

Nachhaltige
Sektordurchdringung von
ZFSV als Bettungsmaterial im
Fernwärmeleitungsbau

Herausgeber:

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
Stresemannallee 30 | D-60596 Frankfurt am Main
E-Mail: h.huth@agfw.de | Internet: www.agfw.de

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: bestellung@agfw.de | Internet: www.agfw.de

Verkaufspreis:

EUR 15,00 zzgl. MwSt. für AGFW-Mitglieder
EUR 30,00 zzgl. MwSt. für Nichtmitglieder
Hochschulen und Lehre: Preis auf Anfrage

ISBN: 3-89999-079-X

Hinweis:

Beim Inhalt der vorliegenden Publikation handelt es sich um den Abschlussbericht eines vom AGFW e.V. beauftragten Forschungsvorhabens. 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.

November 2019

© AGFW, Frankfurt am Main

Vorwort

Der Einsatz von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllmaterialien (ZFSV) im Rohrgraben ist für den Fernwärmeleitungsbau vielversprechend. Der Rückblick zeigt, dass entsprechende Verfüllmaterialien seit Ende der 1990er Jahre verfügbar sind und deren Einsatz vereinzelt für den Fernwärmeleitungsbau geprüft wurde. Dabei wurde in der Branche festgestellt, dass im Vergleich zur konventionellen Verlegung mit Sand bei ZFSV eine aufwändigere Qualitätssicherung erforderlich ist und auch offene Fragen für die Berechnung einer entsprechenden Fernwärme-Rohrstatik bestehen. Aus diesen Gründen wurden in der jüngeren Vergangenheit zwei große Forschungsverbundvorhaben durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Einige wichtige, grundlegende Fragestellungen konnten in den Vorhaben bearbeitet werden, allerdings konnten nicht alle Ergebnisse übergreifend für die Branche nutzbar gemacht werden. Daher hat der AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. die HafenCity Universität Hamburg (HCU) unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich beauftragt, die Ergebnisse aus aktuellen Forschungsvorhaben, den Stand des Wissens zum Thema insgesamt und Praxiserfahrungen sowie Anforderungen zu sichten und diesen Wissensstand in einen Entwurf für ein AGFW Merkblatt zu überführen. Auf Grundlage der Recherchen wurde ein einfacher Berechnungsansatz vorgeschlagen, mit dem eine Spannungsermittlung für eine Fernwärmerohrstatik im ZFSV grundsätzlich möglich ist. Hierfür wurde ein Ansatz der klassischen Bruchmechanik verwendet, wie er im Prinzip auch bereits für Sand in der AGFW FW 401 T10 enthalten ist. Daher wird derzeit davon ausgegangen, dass sich die Vereinfachungen der Modellbildung in einer ähnlichen Größenordnung befinden, wie es die Branche bisher gewohnt ist.

Dieser Berechnungsvorschlag wird mit der vorliegenden Veröffentlichung der Fachwelt unterbreitet. Es gilt nun, diesen Berechnungsvorschlag in der Praxis zu evaluieren und die Anwendungsgrenzen festzustellen. Auch der Vergleich mit genaueren computergestützten Ansätzen wird hilfreich sein, um den gewählten Berechnungsansatz weiter zu schärfen und zu einem soliden, praxisorientierten Werkzeug weiterzuentwickeln.

In diesem Sinne wünschen wir eine anregende Lektüre der nachfolgenden Seiten.

W. Lutsch

(Geschäftsführer AGFW e. V.)

Dr. H. Huther

(Forschung und Entwicklung)

Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau

Infrastructural Engineering

Abschlussbericht

Im Auftrag von:

*AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
Stresemannallee 30
60596 Frankfurt am Main*

Berichtsnr.: 2019-AF02-ZFSV

Projekt: C-5-UNT-BIW-18-007

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

Dr.-Ing. Gersena Banushi
M.Sc. Lucia Doyle
Dipl.-Ing. Mgr. Maria Grajcar, MA

Hamburg, 25.06.2019

HafenCity Universität Hamburg
Überseecallee 16
D-20457 Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

Tel +49 (0)40 – 4 28 27-5700

www.hcu-hamburg.de

Dieser Bericht ist urheberrechtlich geschützt. Er darf, auch auszugsweise, nur in Absprache mit dem Autor/den Autoren vervielfältigt oder veröffentlicht werden. Alle Angaben dieses Berichts sind nach bestem Gewissen unter Anwendung aller gebotenen Sorgfalt erstellt worden. Trotzdem kann von dem Autor/den Autoren keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Inhalt

1	Aufgabenstellung	5
2	Einleitung	5
3	Zusammenstellung der vorliegenden Erfahrungen und Identifikation der für einen sicheren Ausbau der Fernwärme relevanten Parameter, Abbaupotenzial von Hemmnissen	7
3.1	Zusammenstellung der vorliegenden Erfahrungen	7
3.1.1	Historische Zusammenfassung	7
3.1.2	Stand der Technik aus dem Straßenbau und der Geotechnik	8
3.1.3	Verwendung von Recyclingbaustoffen und ZFSV vor dem Hintergrund des Kreislaufwirtschaftsgesetzes	8
3.1.4	Axiale Interaktion zwischen Fernwärmerohren und ZFSV	9
3.1.5	Ersatzreibungskoeffizient	13
3.1.6	Auftrieb	13
3.1.7	Erddruck in ZFSV	14
3.2	Identifikation der für einen sicheren Ausbau der Fernwärme relevanten Parameter	15
3.3	Abbaupotenzial von Hemmnissen	16
3.3.1	Normungsarbeit	16
3.3.2	Erfassung des lateralen Bettungsreaktionsdrucks im ZFSV	17
3.3.3	Dehnpolster	18
3.3.4	Sichtung der Berechnungsmethoden U.S.-amerikanischer Richtlinien	18
3.3.5	Abfahren der Leitung und Wechsellasten	24
3.3.6	Gemeinsame Branchenpräsenz von Versorgungsunternehmen und ZFSV-Herstellern	26
3.3.7	Absenkung der Betriebstemperatur	26
3.3.8	Rohrverbindungen in ZFSV	26
3.3.9	Anpassung von Software-Werkzeugen für die Verlegung in ZFSV	27
4	Erarbeitung eines Entwurfs für ein AGFW Merkblatt	27
5	Einbindung von Ingenieurbüros und den Erfahrungen aus Österreich	27
5.1	Einbindung von Ingenieurbüros	27
5.2	Erfahrungen aus Österreich	28
6	Berechnung einfacher Systeme	31
6.1	Methodik und Systembeschreibung	31
6.2	Numerische Untersuchungen mit ABAQUS	32
6.3	Numerische Untersuchungen mit ROHR2	33
6.4	Rohr-Boden-Interaktion für ZFSV und Sand	33
6.5	Ergebnisse der numerischen Berechnung	35
7	Zusammenfassung und Ausblick	40
8	Literaturverzeichnis	41
8.1	Standards, Normen und Regelwerke	41
8.2	Literaturverweise	42
9	Anhang A	45
9.1	Versuchsaufbau ONR/FW 110A, Rammsondierung	45
9.2	Versuchsaufbau ONR/FW 110A, Interaktion Rohrleitung - SVM	46
9.3	Tragfähigkeitskurven für kohäsive Böden nach J.B. Hansen (1961) und prEN13941:2015	47
9.4	Körnungsbereiche für die Verfestigung und Verbesserung von Böden mit verschiedenen Bindemitteln nach ZTV-E Kapitel 11 [N6]	48
9.5	Geeignete Körnungsbereiche zum Einspülen nach Hirschberger [L28]	48
10	Anhang B, Experteninterviews	49
11	Anhang C, Entwurf AGFW Merkblätter	50

1 Aufgabenstellung

Die HafenCity Universität führt im Zeitraum vom 01.04.2018 bis 31.03.2019 einen Forschungs- und Entwicklungsauftrag im Arbeitsgebiet Technisches Infrastrukturmanagement für den AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich durch. Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde mit dem Schreiben vom 13.03.2019 eine kostenneutrale Projektverlängerung genehmigt. Ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe ist die Erstellung eines Entwurfs für ein AGFW-Merkblatt. Wie sich in den Recherchen gezeigt hat, ist eine Entwurfserstellung eines Merkblass ohne umfangreiche Voruntersuchungen nicht möglich. Zudem wurden seitens des Auftraggebers verschiedene Zusatzinformationen erwünscht.

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der Voruntersuchung und enthält die Zusatzinformationen. Weiterhin wurden Experteninterviews durchgeführt, die der Identifikation weiterer zu lösender Fragestellungen für die nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Betreuungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau dienen. Die Experteninterviews und der Entwurf für ein Merkblatt sind in Anhang B und C diesem Bericht angehängt.

2 Einleitung

Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe=ZFSV sind nach [N1] Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen, die insbesondere in schwer zugänglichen oder schwer verdichtbaren Bereichen zur Verfüllung verwendet werden. Sie fließen ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie, allein unter dem Einfluss der Schwerkraft, und füllen Hohl- und Zwischenräume vollständig aus. Die Verfüllbaustoffe weisen nach einem definierten Zeitraum den Anwendungen entsprechende mechanische und physikalische Eigenschaften auf und gewährleisten diese langfristig. Insbesondere im Kanal- und Leitungsbau ist die Wiederaushubfähigkeit eine wesentliche Eigenschaft. Für eine ausführliche Beschreibung der mechanischen Eigenschaften und Begrifflichkeiten siehe auf das Hinweisblatt H-ZFSV der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) verwiesen [N1].

Im Gegensatz zu „kalten“ Rohren sind spezielle Anforderungen an Verfüllungsmaterialien für warmgehende Fernwärmerohre in den technischen Normen und dem AGFW-Regelwerk definiert [N4, Teil 12]. Hierin sind Sande insbesondere im Bereich um den Rohrumfang, der sogenannten Leitungszone, zu verwenden. In der konventionellen Fernwärmestatik mit Sand für erdverlegte Fernwärmerohre hängen alle Dehnungen, Verschiebungen, Spannungen und damit auch alle Schnittkräfte von der wirkenden Reibungskraft am Mantel ab. In unterschiedlichen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich ZFSV grundsätzlich anders verhält als ein nichtbindiger Sandboden. Im ZFSV wirken neben inneren Reibungskräften auch **Kohäsion** und im Kontakt mit anderen Materialien **Adhäsion**.

Kohäsionskräfte beschreiben allgemein den inneren Zusammenhalt von Stoffen. Sie basieren im Grunde auf den van-der-Waals Kräften. Diese lassen sich als Wechselwirkung zwischen Molekülen und Atomen verstehen und beschreiben allgemein physikalische Adsorptionsvorgänge [L5]. Adhäsion bestimmt den Zusammenhalt zweier Stoffe aneinander auf molekularer Ebene. Sie kann sowohl zwischen festen Stoffen, als auch zwischen flüssig- oder gasförmigen Stoffen auftreten, sowie gemischte Konstellationen ebendieser. Die Adhäsion wird ebenfalls durch die van-der-Waals Kräfte hervorgerufen. Diese wirken zwischen Oberflächen als sog. Grenzflächeneffekt [L5].

Die Theorie hinter den Adhäsionskräften setzt sich zusammen aus der mechanischen Adhäsion und der spezifischen Adhäsion. Die spezifische Adhäsion beinhaltet die Polarisierungstheorie, die elektrostatische Theorie, die Diffusionstheorie und die Adsorptions- bzw. Benetzungstheorie [L6]. Mechanisch wirken Adhäsionskräfte vorwiegend durch formschlüssige Verankerung. Diese Art der Adhäsion beruht auf dem Prinzip des Eindringens eines Stoffes in die Poren, Kapillare und/oder

Hinterschneidungen eines zweiten Fügestoffes. Es ist jedoch vorauszusetzen, dass ein Stoff eine ausreichend raue Oberfläche hat und der andere ausreichend kleine Bestandteile, welche sich in der Grenzfläche verankern können, besitzt [L6]. Dies ist bei der relativ glatten Oberfläche von KMR nur bedingt gegeben. Weiterhin wirkt Adhäsion mechanisch durch Kapillarkräfte, sobald Feuchtigkeit im/ oder am Stoff anzutreffen ist. Selbst bei geringsten Benetzungen mit Wasser wirken verhältnismäßig große Adhäsionskräfte [L7].

Als Adhäsionskraft wird die Kraft bezeichnet, welche nötig ist um zwei adhärierende Stoffe voneinander zu trennen. Sie kann sowohl normal als auch tangential zur Kontaktfläche wirken.

Die Beherrschung der wirkenden Kohäsions- und Adhäsionskräfte ist für eine Fernwärmestatik im ZFSV unbedingt erforderlich. Durch eine verlässliche Qualitätssicherung müssen charakteristische Berechnungswerte hierfür gegeben sein.

