusetzen, wobei  $h$  die Zylinderhöhe und  $d_{\emptyset}$  den Durchmesser des Zylinders bezeichnen. Bewährt haben sich Kunststoffdosen oder dünnwandige Stahlrohre mit luft- und wasserdicht abschließenden Kunststoffendkappen. Beim Einsatz von Metallen ist auf Korrosionsschutz zu achten, da sich ZFSV aufgrund der zugegebenen Zemente basisch verhalten und pH-Werte  $\geq 12$  aufweisen können.

Die Probenahme auf der Baustelle muss stets als Schöpfprobe direkt aus dem verfüllten Graben erfolgen, da sich durch den Verfüllvorgang bzw. das Eingießen ggf. Veränderungen im ZFSV einstellen können. Nach der Entnahme und dem Einbringen der ZFSV in die Probezylinder sind diese unmittelbar mit Kunststoffendkappen zu verschließen und abzudichten.

Insbesondere auf der Baustelle entnommene Proben sind vor Frost, Wasserverlust, Austrocknung, Sonneneinstrahlung, etc. geschützt zu lagern. Die Proben dürfen erst dann stoß- und vibrationsgeschützt transportiert werden, nachdem sie ausreichend verfestigt sind, was im Allgemeinen nach einigen Stunden bis 24 Stunden der Fall ist und mit dem Hersteller/Lieferanten abzuklären ist.

Sofern nicht eine besondere Einbausituation vorliegt, sind reine Materialproben nach der Lagerungsbedingung "Gesättigtes System" (siehe Abschnitt 3.6.4.2 des AGFW-Forschungsprojekts 03ET1063 zu lagern.

## 2.6 Verfestigung und Wiederaushubfähigkeit

Untersuchungen zum Ansteifen, Erstarren und Erhärten in den ersten Stunden nach dem Eingießen der ZFSV in Graben sind im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung des Auftriebs und der Steifigkeit ( $E_S$ ,  $E_{V1/2}$ ,  $E_{VD}$ ) von Interesse und sollten – falls erforderlich - im Prozess A bei der Rezepturmittlung im Labor mit untersucht und ggf. im Prozess C überprüft werden.

Von zentralerem Interesse ist die Beurteilung der Wiederaushubfähigkeit, die mittels einaxialer Druckfestigkeitsuntersuchungen nach DIN 18136 und Beurteilung der Ergebnisse gemäß Abschnitt 3.6 des AGFW-Forschungsprojekts 03ET1063 erfolgt. Die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt zeigen, dass beim Einsatz von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau bereits bei den Eignungsuntersuchungen im Prozess A, ZFSV-Rezepturen mit einaxialen Druckfestigkeiten  $q_{u,56d} \leq 0,3 \text{ N/mm}^2$  nach 56 d  $f_z(7 - 56d) < 0,10 \text{ N/mm}^2$  eingesetzt werden sollten, womit nach H ZFSV 2012 langfristige Wiederaushubfähigkeit zu erwarten ist.

## 3. Prüfungen

Für detaillierte Beschreibungen der Prüfversuche mit ihren Randbedingungen und Anpassungen wird auf Abschnitt 3 des AGFW-Forschungsprojekts 03ET1063 verwiesen.

# Leistungsverzeichnis

Leistungsbeschreibung



Projekt

**LV-Text "ZFSV" für KMR**

## Anlage 16

Leistung (LV)

**01**

**Positionstexte für "ZFSV" für KMR**

MwSt.

**19,00 %**

Währung

**EUR**

Seiten ohne Anlage(n)

**Seiten: 6**

AGFW "ZFSV"

15.05.2017 - Seite 1

# Inhaltsverzeichnis

LV-Text "ZFSV" für KMR

<b>01</b>	<b>LV</b>	<b>Positionstexte für "ZFSV" für KMR</b>	
Nr.		Bezeichnung	Seite
		Deckblatt des Leistungsverzeichnisses	1
<b>01</b>	<b>Titel</b>	<b>Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR</b>	<b>3</b>
		<b>Zusammenfassung der Gliederungspunkte</b>	<b>6</b>

# Leistungsverzeichnis

LV-Text "ZFSV" für KMR

<b>01</b>	<b>LV</b>	<b>Positionstexte für "ZFSV" für KMR</b>		
01	Titel	Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR		
Nr.	Leistungsbeschreibung	Menge/ Einh.	Preis (EP)	Gesamt (GP)
<b>01</b>	<b>Titel Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR</b>			
	<p><b>Vorbemerkungen</b></p> <p>Die in den "Hinweisen für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) im Erdbau" (H ZFSV 2012) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) genannten Qualitätsanforderungen sowie die in Anlage 15 des AGFW-Forschungsprojektes "Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung in Gräben und Haubenkanälen (FKZ 03ET1063)" genannten, fernwärmespezifischen Anpassungen und Ergänzungen sind einzuhalten.</p> <p>Produkt '.....'</p> <p>Hersteller '.....'</p> <p>Komponenten '.....'</p> <p>Die Umweltverträglichkeit des in den Gräben einzugießenden Produkts ist darzustellen.</p> <p>Der Bieter muss eine vollständige Verfahrensbeschreibung von der Eignungsprüfung bis zur Inbetriebnahme der Fernwärmeleitung einschließlich aller technischen und zeitlichen Abhängigkeiten für Qualitätssicherungszwecke vorlegen.</p> <p>Die Ergebnisse der Eignungsprüfung und die Prüfprotokolle der Eigenüberwachung sind dem Auftraggeber vorzulegen.</p> <p>Bieter müssen mit Angebotsabgabe und während der Werkleistung die erforderliche Qualifikation (Fachkunde, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit) nachweisen.</p>			
<b>01.1</b>	<p><b>ZFSV herstellen, liefern und einbauen</b></p> <p>ZFSV gemäß im Vorfeld durchgeführter Eignungstests und erstellter Rezeptur nach der in den Vorbemerkungen genannten Verfahrensbeschreibung herstellen, mit Fahrmischer auf die Baustelle liefern und in den Leitungsgräben einbringen.</p> <p>Die Position umfasst den Prozess der Herstellung des ZFSV mittels Dosieranlage unter Zugabe der verschiedenen Zuschlagstoffe wie z. B. Zement, Wasser und Tonmineralien unter Einhaltung der verschiedenen Qualitätsnachweise. Erforderliche Qualitätsnachweise wie das Erfassen des Ausbreitmaßes und Nachweis der Dehnungsbehinderung an kleinteiligen Durchschiebeversuchen sind in die Position mit einzurechnen.</p> <p>Die Gestaltung der Auftriebssicherungen ist im Vorfeld im Rahmen der Verfahrensbeschreibung statisch nachzuweisen</p>			
	- Fortsetzung auf nächster Seite -			Übertrag: .....