Da die Verfüllbaustoffe fließfähig und selbstverdichtend sind, entfallen die mechanischen Verdichtungsvorgänge und die damit zwangsläufig verbundenen Erschütterungen, z. B. durch Vibration und der zeitliche Aufwand hierfür. Die Beanspruchungen der Leitungen durch Einbau- und Verdichtungsvorgänge wird deutlich reduziert bzw. vollständig vermieden. Insbesondere bei schwierigen, beengten Verfüllsituationen sind ZFSV vorzugsweise einzusetzen und gewähren weitgehende Hohlraum- und Setzungsfreiheit. Im Gegensatz dazu muss der ZFSV aushärten beziehungsweise fixieren und es ergibt sich ein zeitabhängiges Materialverhalten.

Erdstoffe sind in der Regel heterogene Gemische. ZFSV sind Stoffgemische aus einem Erdstoff als Grundmaterial, Zugabewasser sowie hydraulischen und/oder schichtsilikatischen Zusatzstoffen. Im Gegensatz zu Sand finden im ZFSV chemische und physikalische Reaktionen statt. Die chemischen und physikalischen Reaktionen bewirken einen Übergang von frisch-ZFSV zu fest-ZFSV, die gleichartig wie bei Beton, in drei Phasen zu unterscheiden sind. Qualitativ nimmt die Fließfähigkeit beständig ab (Ansteifen), geht schließlich verloren (Erstarren) und die mechanische Belastbarkeit nimmt weiter zu (Erhärten) [L1]. ZFSV sind im frischen Zustand Dispersionen, welche mit Blick auf die Kornfraktionen eine Mehlkornsuspension enthält. In der Mehlkornsuspension finden die Reaktionen statt. Die Mehlkornsuspension hält das Grundmaterial in Schwebe.

In [L1] wird die hydraulisch bindende Reaktion mit Zement und die hydraulisch bindende Reaktion kombiniert mit dem schichtsilikatischen Zusatzstoff Bentonit unterschieden.

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, d.h., ein fein gemahlener anorganischer Stoff, der, mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt. Die hydraulische Erhärtung beruht vorwiegend auf der Hydratation von Calcium-Silikaten, jedoch können auch andere chemische Verbindungen, wie z.B. Aluminate an der Erhärtung beteiligt sein (DIN EN 197-1). Es gibt fünf Hauptzementarten, wovon der Portlandzement (CEM I) die wichtigste Zementart darstellt und für die nachfolgenden Erläuterungen als Referenz verwendet wird. Portlandzementklinker ist der Hauptbestandteil des CEM I. Der Portlandzementklinker umfasst vier Hauptklinkerphasen. Es handelt sich um Oxide unter durchgängiger Beteiligung von Calcium sowie Silicium, Aluminium und Eisen. Alle Phasen können Wasser aufnehmen. Das abgegebene Calciumoxid bildet mit Wasser Calciumhydroxid. Der gesamte Vorgang wird als Hydratation der Klinkerphasen bezeichnet. Mit der allgemeinen Bezeichnung „Zementhydratation“ werden neben den oben beschriebenen Vorgängen im Sinne der Anlagerung von Wasser auch eine weitere Vielzahl von Reaktionen, die bei der Zugabe und Vermischung von Zement und Wasser stattfinden, adressiert und zusammengefasst. Dazu gehören zum Beispiel Kristallisationsprozesse entstehender Verbindungen infolge geringer Löslichkeitsprodukte. Die Zementhydratation führt zu Ansteifen, Erstarren und Erhärten. Nach [L1] ist der Ablauf direkt auf den ZFSV mit Zementzugabe übertragbar.

Bentonit ist ein Gemisch aus Tonmineralien. Das Hauptmineral ist das Montmorillonit. Kennzeichnende Eigenschaften sind unter anderem das Wasseraufnahmevermögen, die von der Wasseraufnahme abhängige Bildsamkeit (Konsistenz), Quellenfähigkeit, Adsorptionskapazität für eine

Vielzahl von anorganischen und organischen Stoffen und Thixotropie [L1]. Die Tonminerale bilden Hydrate. Man spricht von der Hydratation der Tonminerale aber auch der Zwischenschichtkationen. Der Hydrationsvorgang erhöht den Platzbedarf im Zwischenschichtraum. Es kommt zur Schichtaufweitung oder auch Quellung. Die Adsorptionskapazität liefert bindende Eigenschaften des Bentonits.

Die in vielen Parametern variable ZFSV-Rezeptur ermöglicht einen auf die Erfordernisse des Anwendungsfalls optimal zugeschnittenen Baustoff [N1]. Daher sollte ZFSV auch im Fernwärmeleitungsbau eingesetzt werden und die Vorteile dieser Bautechnik auch hier genutzt werden.

Die statischen Besonderheiten und die noch bestehenden Hemmnisse, welche für eine nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau erfasst und überwunden werden müssen, werden nachfolgend größtenteils aufgeführt und diskutiert.

3 Zusammenstellung der vorliegenden Erfahrungen und Identifikation der für einen sicheren Ausbau der Fernwärme relevanten Parameter, Abbaupotenzial von Hemmnissen

3.1 Zusammenstellung der vorliegenden Erfahrungen

3.1.1 Historische Zusammenfassung

Die Verlegung von KMR in zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) wird seit Ende der 1990er Jahre in der Fernwärmebranche untersucht und angewendet. Dabei erangelte es über fast 20 Jahre an umfangreichen, wissenschaftlich belastbaren Versuchsreihen, mit denen das Interaktionsverhalten zwischen KMR und ZFSV mit ausreichender Genauigkeit so untersucht wurde, dass die Verwendung von ZFSV im Fernwärmerohrgraben zweifelsfrei ermöglicht wurde. Daher waren in diesem Zeitraum die Einsatzbeispiele selten und es wurden positive und negative Erfahrungen mit dieser Verlegetechnologie im Fernwärmeleitungsbau gemacht.

Die Entwicklung der letzten Jahrzehnte kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Entwicklung, Einsatz und Voruntersuchungen von Weimarer Bodenmörtel (WBM) am FITR e.V. (jetzt IAB) und dem FFI in Hannover e.V. 1998 in eine AiF-geförderten Verbundvorhaben FV 11260B [L9], im Jahre 2006 wurden in Mannheim die Entwicklungen mit WBM auch in Feldversuchen weitergeführt [L22].
- IEA-DHC Verbundforschung 1999, Aus Versuchen in Graz (Österreich), Göteborg (Schweden) und Mannheim (Deutschland) werden Reibungsbeiwerte für ZFSV und KMR in der Bandbreite: $\mu = 0,32 - 2,06$ zurückgerechnet [L10]. Die für die Beschreibung des bodenmechanischen Verhaltens wichtige Scherfestigkeitskomponente Adhäsion bleibt unberücksichtigt. Daher ergaben sich mehrfach Werte über 1,0. Eine Anwendung dieser Werte und des Berechnungsverfahrens wird nicht empfohlen (s. Abschnitt 3.1.5).
- Hamburg, Vattenfall 2004, am Kongresszentrum in Hamburg wird ein Fernwärmedämmerring eingebaut und die Rohr-Bettungsmaterial-Interaktion wird messtechnisch überwacht [L11].
- Wolfsburg, 2005, in Wolfsburg wird fließfähiges Verfüllmaterial auf einer Länge von 40m eingebracht und die Verschiebungen werden bei Erwärmung beobachtet. Die Ergebnisse und genauen Randbedingungen des Feldversuches sind nach derzeitigem Kenntnisstand wenig dokumentiert und bisher unveröffentlicht.
- Hannover energy, 2006, zwischen zwei Schächten in der Clemensstraße und Marstallbrücke wurden Fernwärmeleitungen in fließfähigen Verfüllmaterial installiert. Gemessen wurden Verschiebewege und Betriebstemperaturen. Die Ergebnisse und genauen Randbedingungen des Feldversuches sind nach derzeitigem Kenntnisstand wenig dokumentiert und bisher unveröffentlicht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in rund 20 Jahren nur punktuelle Untersuchungen durchgeführt wurden und keine belastbaren Versuchsreihen entwickelt und durchgeführt wurden, durch die eine eindeutige Machbarkeit des Einsatzes von ZFSV in der Fernwärme nachgewiesen wurde.

Da die ZFSV verschiedene Vorteile, wie zum Beispiel beim Personaleinsatz oder beim Baustellenablauf bieten, werden Sie bei der Verlegung von „kalten“ Rohren vermehrt eingesetzt. Dies führte zu einer Verbreitung von ZFSV und vermehrter fachlichen Auseinandersetzung mit dieser Technologie im Rohrleitungsbau. Daher wurde auch die systematische Entwicklung der Bautechnik für die Verwendung von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau in den 2010er Jahren wieder aufgegriffen. Die wichtigsten Fragen für warmgehende Rohre in ZFV wurden auf diese Weise beantwortet [L2, L3]. Besonders wichtig für die rechnerische Erfassung des Tragverhaltens von Fernwärmeleitungen ist das Wissen um das Interaktionsverhalten zwischen der Rohrleitung (KMR) und dem Bettungsmaterial in axialer und lateraler Richtung. Ausführliche Untersuchungen sind bisher zum axialen Tragverhalten zu verzeichnen. Zu Verschiebungen von Rohren in lateraler Richtung im ZFSV ist immer noch wenig bekannt. Dies kann als ein Hemmnis für den Fernwärmeausbau mit ZFSV angesehen werden. Genauere Untersuchungen hierzu sind zu empfehlen, ein erster Berechnungsansatz ist im Kapitel 5.3 Abbau von Hemmnissen dargestellt.

3.1.2 Stand der Technik aus dem Straßenbau und der Geotechnik

Für die Herstellung von ZFSV werden Erdstoffe mit Wasser, hydraulischen Bindemitteln und Additiven gemischt. Daher besteht eine Ähnlichkeit zum Einsatz von Bindemitteln für die Bodenverfestigung und Bodenverbesserung. Diese Verfahren sind Stand der Technik und sind zum Beispiel in [L34] beschrieben und für den Straßenbau geregelt. Zum Einsatz kommen Kalk, Zement und bituminöse Bindemittel. Die Einsatzgebiete für die unterschiedlichen Bindemittel sind in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung eines Erdstoffs in Anhang 9.4 dargestellt.

Das Spülen und Einschlämmen von Erdstoffen ist ebenfalls Stand der Technik. Durch Spülen und Einschlämmen kann ein Wasser-Feststoff-Gemisch in Förderrohren transportiert und auf großen Flächen verteilt werden. Dieses Verfahren kommt bei flächigen Aufhöhungen zur Anwendung und eignet sich am besten für schluff- und kiesfreie Mittelsande. Siehe hierzu das Körnungsband in Anhang 9.5. Beim Einspülen von Sanden kann dabei eine Proctordichte von 95% und mehr erreicht werden. Im Rohrgraben werden nach ZTV-E und für den Oberbau nach ZTV-A [N5] höhere Verdichtungsgrade gefordert. Das Einspülen von Sanden in den Rohrgraben ist daher nur bedingt geeignet. Zur homogenen Zwickelverdichtung kommt es teilweise in der Leitungszone bis zur Rohrachse zur Anwendung.

Der Einsatz von ZFSV kann als Kombination beider Verfahren verstanden werden.

3.1.3 Verwendung von Recyclingbaustoffen und ZFSV vor dem Hintergrund des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

Die Endlichkeit natürlicher Ressourcen bedingt eine nachhaltige Materialverwendung. Im §6 des Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG vom 01.06.2012) wurde die Abfallhierarchie in der folgender Reihenfolge definiert: 1. Vermeidung, 2. Vorbereitung zur Wiederverwendung, 3. Recycling, 4. Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung, 5. Beseitigung.

Herstellung von ZFSV aus RC-Materialien als Liefermaterial wurde als Beispiel für bisherige Untersuchungen für die Schaffung positiver Präzedenzfälle und Eröffnung weiterer Anwendungen für RC-Baustoffe genannt [L29]. Aus der vier Komponenten von ZFSV: a) Zuschlag/Körnung, b) Bindemittel (Zement), c) Zusätze d) Wasser ist insbesondere der/die Zuschlag/Körnung als Basismaterial durch Recycling-Material ersetzbar.

Im Rahmen der Untersuchung „RC-Mix als Zuschlagstoff für zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV, „Flüssigboden“)“ wurde die Frage „Ist die Herstellung von ZFSV aus RC-Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften wie ZFSV aus natürlichen Körnungen möglich?“ mit folgendem Vorgehen beantwortet [L29]:

- a) Festlegen von Zielgrößen (Ausbreitmaß, Absetzmaß, Druckfestigkeiten $q_{u,min}, 7d$, $q_{u,max}, 28d$, $q_{u,max}, 56d$) für ZFSV aus RC-Materialien und aus natürlicher Körnung)
- b) Anpassen der Rezepturen für ZFSV aus RC-Materialien und natürlichen Körnungen, so dass Anforderungen an Fließfähigkeit und Volumenstabilität erfüllt werden
- c) Prüfung anhand einaxialer Druckversuche, ob festgelegte Druckfestigkeiten ($q_{u,min}, 7d$, $q_{u,max}, 28d$, $q_{u,max}, 56d$) eingehalten werden können.

Laut der der Untersuchung sind die RC-Materialien zur Herstellung von ZFSV prinzipiell geeignet, teilweise ist die Anpassung der Rezeptur wegen der zu niedrigen Festigkeitsentwicklung notwendig. Auf der anderen Seite wird der Einsatz von Recycling-Baustoffen in den Hinweisen für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZSFV) nur als bedingt geeignet beschrieben [N1]. Die bautechnischen Anforderungen bestehen hinsichtlich Plastizität (nach DIN 18122), Korngrößenverteilung (nach DIN 181123), Wassergehalt (nach DIN 18121) und stofflicher Zusammensetzung.

Die ZFSV können einen Beitrag zu den Zielen des KrWGs leisten, entweder durch das Ersetzen des Hauptmaterials durch Recycling-Materialien oder durch die direkte Wiederverwendung des Aushubs, entsprechend der Priorität Nr. 1 in der Abfallhierarchie – Vermeidung (der Abfälle). Beide mögliche Beiträge zur Erfüllung der Ziele des KrWGs können der festen Etablierung des ZFSVs als zertifiziertes und güteüberwachtes Liefermaterial für Hohlraumverfüllung, Rohrleitungsbettung, Rückverfüllung von Leitungs-/Kanalgräben dienen.

Auch der eingebaute ZFSV kann ausgehoben und als ZFSV wieder eingebaut werden. Durch das Aufnehmen werden die Vernadelungen der hydraulischen Bindung gebrochen und müssen für die Wiederverfüllung entsprechend neu mit Bindemitteln vermischt werden. Durch den Vorgang erhöht sich der Feinkornanteil, sodass gegebenenfalls die Rezeptur angepasst werden muss.

3.1.4 Axiale Interaktion zwischen Fernwärmerohren und ZFSV

Diesen Bericht einleitend wurde bereits darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung von ZFSV Kohäsionskräfte bzw. Adhäsionskräfte berücksichtigt werden müssen. Infolge der temperaturbedingten Ausdehnung der Fernwärmerohre werden Schubspannungen am Rohrmantel aktiviert. Diese Schubspannungen wirken an der Umfangsfläche axial und tangential zur Rohrachse. In der Fernwärmestatik werden die tangentialen Schubspannungen i.d.R. vernachlässigt und nur die axialen Schubspannungen werden berücksichtigt. Neben einem Reibungsanteil wirken Adhäsionsspannungen gemäß nachfolgender Gleichung:

$$\tau = \mu * \sigma + a \quad (1)$$

Mit

τ =Axiale Schubspannung

μ =Reibungskoeffizient

σ =Normalspannung

a =Adhäsion

Da bisher wenig über die drei Parameter μ , σ und a im Kontaktverhalten zwischen ZFSV und FW-Rohr bekannt ist, ist das einfachste Vorgehen die direkte Messung der Schubspannungen. Die Adhäsion kann in Schergeräten unterschiedlicher Art ermittelt werden. Eine Übersicht ist in [L16] enthalten.

Zusätzlich können für zylinderförmige Bauteile spezielle Versuchseinrichtungen verwendet werden. TAWFIQ und CALIENDO entwickelten 1993 den sogenannten Rod shear test, der in Abbildung 1 dargestellt ist [L12].

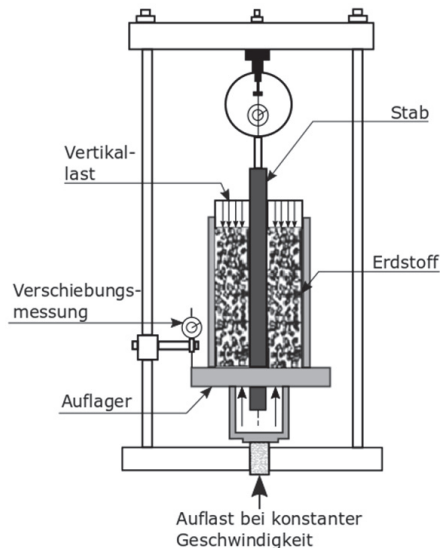


Abbildung 1. Stab-Scher-Test nach TAWFIQ et al. [L12]

Großversuche mit Fernwärmerohren wurden verschiedenen Forschungsvorhaben durchgeführt [L9, L10, L11]. Grundsätzlich kann die Schubspannung so direkt gemessen werden. Ähnliche Apparaturen wurden an der OTH.R entwickelt [L2]. Durch einige Verbesserungen konnte in [L2] die Schubspannung für verschiedene Überdeckungsspannungen direkt gemessen werden. Der Vergleich der im Kleinversuch gemessenen Scherspannungen [s. L2, Seite 88 ff.] mit gemessenen Scherspannungen im Großversuch [L2, S. 108] zeigt, dass die Werte im Kleinversuch etwa doppelt so groß sind, wie im Großversuch. Hierfür werden Maßstabeffekte als Ursache für sehr wahrscheinlich gehalten. Dies sollte noch genauer untersucht werden, damit Kleinversuche die Großversuche ersetzen können. Eine Umrechnungsmethode wurde bereits in [L2] vorgeschlagen.

Sofern die Randbedingungen im Versuch einem Projekt sehr nahe kommen, können die so gemessenen Schubspannungen direkt übertragen werden und in der FW-Statik angesetzt werden. Eine genaue Prüfung der Vergleichbarkeit ist notwendig.

Es wird daher empfohlen, dass ZFSV-Hersteller für verschiedene Spannungsniveaus den Wert der Schubspannung im Scherversuch vorab bestimmen und direkt angeben. Dabei ist zu beachten, dass die auftretenden Schubspannungen verschiebungsabhängig sind und auch von der Verschiebungsgeschwindigkeit abhängen.

Im dicht gelagerten Sand und auch in adhäsiven Böden bildet sich bei noch sehr kleinen Scherverformungen eine Spannungsspitze aus, die bei weiterer Verschiebung einen niedrigeren Wert annimmt, der sich nicht mehr ändert. Dieses grundsätzliche Verhalten wurde vielfach beobachtet und ist in der geotechnischen Fachliteratur verankert (s. Abbildung 2) [L26, L27].

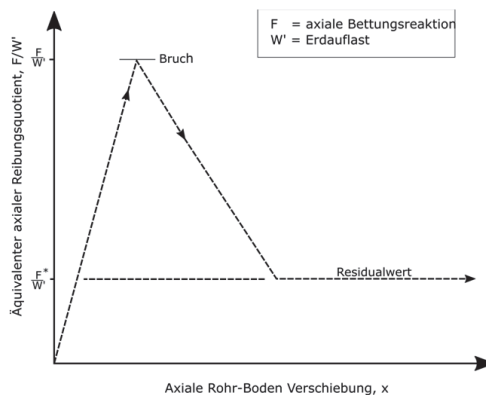


Abbildung 2. Äquivalenter axialer Reibungsquotient gegen axiale Rohr-Boden-Verschiebung modifiziert nach WHITE et al. [L26]

Ein entsprechendes Interaktionsverhalten konnte für ZFSV in [L2] bestätigt werden. Die Bruchspitze wird hierin als Adhäsionsspitze bezeichnet. Eine vergleichende Betrachtung zwischen den Erkenntnissen von z.B. [L26] und den Untersuchungen aus [L2] ist bisher nicht vorhanden. Eine Übertragung quantitativer Werte aus vergangenen Forschungsvorhaben auf ein Bauprojekt ohne genaue Prüfung wird nicht empfohlen. Vielmehr sollten die Werte in enger Zusammenarbeit mit den Fachplanern und vor allem den ZFSV-Herstellern auf Basis von gesonderten Versuchen vorgelegt werden.

Eine Bestimmung der Scherparameter über einen Triaxialversuch kann als zweitbeste Möglichkeit angesehen werden. Diese liefern für ein bestimmtes Spannungsniveau (hier Verlegetiefe) die Scherparameter ϕ' und c' .

Es kann dann näherungsweise eine Abschätzung des Reibungskoeffizienten erfolgen. Nach AGFW FW401 darf dies mit der nachfolgenden Formel geschehen [N4]:

$$\mu = \tan(2/3 \phi')$$

Die Adhäsion ist von der Kohäsion abhängig. Beide werden durch die Konsistenz, Porenanteil, Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Anteil Tonminerale etc. beeinflusst. Die Adhäsion kann abgeschätzt werden, wenn in bodenmechanischen Laborversuchen c' oder c_u ermittelt wurde. Nach POTYONDY [L17] gilt für einen kohäsiven Mischboden im Kontakt mit Stahl (rau)

$$a = 0,35 \cdot c'$$

für einen feinkörnigen Mischboden gibt POTYONDY

$$a = 0,25 \cdot c' \text{ (glatter Stahl)}$$

$$a = 0,5 \cdot c' \text{ (rauer Stahl)}$$

an. In Abhängigkeit der undrained Scherfestigkeit c_u gibt POTYONDY an:

$$a = 0,5 \cdot c_u \text{ (glatt)}$$

$$a = 0,8 \cdot c_u \text{ (rau)}$$

Ein allgemein bekannter Ansatz zur Korrelation der Scherfestigkeit des undrÄnirten Bodens c_u mit der Adhäsion a wird in DIN 1055 und DIN 4085 im Zusammenhang mit der Berechnung des Erddrucks gemacht. Danach darf bei einem unkonsolidierten, weichen, bindigen Boden unabhÄngig von der Rauigkeit der Wand statt der Wandreibung eine Adhäsion angesetzt werden. Die anzusetzende Adhäsion a betrÄgt die HÄlfte der undrÄnirten Scherfestigkeit.

$$a=0,5 \cdot c_u$$

In [L2] wurden fÄr die untersuchten ZFSV sowohl c' als auch c_u in Triaxialversuchen bestimmt. Hieraus lassen sich Wertebereiche fÄr Adhäsion im ZFSV ableiten.

Unter BerÄcksichtigung der nachfolgenden AusfÄhrungen, insbesondere zum Erddruck auf Rohre in Abschnitt 5.1.5, kann die Haltekraft im ZFSV basierend auf den vorliegenden Untersuchungen in AbhÄngigkeit der geotechnischen Bodenkennwerte ϕ' und c_u wie folgt abgeschätzt werden:

$$H_{ZFSV} \left[\frac{kN}{m} \right] = \int_0^{2\pi} \left(\tan \left(\frac{2}{3} \cdot \phi' \right) \cdot \gamma \cdot \left(H + \frac{D}{2} \right) + \frac{c_u}{2} \right) \cdot \frac{D}{2} d\theta \quad (2)$$

Mit

ϕ' =Innerer Reibungswinkel des ZFSV

H =Überdeckungshöhe

c_u =UndrÄnirten Scherfestigkeit

γ =Wichte des ZFSV

θ = Tangentiale Winkelkoordinate am Rohrquerschnitt

D =Rohraußendurchmesser

Sind nur die Scherparameter ϕ' und c' bekannt, kann auf Grundlage der Untersuchungen von POTYONDY (s.o.) die Adhäsion mit $a=(0,35+0,25)/2 \cdot c'=0,3 \cdot c'$ grob abgeschätzt werden und es gilt Gleichung 3.

$$H_{ZFSV} \left[\frac{kN}{m} \right] = \int_0^{2\pi} \left(\tan \left(\frac{2}{3} \cdot \phi' \right) \cdot \gamma \cdot \left(H + \frac{D}{2} \right) + 0,3 \cdot c' \right) \cdot \frac{D}{2} d\theta \quad (3)$$

Mit

ϕ' =Innerer Reibungswinkel des ZFSV

H =Überdeckungshöhe

c' =Kohäsion

γ =Wichte des ZFSV

θ = Tangentiale Winkelkoordinate am Rohrquerschnitt

Bei den oben genannten Formeln handelt es sich um pragmatische Ansätze, die Vereinfachungen enthalten. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass darin enthaltenen Unsicherheiten bei fachgerechter Bestimmung der Scherparameter nicht größer sind als die Unsicherheiten in den vorhandenen Regelwerken.

Ein weiteres Verfahren wird in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt.