# Leistungsverzeichnis

LV-Text "ZFSV" für KMR

01	LV	Positionstexte für "ZFSV" für KMR		
01	Titel	Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR		
Nr.	Leistungsbeschreibung	Menge/ Einh.	Preis (EP)	Gesamt (GP)
	<p>und mit dem Auftraggeber abzustimmen. Die Auftriebssicherung darf erst nach Zustimmung des Auftraggebers hergestellt werden.</p> <p>Das Zwischenlagern der Auftriebssicherungen sowie das mehrmalige Umsetzen wird nicht separat vergütet.</p> <p>In die Position mit einzurechnen sind alle erforderlichen Nebenleistungen wie z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle erforderlichen Lade- und Transportarbeiten</li> <li>• Einbau von Stirnplatten oder Sandsättel beim Verfüllen</li> <li>• Einbau, Lagern und Umsetzen von Auftriebssicherungen</li> <li>• Verwendung eventuell erforderlicher Verlängerungsstücke am Fahrmischer als Einbauhilfe</li> <li>• Eigen- und Fremdüberwachung</li> <li>• Herstellung von Rückstellproben.</li> </ul> <p>Folgende Parameter müssen eingehalten werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• für DN ____, PE-Mantelrohrdurchmesser ____ mm <ul style="list-style-type: none"> <li>- minimaler Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr: ____ kN/m Dies entspricht einer Dehnungsbehinderung von 0,01 MPa.</li> <li>- maximaler Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr: ____ kN/m Dies entspricht einer Dehnungsbehinderung von 0,02 MPa.</li> <li>- maximaler Dehnungswiderstand zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr beim ersten Anfahren: ____ kN/m Dies entspricht einer Dehnungsbehinderung von 0,05 MPa.</li> </ul> </li> </ul>			Übertrag: .....
		<b>m3</b>	EP.....	GP .....
<b>01.2</b>	<p><b>Durchschieberversuch mit einem Rohrstück</b></p> <p>Durchführen eines Durchschieberversuchs in situ in einem Graben oder alternativ als Großversuch im Labor mit einem Rohrstück</p> <p>DN ____, PE-Mantelrohrdurchmesser ____ mm</p> <p>Die Länge des mit ZFSV und repräsentativer Überdeckungshöhe verfüllten Rohrbereiches soll dabei mindestens dem 10-fachen des PE-Mantelrohrdurchmessers entsprechen. Das Rohr ist in 4 Zyklen mit einem Verschiebeweg von</p> <p>- Fortsetzung auf nächster Seite -</p>			Übertrag: .....

# Leistungsverzeichnis

LV-Text "ZFSV" für KMR

<b>01</b>	<b>LV</b>	<b>Positionstexte für "ZFSV" für KMR</b>		
01	Titel	Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR		
Nr.	Leistungsbeschreibung	Menge/ Einh.	Preis (EP)	Gesamt (GP)
	<p>0 mm - 50 mm - 0 mm mit einer Verschiebegeschwindigkeit <math>\leq 0,10</math> mm/Minute zu verschieben. Der Nachweis erfolgt durch Vorlage eines Prüfprotokolls eines für solche Versuche geeigneten Prüfinstituts, z. B. OTH.R, Labor für Geotechnik.</p> <p>Die Position umfasst die Herstellung des Feld- oder Laborversuchs (z. B. Graben, Rohr, ZFSV-Verguss, etc.), eine Abbindezeit von mindestens 28 Tagen, die Auswertung des Versuchs durch ein für solche Versuche geeignetes Prüfinstitut inkl. Prüfbericht und die Demontage der Versuchseinrichtung.</p> <p>Sofern ein Übereinstimmungsnachweis vorgelegt wird, kann das Ergebnis eines vorhandenen Durchschiebeversuchs mit vergleichbaren Randbedingungen anstelle des in dieser Position verlangten Großversuchs vorgelegt werden.</p>		Übertrag: .....	
		<b>St</b>	EP.....	GP .....
<b>Summe Titel 01</b>				
Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) für KMR, Netto: .....				

# LV-Zusammenfassung

LV-Text "ZFSV" für KMR

01	LV	Positionstexte für "ZFSV" für KMR		
Nr.		Bezeichnung	Seite	Gesamt in EUR
01	Titel	Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbausto...	3	.....
<b>Summe LV 01 Positionstexte für "ZFSV" für KMR</b>				
		<b>Angebotssumme, Netto:</b>	EUR	.....
	Stempel	zzgl. MwSt. (19,0 %):	EUR	.....
		<b><u>Angebotssumme, Brutto:</u></b>	EUR	<u>.....</u>
..... Anbieter - Unterschrift				