3.1.5 Ersatzreibungskoeffizient

Die Berechnung eines Ersatzreibungskoeffizienten, um höhere Haltekräfte im ZFSV berechnen zu können wird in [L10] und [N7] vorgeschlagen. In beiden Veröffentlichungen wird Kohäsion oder Adhäsion nicht berücksichtigt. In [L10] wird μ wie folgt angegeben:

$$\mu = \frac{F_R}{\left(\frac{1+K_0}{2} \cdot \gamma \cdot H + \pi \cdot D + G\right)} \quad (4)$$

Mit

μ =Ersatzreibungskoeffizient

F_R =Gemessene Verschiebekraft

K_0 =Erddruckbeiwert, mit 0,5 angenommen

γ =Wichte des ZFSV

H =Überdeckung über Rohrscheitel

D =Rohraußendurchmesser

G =Gewichtskraft des Rohres

Das Vorgehen kann strenggenommen nur für nicht bindige Böden ohne Kohäsion angewendet werden. Daher ist das Verfahren für eine zutreffende Fernwärmerohrstatik mit ZFSV nicht geeignet. Insbesondere weil die Kohäsion bzw. Adhäsion spannungsunabhängig wirkt und damit der Reibungskoeffizient bei größeren Überdeckungen H immer kleiner wird. Weiterhin zeigt NEIDHART et al. in [L2], dass K_0 im ZFSV nicht mit 0,5 angesetzt werden kann. Dies geht auch aus Abschnitt 5.1.5 hervor. Es scheint, dass die obigen Gleichungen aufgrund der Vernachlässigung der Adhäsion mit zu vielen Unsicherheiten behaftet sind.

Gleichermaßen kann bei der Literatursichtung aber auch festgestellt werden, dass eine derartige Vereinfachung in Offshore-Leitungsbau durchaus üblich ist. Für bindige Böden gibt RANDOLPH et al. ein Ersatzreibungskoeffizient μ für bindige Böden und flache Rohrverlegung (Spannungsniveau 2kPa-300kPa) nach Gleichung 5 an.

$$\mu = 0,25 - 0,3 \cdot \log \left(\frac{\sigma'_n}{p_a} \right) \quad (5)$$

Mit

μ =Ersatzreibungskoeffizient

σ'_n =Effektive Normalspannung

p_a =Atmosphärischer Druck

Dabei handelt es sich um eine rein empirische Gleichung. Die Übertragbarkeit der Gleichung auf ZFSV ist dabei ungeklärt, könnte aber gegeben sein.

Aufgrund der Unsicherheiten sollte aber zunächst nicht mit einem Ersatzreibungskoeffizienten gerechnet werden.

3.1.6 Auftrieb

Im ZFSV muss der Auftrieb berücksichtigt werden, solange das Verfüllmaterial fließfähig ist. Daher ist eine wirksame Auftriebsicherung vorzusehen. Der Lastfall Auftrieb findet i.d.R. vor der Inbetriebnahme statt. Wird mit leerem Rohr gerechnet ergeben sich Werte auf der sicheren Seite auch für den Fall einer Vorspannung. Falls die Rohre vorgespannt sind müssen ggfs. mehrere Lastfälle bzw. Überlagerungen von Spannungszuständen aus Vorspannung und Auftrieb berücksichtigt werden.

Der Auftriebsnachweis für das kalte Rohr ist in [L2] beschrieben. Untersuchungen von PECHER et al. zeigen, dass beim Auftriebsfall, ZFSV ist noch flüssig, vertikal gerichtete Schubspannungen aufgrund der Scherfestigkeit der ZFSV-Suspension die Auftriebskraft mindern [L23]. Auf der sicheren Seite liegend können diese Kräfte für Nachweise der Tragfähigkeit vernachlässigt werden. Mit Blick auf die Verbesserung der Berechnung des Gesamtsystems ist zu bedenken, ob diese Kräfte, sofern sie z.B. mit der Viskositaet nach [L23] genau zu bestimmen sind, auch angesetzt werden sollten.

3.1.7 Erddruck in ZFSV

Um das Schergesetz im Kontaktbereich nach Gleichung 1 anwenden zu können, muss die Normalspannung σ bekannt sein. Im Falle des Rohres ist das der Erddruck auf den Rohrmantel. Bereits im Sand gibt es verschiedene Berechnungsansätze, mit denen die Kontaktnormalspannung auf das Rohr bestimmt werden kann [L21]. Für ZFSV sind keine nachhaltigen Untersuchungen oder Versuchsreihen bekannt, die Auskunft über den Erddruck auf Rohre im ZFSV geben. Zur besseren Marktdurchdringung wurde angestrebt ZFSV im DWA Regelwerk [N9] für Abwasserkanäle zu verankern. Dieses Regelwerk befindet sich seit 2000 in der Überarbeitung. Derzeit beschränken sich die Bemühungen noch darin den ZFSV als bodenähnlich in eine bestimmte Kategorie der Bodenklassen nach ATV A 127 einzuordnen. Dies erscheint für die Bemessung von Fernwärmeleitungen nicht ausreichend, da über die Berechnung der Beiwerte für den Siloerddruck und die Spannungskonzentrationsfaktoren im ZFSV keine Untersuchungen vorliegen.

Untersuchungen in [L2] zeigten, dass sehr geringe Seitendruckbeiwerte $k=\sigma_h/\sigma_v$ im ZFSV erreicht werden können. Es wurde teilweise ein sehr niedriger Erddruckbeiwert von $k=0,1$ durch Messungen im Versuch ermittelt. Nach den üblichen Denkmodellen für den Erddruck bedeutet dies eine zehnmal höhere Scheiteldruckkraft als im Kämpferbereich und damit eine sehr hohe zu erwartende Biegebelastung des Rohres.

Vor der Erhärtung wirkt der ZFSV wie eine Flüssigkeit. In diesem Falle ist $k=1,0$ und das angreifende Spannungsniveau ist $\sigma=\gamma\cdot(h+D/2)$. Dieser Zustand ist aber bei der Inbetriebnahme Vergangenheit und somit nicht mehr relevant. Es stellt sich daher die Frage wie sich der Erddruckbeiwert im ZFSV über die Zeit ändert. Diese Frage ist nicht abschließend geklärt.

Der Seitendruckbeiwert k kann aus der Elastizitätstheorie auch in Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl bestimmt werden. Es gilt:

$$k = \frac{1}{\nu - 1} \quad (6)$$

Für Beton kann die Querkontraktionszahl oder Querdehnzahl $\nu=0,2$ angenommen werden. Für Sand liegt ν im Bereich $0,2 - 0,45$. Der Seitendruckbeiwert liegt also bei Beton bei rd. $k_{\text{BET}}=0,25$ und bei Sand im Bereich $k_{\text{Sand}}=0,25-0,66$. Informationen zur Querdehnzahl von ZFSV konnten bisher nicht recherchiert werden.

These:

ZFSV kann aufgrund einer geringeren Festigkeit als Beton auch weniger Spannungen aufnehmen, weshalb mehr Spannungen umgelagert werden. k müsste also über 0,25 liegen.

Es wird daher empfohlen aus den vorhandenen Versuchen die Querdehnzahl abzuleiten und eine einfache Versuchsreihe durchzuführen in der Rohrovalisierungen beobachtet werden können. Es werden dünnwandige Rohrstücke in Glaskästen installiert und die Ovalisierung wird über die Zeit über die eine Glaswand beobachtet. Die Verformungen lassen sich heutzutage leicht berührungslos mit entsprechender Versuchstechnik beobachten [L25]. Lässt sich eine Ovalisierung feststellen, kann auch auf den Seitendruckbeiwert zurückgeschlossen werden und die Werte können mit den Werten aus den geotechnischen Versuchen verglichen werden.

Für die Fernwärmestatik ist die resultierende Erddruckkraft über den Rohrumfang von Bedeutung. Die exakte Verteilung ist weniger entscheidend, wie die quantitative Größe des Erddrucks. Daher wird empfohlen die resultierende Erddruckkraft, bis weitere Erkenntnisse vorliegen, mit dem Spannungsniveau am Rohrscheitel oder auf der sicheren Seite auf Niveau der Rohrachse zu rechnen. Es gilt dann der Ansatz nach MOSER et al. [L24]:

$$E_{res} = \pi * D * \gamma * (H + D/2) \quad (7)$$

E_{res} = Resultierende Erddruckkraft

3.2 Identifikation der für einen sicheren Ausbau der Fernwärme relevanten Parameter

Die Fernwärmerohrstatik wird unter verschiedenen Annahmen mit stark vereinfachten Modellen für Rohr, Dämmung und Boden durchgeführt. Daher sind teilweise hohe Reserven in den anzusetzenden Berechnungswerten enthalten. Alle Annahmen für das Interaktionsverhalten zwischen Rohr und Bettungsmaterial gelten derzeit für Sande, bzw. nicht bindige Böden. Die Anforderungen für das Bettungsmaterial sind daher teilweise insbesondere in der Leitungszone sehr streng und unterscheiden sich auch innerhalb der nationalen und internationalen Normen und Regelwerken.

In Europa wurde in der Norm EN 13941 eine Leitungszone von mindestens 0,1 m um den Rohrumfang festgelegt, diese ist mit körnigem Verfüllungsmaterial auszustatten [N2]. Es sind Sande vorgeschrieben, die Einzelkörner mit einem Durchmesser von bis zu 32 mm enthalten dürfen. Der Prozentsatz für Feinanteile mit einem Korndurchmesser von weniger als 0,1 mm darf 15% nicht überschreiten. Das Regelwerk AGFW FW401 [N4] begrenzt die maximale Korngröße des Verfüllmaterials in der Leitungszone auf 4 mm und fordert natürlichen Sand. Darüber hinaus sind Anforderungen bei der Prüfung der Fernwärmerohrverbindungen an das Verfüllmaterial in einer Korngrößenverteilungskurve nach EN 489 [N8] definiert. Die Anforderungen an das Bettungsmaterial nach EN 489 sind relativ eng gefasst, um auf europäischer Ebene für Muffentypprüfungen möglichst reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Mit einem Größtkorn von 4 mm steht die EN 489 in einem Widerspruch mit der EN 13941, die ein Größtkorn von 32 mm zulässt. Es wurde sich daher auf Normungsebene bemüht, das Größtkorn nach EN 13941 neu festzulegen.

Mit dem Einsatz von ZFSV wird signifikant von den Vorgaben abgewichen, da sich ZFSV grundsätzlich anders verhält, als Sand [s. auch L1, L2].

Daher hängt die Identifikation der relevanten Parameter von der Wahl der geeigneten Berechnungsansätze ab. Für die Rohrstatik von Relevanz sind primär die mechanischen Eigenschaften der Materialien. Es muss das

- Spannungs-Dehnungsverhalten,
- die Druckfestigkeit
- und die Scherfestigkeit

beschrieben werden. Im Fernwärmeleitungsbau mit ZFSV muss dabei auf die Abhängigkeit der Parameter von Temperatur und Zeit geachtet werden.

Die Druckfestigkeit wird für die leichte Wiederaushubfähigkeit im Bereich von 0,3 MPa eingestellt werden. Für die FW-Statik stehen zur Beschreibung der axialen Bettungsreaktionsdrücke die Scherfestigkeit und das Eigengewicht im Vordergrund. Die Werte sind in Tabelle 1 auf Grundlage verschiedener Quellen zusammengefasst.

Tabelle 1, Relevante Parameter für die Scherfestigkeit und die Wichte

Parameter	Konventionelle Verfüllung	Quelle
Scherfestigkeit		
Innere Reibung φ°	ZFSV 1: 38,7° ZFSV 2: 37,4° ZFSV 3: 27,9° ZFSV 4: 32,1°	[L2]
Innere Reibung φ°	FEM Rechenwerte nach Wagner ZFSV 1: 30° ZFSV 2: 5°	[L1, S.180]
Kohäsion c°	ZFSV 1: 37 kN/m ² ZFSV 2: 55,7 kN/m ² ZFSV 3: 76 kN/m ² ZFSV 4: 67,4 kN/m ²	[L2]
Kohäsion c°	FEM Rechenwerte nach Wagner ZFSV 1: 60 kN/m ² ZFSV 2: 85 kN/m ²	[L1, S.180]
Undränierte Scherfestigkeit c_u	ZFSV 1: 66,6 kN/m ² ZFSV 2: 123,5 kN/m ² ZFSV 3: 140,7 kN/m ² ZFSV 4: 174,7 kN/m ²	[L2]
Eigengewicht		
Trockendichte ρ	ZFSV 1: 933 37 kg/m ³ ZFSV 2: 1386 kg/m ³ ZFSV 3: 1544 kg/m ³ ZFSV 4: 956 kg/m ³	[L2]

Für die Verwendung eines rheologischen Modells mit in Reihe geschalteten Federn zur Bestimmung der lateralen Bettungsreaktionsdrücke ist auch die Steifigkeit des ZFSV von Bedeutung. Nach Abschnitt 5.3.2 kann das laterale Verschiebungsverhalten des ZFSV wahrscheinlich auch nur unter Verwendung des inneren Reibungswinkels grob abgeschätzt werden. Daher wird auf die Steifigkeit von ZFSV hier nicht weiter eingegangen.

3.3 Abbaupotenzial von Hemmnissen

3.3.1 Normungsarbeit

Als ein wesentliches Hemmnis für die weiterreichende Anwendung von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau kann die noch nicht ausreichend vorhandene Verankerung des Bettungsmaterials in den Normen und Regelwerken angesehen werden.

Ausführungen zum bautechnischen und rechnerischen Umgang mit ZFSV in der Fernwärme sollte in der EN13941 [N] und FW401 aufgenommen werden. Zudem sind die Anmerkungen zur Fernwärme in H-ZFSV zu präzisieren¹.

¹ Das Hinweisblatt H-ZFSV der FGSV wird derzeit zu einem Merkblatt weiterentwickelt. Die entsprechenden Abschnitte zum Fernwärmeleitungsbau werden überarbeitet und sind mit Rolf Besier (AGFW Technik und Normung) in Abstimmung. Prof. Weidlich vertritt den AGFW in dem entsprechenden Gremium. Ein Entwurf für ein AGFW Merkblatt ist Gegenstand des vorliegenden Projektes.

Insbesondere die Normungsarbeit auf EU-Ebene wird als wichtiger zukünftiger Schritt angesehen. Dies könnte durch die Mitarbeit von Rolf Besier (AGFW) und Prof. Weidlich (HCU) in der WG13 umgesetzt werden.

3.3.2 Erfassung des lateralen Bettungsreaktionsdrucks im ZFSV

Zum lateralen Bettungsreaktionsdruck in ZFSV ist wenig bekannt. Die auftretenden Phänomene sind weitgehend unbekannt und wurden bisher nicht systematisch untersucht. Wird ZFSV aber als bodenähnlicher Baustoff mit hohem Kohäsionsanteil angesehen (vgl. FEM Berechnungen von WAGNER [L1], S. 180 ff) bieten sich Möglichkeiten der Berechnung.

Zur Erfassung des lateralen Bettungsdrucks in der konventionellen Sandbettung sind die Berechnungsalgorithmen nach AGFW FW401 Teil 10 und EN13941 in Verwendung, die zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen. Ein entsprechender Vergleich ist in ACHMUS& WEIDLICH [L15] zu finden (s. Abbildung 3), der durch weitere Tragfähigkeitsuntersuchungen aus [L13, L14] ergänzt ist.

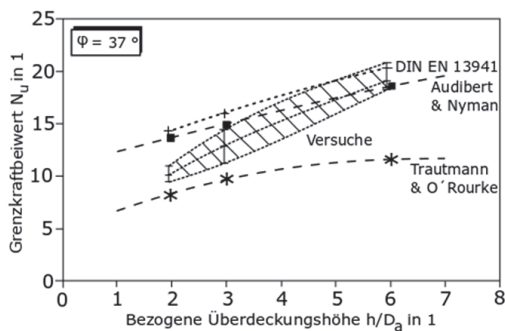


Abbildung 3. Vergleich Berechnungsalgorithmen zum Bettungsreaktionsdruck aus [L15]

Dabei basieren die Berechnungsalgorithmen nach AGFW FW401 Teil 10 auf Untersuchungen von AUDIBERT&NYMAN und TRAUTMAN&O'ROURKE, die Bettungswiderstände an lateral verschobenen Rohren untersuchten während der Berechnungsansatz nach EN13941 [N2] auf den Erkenntnissen von J.B. HANSEN von 1961 basieren. J.B. HANSEN entwickelte eine Widerstandslinie für Fundamente, die er später auf Pfähle erweiterte [L4]. Die Ähnlichkeit zwischen Rohren und Pfählen wird nach EN13941 für die Verwendung der Kurven vorausgesetzt. Die Ähnlichkeit ist durch die Vergleichbarkeit der Werte gemäß Abbildung 3 auf der sicheren Seite liegend geben.

Der laterale Bettungswiderstand von Rohren in ZFSV wurde experimentell bisher nicht untersucht. Es ist davon auszugehen, dass sich bei einer hohen Kompression des ZFSV ein Strukturbruch einstellt und der ZFSV maßgeblich an Festigkeit verliert. Eine direkte Verlegung im ZFSV kann daher durch ein bodenmechanisches Verhalten vor und nach dem Strukturbruch charakterisiert werden. Die höchsten Bettungsreaktionskräfte sind bei der ersten Verschiebung zu erwarten. Nach einem eventuell erreichten Strukturbruch sollten die Bettungsreaktionskräfte deutlich abnehmen.

Im Gegensatz zum Berechnungsalgorithmus nach AGFW FW401 T10 liegen von HANSEN Bettungsreaktionskurven für Böden mit Kohäsion vor. Diese wurden im Normentwurf der EN13941 aus dem Jahre 2015 eingefügt [N3]. Die Kurven sind im Anhang 3 zusammengestellt. Damit liegt ein grundsätzlicher Berechnungsalgorithmus für Bettungsreaktionsspannung im ZFSV vor und sollte entsprechend angewendet werden. Es gilt:

$$p_u = K_q * \sigma'_k + 0,7 * \alpha * K_c * c' \quad (8)$$

Mit

p_r =maximaler Bettungsreaktionsdruck

K_q =Bettungsreaktionsfaktor, Reibung

K_c =Bettungsreaktionsfaktor, Kohäsion

σ_k '=Normalspannung, ($=\gamma \cdot Z$)

α = Haftbeiwert, 0,6 für offene Verlegung, 1,0 für geschlossene Verlegung.

c' = Kohäsion

Die übrigen Angaben in EN13941 gelten sinngemäß.

3.3.3 Dehnpolster

Aufgrund der Unsicherheit bei welcher Verschiebung bzw. Bettungsreaktionsspannung der Strukturbruch tatsächlich eintritt (s.o.), sollten Bereiche mit Lateralverschiebung aus Wärmedehnung immer in Dehnpolstern gebettet werden. Die Dehnpolster sollten dabei vor dem Eindringen von ZFSV in die Poren geschützt werden. Dies kann durch die Auswahl eines geschlossenzelligen Dehnpolstermaterials oder eine Schutzumhüllung erreicht werden. Auch verhindert die Viskosität das tiefe Eindringen der ZFSV – Suspension in das Dehnpolster. Eindringtiefen von ZFSV in offenzellige Dehnpolster können durch experimentelle Untersuchungen für verschiedene Überdeckungshöhen nachgewiesen werden. Bleibt diese unter wenigen Millimeter ($<rd.5mm$) ist vermutlich kaum mit einer negativen Beeinflussung des Dehnpolstertragverhaltens zu rechnen.

Durch das Dehnpolster kann die Bettungsreaktionsspannung im ZFSV signifikant abgesenkt werden und ein Strukturbruch wird unterbunden. Untersuchungen in [L2] zeigten, dass der Strukturbruch vom Probenalter und von der Rezeptur abhängt und bei Spannungen von rd. $\sigma > 100$ kPa zu rechnen ist. Bei ausreichender Dehnpolsterdicke werden diese Spannungen erst nach signifikanter Verschiebung erreicht.

Da im Bereich der Dehnpolster kaum axiale Schubspannungen vom Rohrmantel auf das ZFSV übertragen werden können, darf im Dehnpolsterbereich keine Haltekraft angesetzt werden.

3.3.4 Sichtung der Berechnungsmethoden U.S.-amerikanischer Richtlinien

Für die Planung von erdverlegten Rohrleitungen liegen im U.S.-amerikanischen Raum viele Erfahrungen vor und es bestehen umfangreiche Regelwerke [N10-N13]. Diese Regelwerke gelten als anwenderfreundlich und sie basieren auf experimentellen und analytischen Untersuchungen an Rohren und anderen geotechnischen Systemen wie Pfählen, Ankerplatten oder Streifenfundamenten, die sich typischerweise durch einfache zweidimensionale Lastfälle auszeichnen. Im nachfolgenden werden diese Berechnungsmethoden vorgestellt und in Kapitel 7 angewendet.

Innerhalb der oben genannten Richtlinien wird das Kraft-Weg-Interaktionsverhalten zwischen Rohrleitung und Boden als elasto-plastische Bodenfedern idealisiert (s. Abbildung 4). Um die strukturelle Reaktion der Rohrleitung unter der Wirkung von Betriebslasten und Bodenbewegungen zu bewerten, wird die Rohrleitung als Balken modelliert, während der Untergrund durch nichtlineare unabhängige Federn dargestellt wird. Die Federn wirken an einer diskreten Stelle entlang der Rohrleitung. Im Folgenden wird die analytische Formulierung zur Berechnung der Boden-Rohrleitung-Wechselwirkung in axialer, lateraler und vertikaler Richtung dargestellt.

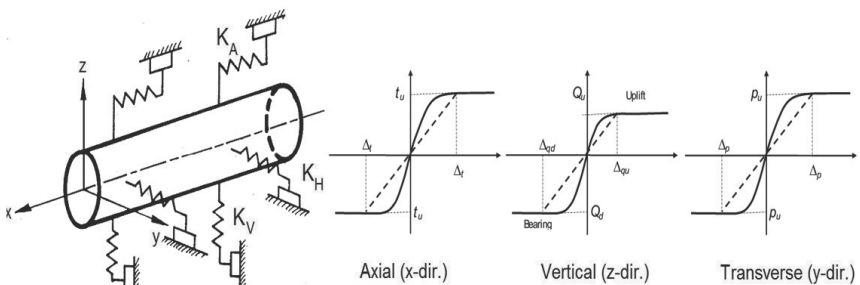


Abbildung 4. Idealsierte Darstellung einer erdverlegten Rohrleitung als nichtlineares Winkler-Halbraum-Modell und entsprechende nichtlineare Bodenfedern [N10]

3.3.4.1. Axiales Bodenfeder-Modell

Die relative Bewegung der Boden-Pipeline in Längsrichtung führt in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen und den Eigenschaften der äußeren Beschichtung zur Entwicklung von Reibung an der Schnittstelle Boden-Rohr. In den ASCE-Richtlinien von 1984 [N11] werden die axialen Kraft-Weg-Beziehungen in Form von elastisch-plastischen Funktionen für den Fall von Sand- und schluffigen Materialien dargestellt. Die Vorgehensweise der ASCE-Richtlinien ist ähnlich wie bei dem bereits entwickelten Verfahren zur Beurteilung der Lastübertragung an der Pfahlschnittstelle zum umgebenden Boden.

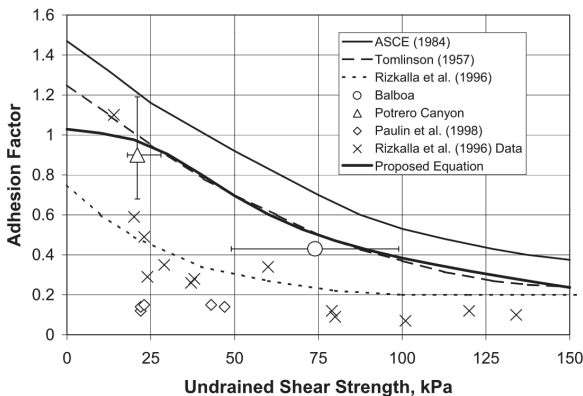
Die maximale axiale Bodenkraft pro Rohrlängeneinheit, die auf das Rohr übertragen werden darf, wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$T_u = \pi D \alpha c + \pi D H \bar{\gamma} \frac{1 + K_0}{2} \tan \delta \quad (9)$$

mit D dem Außendurchmesser des Rohres, c der Kohäsion der Verfüllung (mit der Einheit ksf oder kPa/47,88), H ist die Tiefe zur Rohrmittellinie, $\bar{\gamma}$ die effektive Bodenwichte, K_0 der Erdruhedruckbeiwert, α der Haftbeiwert, δ der Reibungswinkel an der Schnittstelle von Rohr und Boden ($= f\phi$), mit ϕ dem inneren Reibungswinkel des Bodens und mit f der beschichtungsabhängige Faktor. Insbesondere wurde der Reibungsfaktor α erstmals innerhalb der ASCE 1984 als abnehmende Funktion von c_u auf der Grundlage von Experimenten und Studien an Pfählen eingeführt. Abbildung 5 zeigt einige gemessene Adhäsionsdaten aus früheren Studien sowie die im ASCE 1984 und in den ALA-Richtlinien 2001[N10, N11] empfohlenen Adhäsionsfaktor-Kurven. Die letztgenannte Kurve stellt eine obere Grenze zu den Messdaten dar und wird innerhalb der ALA-Richtlinien 2001 verwendet:

$$\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1} \quad (10)$$

Die empfohlenen Grenzverschiebungswerte Δ_u 3 mm, 5 mm, 8 mm und 10 mm gelten für dichten Sand, losen Sand, steifen Ton und weichen Ton [N10].

Abbildung 5. Haftbeiwert α [N10].

3.3.4.2. Transversales Bodenfeder-Modell

Die Relativbewegung der Boden-Pipeline in der horizontalen Ebene, orthogonal zur Rohrachse, führt zur Entwicklung von Querhorizontalkräften an der Schnittstelle Boden-Rohr. Gemäß den ALA-Richtlinien von 2001 wird die maximale querhorizontale Bodenkraft pro Längeneinheit des Rohres in einem allgemeinen Gelände mit Reibungs- und/oder Kohäsionseigenschaften nach der folgenden Formel geschätzt:

$$P_u = N_{ch} c D + N_{qh} \mathcal{H} D \quad (11)$$

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9 \quad (12)$$

$$N_{qh} = a + b(x) + c(x^2) + d(x^3) + e(x^4) \quad (13)$$

wobei N_{ch} und N_{qh} der horizontale Tragfähigkeitsfaktor von Ton (Null für $c=0$) bzw. Sand (Null für $\phi=0^\circ$) sind und in Bezug auf den inneren Reibungswinkel ϕ , das H/D-Verhältnis und mehrere konstante Parameter, wie in Tabelle 2 dargestellt, bestimmt werden. Die obigen Gleichungen stellen eine Annäherung an die von Hansen [L4] in grafischer Form veröffentlichten Ergebnissen zur Beurteilung des Bruchwiderstandes von starren Pfählen gegen Querkkräfte dar.

Tabelle 2. Parameter für die Auswertung von N_{ch} und N_{qh} [N10].

Faktor	$\phi (^\circ)$	X	a	b	c	d	e
N_{ch}	0	H/D	6.752	0.065	-11.063	7.119	-
N_{qh}	20	H/D	2.399	0.439	-0.030	1.059×10^{-3}	-1.754×10^{-5}
N_{qh}	25	H/D	3.332	0.839	-0.090	5.606×10^{-3}	-1.319×10^{-4}
N_{qh}	30	H/D	4.565	1.234	-0.089	4.275×10^{-3}	-9.159×10^{-5}
N_{qh}	35	H/D	6.816	2.019	-0.146	7.651×10^{-3}	-1.683×10^{-4}
N_{qh}	40	H/D	10.959	1.783	0.045	-5.425×10^{-3}	-1.153×10^{-4}
N_{qh}	45	H/D	17.658	3.309	0.048	-6.443×10^{-3}	-1.299×10^{-4}

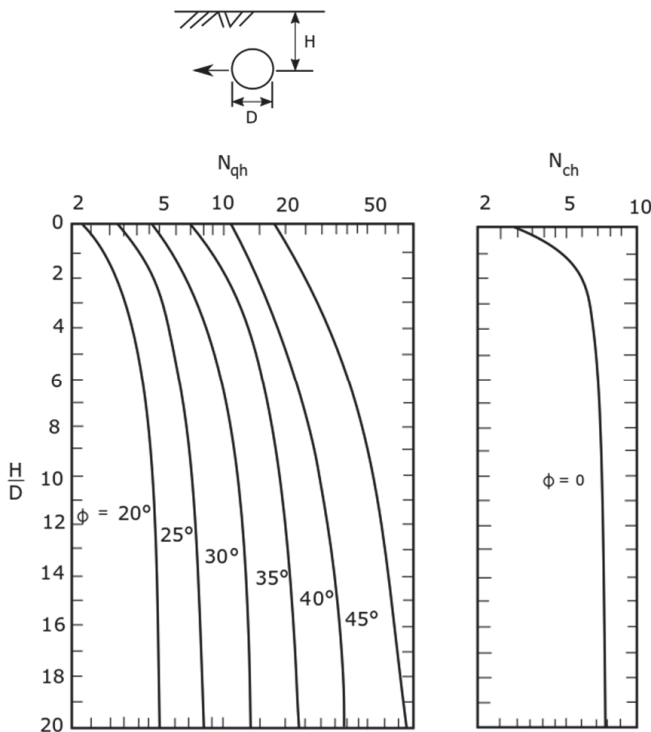


Abbildung 6. Horizontaler Tragfähigkeitsbeiwert für Sand N_{qh} und Ton N_{ch} [N10].

Die Verschiebung bei der Fließgrenze Δ_p kann, wie in den ALA-Richtlinien 2005[N12] angegeben, durch die folgenden Ausdrücke bestimmt werden:

$$\Delta_p = \begin{cases} 0.07 \text{ to } 0.10(H + D/2) & \text{for loose sand} \\ 0.03 \text{ to } 0.05(H + D/2) & \text{for medium sand} \\ 0.02 \text{ to } 0.03(H + D/2) & \text{for dense sand} \\ 0.03 \text{ to } 0.05(H + D/2) & \text{for stiff to soft clay} \end{cases} \quad (14)$$

3.3.4.3. Vertikal aufwärts gerichtete Bodenfeder

Die Bewegung der Boden-Pipeline nach oben orthogonal zur Rohrachse, führt zur Entwicklung vertikaler Kräfte an der Schnittstelle Boden-Pipeline. Gemäß den ALA-Richtlinien von 2001 kann der vertikale Spitzenwiderstand des Bodens pro Längeneinheit der Rohrleitung nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$Q_u = N_{cv}cD + N_{qv}\bar{\gamma}HD \quad (15)$$

$$N_{cv} = 2\left(\frac{H}{D}\right) \leq 10 \quad (16)$$

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H}{44D}\right) \leq N_q \quad (17)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (18)$$

N_{cv} ist der vertikale Faktor von Ton (Null für $c=0$) und N_{qv} der vertikale Faktor von Sand (Null für $\phi = 0^\circ$) ist. Die obigen Gleichungen stellen eine Annäherung an die veröffentlichten Ergebnisse in grafischer Form dar, wie in Abbildung 7 dargestellt.

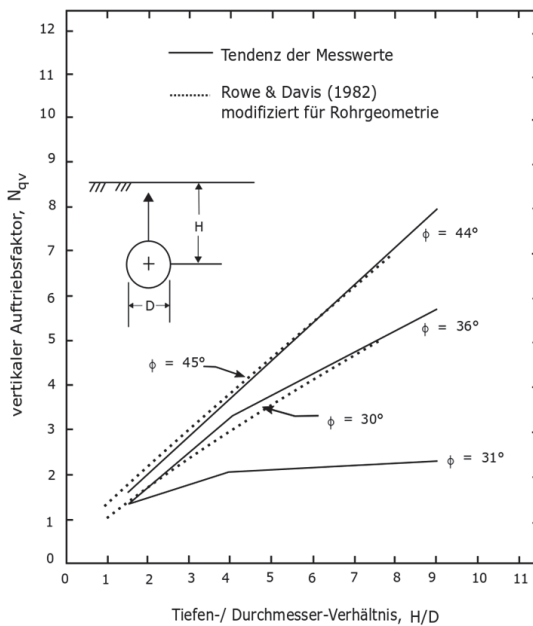


Abbildung 7. Vertikaler Bettungsfaktor für Sand N_{qv} in Abhängigkeit vom H/D [N10, N11].

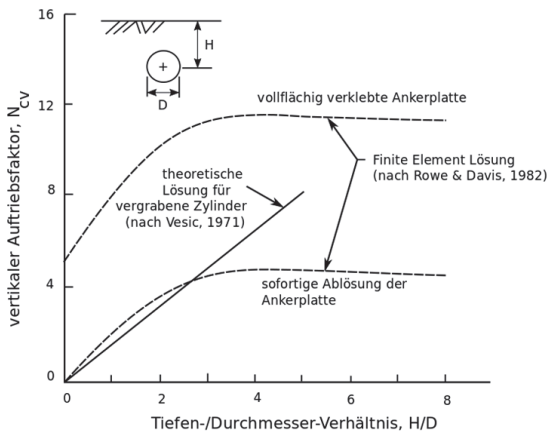


Abbildung 8. Vertikaler Bettungsfaktor für Ton N_{cv} in Abhängigkeit von H/D [N10, N11].

Gemäß den ALA-Richtlinien 2001 [N10] kann die Grenzverschiebung Δ_{qu} , die dem Spitzenaushubbodenwiderstand entspricht, wie folgt berechnet werden:

$$\Delta_{qu} = \begin{cases} 0.01H \text{ to } 0.02H & \text{for dense to loose sand } \leq 0.1D \\ 0.1H \text{ to } 0.2H & \text{for stiff to soft clays } \leq 0.2D \end{cases} \quad (19)$$

3.3.4.4. Vertikale nach unten gerichtete Bodenfeder

Die Relativbewegung der Boden-Pipeline nach unten orthogonal zur Rohrachse führt zur Entwicklung vertikaler Kräfte an der Schnittstelle Boden-Pipeline. In diesem Fall wird die Rohrleitung als zylindrisch geformtes Streifenfundament betrachtet und der Bodenwiderstand wird durch die Tragfähigkeit eines Fundaments gegeben. Dies ist ein bekanntes Problem in der Bodenmechanik. Die ASCE-Richtlinien von 1984 [N11] und 2001 ALA [N10] sehen die gleiche Beziehung vor:

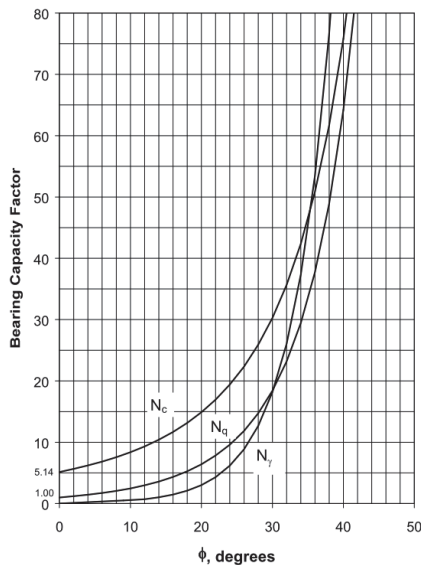
$$Q_d = N_c c D + N_q \gamma H D + N_\gamma \gamma \frac{D^2}{2} \quad (20)$$

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \left\{ e^{\pi \tan(\phi + 0.001)} \times \tan^2 \left(45 + \frac{(\phi + 0.001)}{2} \right) - 1 \right\} \quad (21)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (22)$$

$$N_\gamma = e^{0.18\phi - 2.5} \quad (23)$$

γ ist die Wichte des Bodens, während N_c , N_q und N_γ die Tragfähigkeitsfaktoren sind, die in Abbildung 9 dargestellt sind.


 Abbildung 9. Tragfähigkeitsfaktoren N_q , N_c und N_γ [N10].

Gemäß den ALA-Richtlinien von 2001 kann die Verschiebung Δ_{qd} , die dem Spitzenabwärtswiderstand Q_d entspricht, als $0.1D$ und $0.2D$ für körnige Böden bzw. bindige Böden bewertet werden.

3.3.4.5. Bewertung für den Fernwärmeleitungsbau

Mit den U.S.-amerikanischen Richtlinien werden Berechnungsmodelle vorgeschlagen, die für Fernwärmeleitungen anwendbar sind. Insbesondere kann die Adhäsion in den Modellen in Abhängigkeit der auftretenden Kohäsion berücksichtigt werden. In der EN 13941 wird der Haftfaktor α zu 0,6 gesetzt, ohne auf die Abhängigkeit gemäß Abbildung 5 einzugehen. Dabei ist zu beachten, dass die Modelle für monotone Belastung gelten. Zyklische Effekte aus Wechsellasten werden in den Modellen nicht berücksichtigt.

3.3.5 Abfahren der Leitung und Wechsellasten

Wird die Adhäsionsspitze durch entsprechende Verschiebungen überschritten wird die Vernadelung im ZFSV aufgebrochen und es stellen sich niedrigere Haltekräfte als beim Erreichen der Adhäsionsspitze ein. Dies gilt sowohl für die Be- als auch für die Ent- und Wiederbelastung. In [L2] wurde anhand von 10 Durchschiebversuchen mit ZFSV als Bettungsmaterial festgestellt, dass die residualen Haltekräfte im Bereich von 10%-30% der Adhäsionsspitze liegen. Abbildung 10 zeigt die ermittelten Werte für unterschiedliche Rohrdurchmesser. In WOLFRAM und NEIDHART [L33] wird das Verhältnis zwischen residualer Haltekraft und Adhäsionsspannung mit 1/6 bzw. für Ent- und Wiederbelastung in einer Größenordnung von 0,8/6 bis 0,5/6 angegeben (dies entspricht jeweils 16,6%, 13,3% und 8,3% der Adhäsionsspitze).

Da umfangreichere Untersuchungen zum zyklischen Materialverhalten von ZFSV bisher noch nicht vorliegen und sich aus Abbildung 10 keine klare Tendenz ableiten lässt, wird für das

Abfahren der Leitung und den Ermüdungsnachweis empfohlen 10% der Adhäsionsspitze anzusetzen.

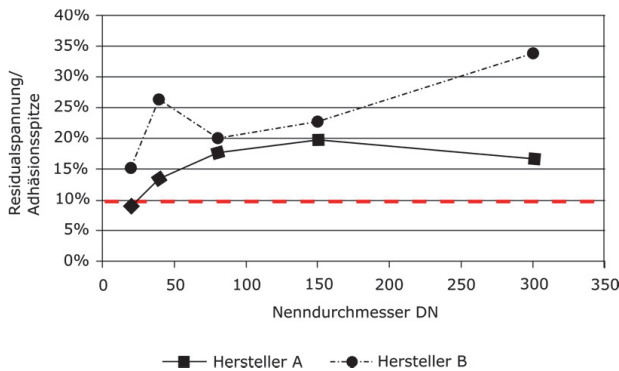


Abbildung 10. Residualspannung / Adhäsionsspitze, ermittelt aus Versuchen aus [L2].

Für eine höhere Genauigkeit bei der Berechnung sind numerische Verfahren zu empfehlen, welche in einem Stab-Feder-Modell die Kontaktmechanik nach Abbildung 1 als Federarbeitslinie abbilden. Hierfür sind die Werte für die Adhäsionsspitze $\tau_{\max}$, die residuale Haltekraft τ_{res} , die Steigung für den Erstbelastungspfad k_1 und die Steigung k_2 des Entfestigungspfad gemäß Abbildung 11 vom ZFSV Hersteller zu liefern.

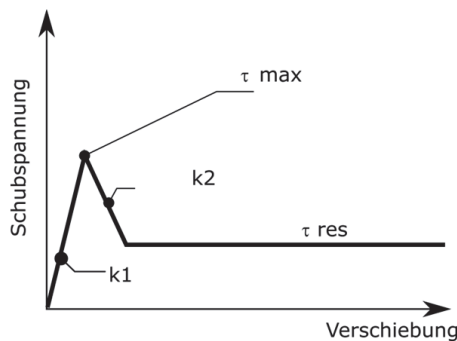


Abbildung 11. Kennwerte der Federarbeitslinie für numerische Untersuchungen.

Ein entsprechendes Verfahren wurde von WOLFRAM und NEIDHART in [L33] umfassend dargestellt und kann für numerische Verfahren als Stand der Technik angesehen werden. Im Programmsystem ABAQUS ist ein entsprechendes Federelement für die Beschreibung von Boden-Rohr Interaktionen standardmäßig verfügbar. In [L33] wurde gezeigt, dass auch andere Programmsysteme sich mit dieser Federkennlinie problemlos nachrüsten lassen.

3.3.6 Gemeinsame Branchenpräsenz von Versorgungsunternehmen und ZFSV-Herstellern

Durch die Erhöhung der Sichtbarkeit der Technologie ZFSV und Fernwärme auf Fachtagungen und Kongressen können Hemmnisse abgebaut und Aufklärungsarbeit zum Thema geleistet werden. Dies wurde durch die HCU im Rahmen des „16th International Symposium on District Heating and Cooling“ vom 9.9.2018 bis 12.9.2018 vorbereitet, indem Aussteller der ZFSV-Branche eingeladen wurden die Technologie dem internationalen Publikum vorzustellen. Auf diese Weise kann fachlich über die Anwendung von ZFSV in der Fernwärme diskutiert werden und es ergeben sich neue Anknüpfungspunkte.

Es ist zu empfehlen die Vernetzung der Branchen durch weitere Aktivitäten und Veranstaltungen zu intensivieren. Dies wird zum weiteren Abbau der Hemmnisse führen.

3.3.7 Absenkung der Betriebstemperatur

Einige Wissenschaftler erwarten eine deutliche Abnahme der Betriebstemperatur für zukünftige Wärmeverteilungsnetze [L18], da diese Entwicklung die Integration von Niedertemperatur- und erneuerbaren Wärmequellen und Niedertemperatur-Überschusswärme Einspeisung in das Fernwärmeverteilungskonzept unterstützt. Eine Abnahme von ca. $\Delta T = 50K$ in den nächsten drei Jahrzehnten wurde prognostiziert [L18]. Dies bedeutet, dass Themen der temperaturbedingten Ausdehnung und der damit verknüpften aufwändigen Rohrstatik langfristig an Bedeutung verlieren könnten [L19, L20]. Für die Auslegung steht dann nur noch der Wärmeverlust der Leitung im Vordergrund. Der Fernwärmeleitungsbau mit schnellen ZFSV-Tiefbauverfahren und neuen Rohrleitungen und -materialien wird dann möglich. Die Entwicklung einer solchen Bautechnik bzw. eines solchen Bauverfahrens, welches auch durch den AGFW-Verband gestützt wird, könnte als Fernwärmeleitungsbau 4.0 angesehen werden, da sich neben bautechnischen Vorteilen vor allem wirtschaftliche Vorteile ergeben würden.

3.3.8 Rohrverbindungen in ZFSV

Fernwärmeleitungen sind in Abhängigkeit der Produktionsverfahren endlich. Deshalb sind Leitungsverbindungen erforderlich, die teilweise zu einer signifikanten Durchmesseränderung führen. Die Enden werden durch sogenannte Muffen miteinander verbunden. Diese Muffen sind im Betrieb denselben thermischen Belastungen ausgesetzt wie die Leitung selbst.

Bei diskontinuierlich hergestellten Fernwärmeleitungen werden die Leitungsstränge in Abständen von z.B. 6 bis 12 Meter kraftschlüssig auf der Baustelle miteinander verbunden. 2013 untersuchten Herbst und Grage [L30] stichprobenartig die axialen Bettungsreaktionsdrücke infolge Zwangsverschiebung für verschiedene Verbindungstypen von Fernwärmeleitungen. Es wurden gerade Rohrschnitte mit unterschiedlichen Verbindungstypen versehen und in einem Sandkasten nach EN 489 verschoben [N8]. Dabei wurde festgestellt, dass im Vergleich zum geraden Rohr ohne Verbindung eine deutliche Zunahme der Verschiebungsarbeit bei den verschiedenen Verbindungen zu beobachten war. Abbildung zeigt links die Ergebnisse aus sieben Versuchen und rechts schematisch den Versuchsaufbau nach EN 489. Es wurden bei den Probekörpern mit Muffe bis zu 3,5-fach größere Verschiebekräfte nach 100 Verschiebungszyklen festgestellt. Die Einbaubedingungen des Bettungsmaterials der Versuche wurden nicht dokumentiert.

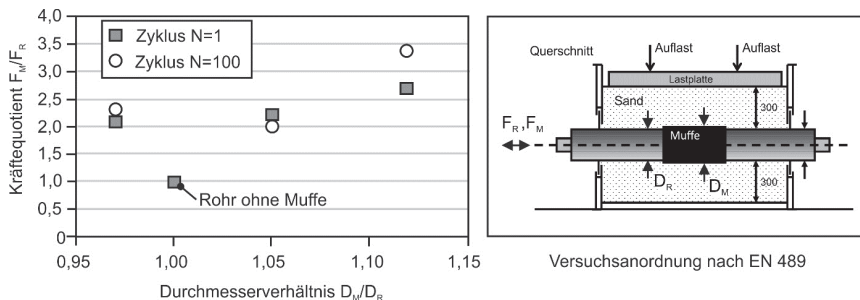


Abbildung 12. Ergebnisse von Herbst und Grage 2013, eigene Auswertung und Darstellung

Es war daher davon auszugehen, dass auch in ZFSV mit größeren Verschiebekräften zu rechnen war. Dies wurde in [L3] mit insgesamt 6 Verbindungsvarianten in einem zyklischen worst-case Szenario mit einer Verschiebung von ± 75 mm an einer Rohrdimension DN300/450 untersucht. Ein Vergleich der Verschiebekräfte zum geraden Rohr wurde nicht durchgeführt. Dafür wurden baupraktische Hinweise gegeben. So wurde festgestellt, dass vernetzte Schrumpfmuffen unbeschädigt blieben, während unvernetzte Muffensysteme mit Manschetten beschädigt wurden. Es wird daher in [L3] empfohlen die Verbindungen stets mit einer Schutzhülle zu versehen. Dies gilt genau genommen nur für den Gleitbereich, indem die Verschiebungen auftreten. Aufgrund der größeren Haltekräfte in ZFSV ist zudem davon auszugehen, dass der Gleitbereich, genauso wie die zu erwartenden Verschiebungen, geringer ausfallen werden, als in einer Sandbettung. Dies ist für die Muffen günstig. Es wird daher davon ausgegangen, dass eine Polsterung der Muffen im Gleitbereich ausreichend ist.

3.3.9 Anpassung von Software-Werkzeugen für die Verlegung in ZFSV

Fernwärmeleitungen können mit unterschiedlichen Software-Werkzeugen berechnet werden. Die umfassende Einführung transparenter Plug-Ins für die software-gestützte Berechnung wird als Grundlage für eine breite Anwendung von ZFSV gesehen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte nicht jede Software-Lösung für die statische Berechnung von Fernwärmeleitungen hinsichtlich ihrer Möglichkeiten Federn für die Anwendung von ZFSV zu implementieren geprüft werden. Beispielhaft wurde dies mit dem Programmsystem ABAQUS und ROHR2 in Kapitel 6 durchgeführt.

4 Erarbeitung eines Entwurfs für ein AGFW Merkblatt

Auf Grundlage des vorliegenden Berichts wurde ein Entwurf für ein zweiteiliges AGFW Merkblatt erarbeitet. Der Entwurf ist in diesem Bericht als Anhang enthalten.

5 Einbindung der ingenieurtechnischen Praxis und den Erfahrungen aus Österreich

5.1 Einbindung der ingenieurtechnischen Praxis

Die Einbindung der ingenieurtechnischen Praxis wurde über Experteninterviews abgedeckt. Es wurden Gespräche geführt mit

- Herrn Horst Rüdiger, Bielefeld
- Herrn Ingo Wolf, Hannover

Die Experteninterviews sind als Anlage diesem Bericht angehängt.

5.2 Erfahrungen aus Österreich

In Österreich wurde annähernd zeitgleich zu den Entwicklungen in Deutschland der Einsatz von zeitweise fließfähigen Verfüllmaterialien Ende der 1990er Jahre untersucht. Dabei wurde der Fokus in Österreich auf sogenannten stabilisierten Sandmischungen gelegt. Wie auch in Deutschland mit ZFSV wurden in Österreich sehr unterschiedliche Erfahrungen mit den stabilisierten Sandmischungen gemacht. Es zeigte sich, dass sich die Eigenschaften der Verfüllmaterialien sehr wesentlich unterschieden und nur eine ausreichende Qualitätssicherung zu einem verlässlichen Ergebnis führte. 1999 wurde die Österreichische Norm ONR/FW 110A veröffentlicht [N7], die auf den Ausarbeitungen von Kisselbach aus dem Jahre 1998 basiert [L8]. Die Norm wurde inzwischen wieder zurückgezogen, spiegelt aber einen wichtigen Teil der Erfahrungen aus Österreich wieder.

Die sich aus der ONR/FW 110A ergebenden Hinweise sollen nachfolgend kurz zusammengefasst werden. Zunächst ist zu erwähnen, dass die Anforderungen an das Verfüllmaterial für die Verfüllzone und die Leitungszone als unterschiedlich angesehen werden. Der für die Fernwärmestatik wichtige Kontaktbereich zwischen Rohr und Verfüllmaterial liegt in der Leitungszone. Daher wurde sich in der ONR/FW 110A auf die Anforderungen für die Leitungszone konzentriert. Hier ist der wesentliche Ansatz: Das Verfüllmaterial in der Leitungszone so einzustellen, dass sich eine Ähnlichkeit mit dem traditionellen Verfüllmaterial „Sand“ einstellt². Nachfolgend werden die wesentlichen Anforderungen nach ONR/FW 110A gelistet und bewertet.

Tabelle 3, Anforderungen nach ONR/FW 110A und Einschätzungen

Anforderungen für die Bodenähnlichkeit	Bewertung
Kurzfristige Verfestigung von 3 Tagen für gute Überbaubarkeit	Es wird nicht angegeben welche Festigkeit erreicht werden soll. Grundsätzlich erfordert eine schnelle Festigkeitszunahme mehr Bindemittel. Dies kann sich nachteilig auf die Endfestigkeit auswirken. Für die Überbaubarkeit ist die Festigkeit des Planums entscheidend, die i.d.R. mit dem Plattendruckversuch nachgewiesen wird. Die Überbaubarkeit nach 3 Tagen im Sinne der ZTV-E kann gewährleistet werden, wenn die letzten 10cm des Rohrgrabens mit einem Erdstoff verfüllt werden, der angemessen verdichtet wurde oder ein Geogitter zum Einsatz kommt.
Leichte Wiederabbaubarkeit	Es wird nicht angegeben wie die leichte Wiederabbaubarkeit nachgewiesen werden kann. Hierfür können die Vorgaben nach [N1] verwendet werden, d.h. die Druckfestigkeit darf für eine leichte Wiederaushubfähigkeit nicht mehr als 0,3 MPa betragen.
50 Jahre Standzeit	Fernwärmeleitungen werden nach EN13941 für eine Standzeit von 30 Jahren dimensioniert. Die Erfordernis eine höhere Anforderung an das Verfüllmaterial zu stellen ist nicht gegeben. Langzeiterfahrungen mit ZFSV über 50 Jahre <u>sind nicht vorhanden</u> . Daher kann kein Hersteller von ZFSV 50 Jahre Standzeit gewährleisten.
Einaxialer Druckversuch	Der einaxiale Druckversuch der Bodenmechanik wurde auch in [L1, L2] zur Feststellung bodenmechanischer Eigenschaften als zweckdienlich angesehen. In [N1] ist die

² Die Bodenähnlichkeit wird auch für die Anwendung der ATV A 127 [N9] zur Erddruckberechnung auf Abwasserrohre gefordert. Ein Berechnungsverfahren ist bisher nicht veröffentlicht, wurde aber für das Jahr 2020 angekündigt.

	einaxiale Druckfestigkeit in Anlehnung an die Betontechnologie mit Würfeln mit der Kantenlänge 100mm durchzuführen. Es ist davon auszugehen, dass die Versuche unterschiedliche Werte bei demselben Material liefern. Es ist daher darauf zu achten, dass bei der Bewertung der Wiederaushubfähigkeit mit Würfeln gearbeitet wird.
Scherversuch	Der Scherversuch der Bodenmechanik wird als wenig geeignet angesehen, da sich die Scherfuge nicht frei ausbilden kann und darf. Ggfs. ist der Versuch für bestimmte ZFSV geeignet. Es sollte besser ein Triaxialversuch durchgeführt werden.
Kompressionsversuch	Der Kompressionsversuch der Bodenmechanik wurde auch in [L1, L2] zur Feststellung bodenmechanischer Eigenschaften als zweckdienlich angesehen. Es zeigte sich dass die Steifigkeiten zum Teil gegen unendlich gingen. Dies bedeutet, dass der Kompressionsversuch nicht so gut geeignet ist den Steifemodul von ZFSV zu bestimmen. Es sind größere Versuchsgeräte und Probenabmessungen notwendig.
Dreiaxialversuch	Der Dreiaxialversuch der Bodenmechanik wurde auch in [L2] zur Feststellung bodenmechanischer Eigenschaften als zweckdienlich angesehen.
Eindringwiderstand mit der Beletz-Rammsonde.	Der Eindringwiderstand mit einer Rammsonde kann für die Vergleichbarkeit zwischen Boden und ZFSV herangezogen werden, wenn die Rammsonde entsprechend kalibriert wurde. Vorsicht ist geboten, wenn die Schlagenergie zum Strukturbruch des ZFSV unter der Rammspitze führt. Es wird dann ein anderes mechanisches Verhalten beobachtet.
Lastplattendruckversuch im Betonring (s. auch Anhang 1: Versuchsaufbau ONR/FW 110A, Rammsondierung)	Der Lastplattendruckversuch insbesondere im Betonring ist ungeeignet. Durch die Behinderte Seitendehnung wird die Lastausbreitung verhindert. Es kann sich kein vergleichbarer Spannungszustand einstellen.
Anforderungen für den Einsatz im FW-Leitungsbau	Bewertung
Temperaturbeständigkeit in dem Bereich -10°C bis 50°C.	Okay.
Kerben im PE dürfen aus dem Verfüllmaterial nicht tiefer als 0,5 mm sein.	Die zulässige Kerbtiefe für die Polyethylenummantelung sollte nicht vom Verfüllmaterial abhängig sein. Es sind die Herstellerangaben zu beachten.
Scherfestigkeit zwischen PE und SVM darf 0,04 N/mm ² nicht überschreiten.	Die Scherfestigkeit $\tau=0,04 \text{ N/mm}^2$ ist der konventionelle Rechenwert für die Rohrstatik. Die Anforderung ist in Ordnung. Versuche in [L2] haben gezeigt, dass dieser Wert überschritten werden kann. Der Einsatz von ZFSV muss daher vermutlich eine Veränderung dieser Anforderung bedeuten.

Der Reibungskoeffizient sollte zwischen 0,15-0,65 liegen.	Die Forderung ist in Ordnung. Wie dieser Wert bestimmt werden soll, ist bisher für ZFSV nicht genormt.
Ermittlung der mechanischen Kennwerte als Funktion der Verfestigungszeit.	Diese Anforderung ist in Ordnung, erfordert aber eine umfangreiche und damit kostspielige Untersuchung. Dies kann vermutlich nicht für jedes Bauvorhaben geleistet werden.
Eignungsprüfung zur Interaktion Bettungsmaterial-Rohr im Versuchsaufbau nach ONR/FW 110A (s. Anlage 2) „Schubversuche“	Der Versuchsaufbau ist geeignet die Schubspannungen am Rohrmantel zu bestimmen. Der Versuchsaufbau ist aufwändig und kann vermutlich nicht für jedes Bauvorhaben wirtschaftlich sein. Die Bestimmung eines „Ersatzreibungswinkels“ nach den angegebenen Formeln ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zu empfehlen.

Über die umfangreichen Anforderungen zum Nachweis der Qualität und der Bodenähnlichkeit fordert die ONR/FW 110A auch detaillierte Angaben zur Zusammensetzung (Rezeptur) des Verfüllmaterials. Es ist davon auszugehen, dass diese Informationen von den Herstellern nicht zur Verfügung gestellt werden, und dass bei der Verwendung von Aushub die Rezeptur in Grenzen veränderlich ist und eine entsprechende Dokumentation sinnvoll aber auch aufwändig ist.

Nach ONR/FW 110A kann nach Durchführung der Schubversuche nach Anlage 2 der Reibungskoeffizient zwischen Rohr und ZFSV nach der nachfolgenden Formel abgeschätzt werden.

$$\mu = \frac{F_R}{F_G + F_N} \quad (24)$$

μ =Reibungskoeffizient

F_R =Reibungskraft

F_G =Gewichtskraft des Rohres

F_N =Erddruck auf das Rohr

mit

$$F_R = \frac{F_S}{L} \quad (25)$$

F_R =Reibungskraft

F_S =Schubkraft im Versuch

L =Länge der axialen Kontaktfläche Rohr-ZFSV

$$F_N = \frac{3}{2} * \frac{1 + K_0}{2 + K_0} * \pi * D * \gamma * H \quad (26)$$

F_N =Erddruck auf das Rohr

$K_0=1-\sin\phi'$ =Erdruehdruckbeiwert

D =Rohraußendurchmesser

γ =Wichte des Bodens

H =Überdeckungshöhe

Bei der angegebenen Formel wird der Kohäsionsanteil vernachlässigt. Die Formel (3) für F_N ist für ZFSV nicht abgesichert. Da der Kohäsionsanteil der Scherspannung von der Normalkraft unabhängig

ist (Schergesetz nach COULOMB $\tau = \mu \cdot \sigma' + c'$), ergeben sich für größere Überdeckungen immer kleinere Reibungskoeffizienten, die zu unrealistischen Werten führen (siehe oben).

Es ist daher nicht zu empfehlen die obigen Gleichungen anzuwenden.

Der skizzierte Versuchsaufbau kann hingegen für die direkte Bestimmung der angreifenden Schubspannung verwendet werden. Aus der gemessenen Schubkraft F_s lässt sich die Schubspannung zwischen ZFSV und PE-Mantelrohr rechnerisch nach folgender Formel ermitteln:

$$\tau = \frac{F_s}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (27)$$

τ =Schubspannung am Rohrmantel
 D =Außendurchmesser des Rohres
 L =Länge der axialen Kontaktfläche

Es ist zu erwarten, dass der Wert von der Verschiebungsgeschwindigkeit abhängt, aber für eine erste Näherung ist eine Anwendbarkeit der Formel, aufgrund der langsamen Ausdehnungsgeschwindigkeiten im Fernwärmeleitungsbau, gegeben.

So lässt sich gemäß ONR/FW 110A die auftretende rechnerisch anzusetzende Schubspannung ermitteln für:

- Anfahrvorgang,
- Abfahrvorgang,
- wiederholte Anfahrvorgänge,
- wiederholte Abfahrvorgänge,
- wiederholte Temperaturänderungen,
- Langzeiteinfluss,
- Einfluss der Verfestigung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Versuchsaufbau dafür geeignet ist, die Schubspannungen am Rohrmantel zu bestimmen. Der Versuchsaufbau ist aber aufwändig und kann vermutlich nicht für jedes Bauvorhaben wirtschaftlich sein.

6 Berechnung einfacher Systeme

In diesem Abschnitt wird beispielhaft gezeigt, wie einfache Rohrsysteme, die im ZFSV verlegt wurden, berechnet werden können und welche Schnittkräfte hierbei zu erwarten sind.

6.1 Methodik und Systembeschreibung

Untersucht wurde eine erdverlegte Fernwärmeleitung mit verschiedenen Bettungsbedingungen. Die Leitung befindet sich in Betrieb und die angenommenen geometrischen und mechanischen Rohreigenschaften entsprechen dem Berechnungsbeispiel aus dem AGFW Regelwerk FW 401 [N4]. Der analysierte Rohrbogen DN 150/250 besteht aus einem P235GH-Stahlmediumrohr mit einem Außendurchmesser $D_s = 168,3$ mm und einer Wanddicke $t_s = 4$ mm, einer Dämmung der Dicke $t_{PUR} = 37$ mm, und einer äußeren Kunststoffummantelung mit einem Außendurchmesser von $D = 250$ mm. Der Radius des Rohrbogens beträgt $R_{bend} = 3D_s$, die Dicke und Länge des Dehnpolsters betragen $t_p = 100$ mm und $L_c = 3$ m. Die Länge beider Biegeschenkel beträgt $L = 80$ m und die Überdeckung beträgt $H = 0,8$ m (vgl. Abbildung 13). Untersucht werden die Varianten mit unterschiedlichen Bettungsmaterialien gemäß Tabelle 4. Hierin enthalten sind die Bodenwichte γ , der innere

Reibungswinkel φ' , die Kohäsion c' , die undrnierte Scherfestigkeit c_u , der Haftbeiwert α , der Reibungskoeffizient an der Boden-Rohr-Grenzfläche μ und der Erdruchdruckbeiwert K_0 .

Grundlage der Kennwerte für die untersuchten ZFSV sind die Werte nach Tabelle 1, welche den Ergebnissen aus [L31] entsprechen. Die Parameter für den Sand repräsentieren einen mitteldichten Sand nach FW 401 [N4].

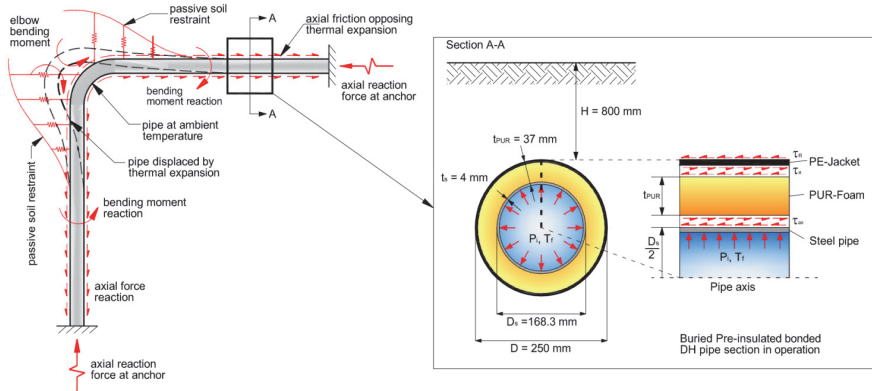


Abbildung 13. Verformung der erdverlegten betriebsbereiten DH-Leitung am Bogen [2].

Tabelle 4. Materialparameter der verschiedenen Bodenverhältnisse.

	Dichter Sand (nach FW 401)	ZFSV 1	ZFSV 3
$\gamma_{\text{Boden}} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	18.00	9.16	15.15
$\varphi' \text{ (}^\circ\text{)}$	32.5	38.7	27.9
K_0	0.463	1.0	1.0
$\mu = \tan(2/3 \varphi)$	0.397	0.48	0.34
$c' \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0.0	37.0	76.0
$c_u \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0.0	66.6	140.7
α	0.0	0.53	0.24

Das in Betrieb befindliche Boden-Rohrleitungssystem wurde nach der Winkler-Fundament-theorie mit der Finite-Elemente-Software ABAQUS/Standard [L32] und Rohr2 analysiert. Der Schwerpunkt wurde auf die Simulation mit ABAQUS gelegt, da hier eine genauere Modellierung möglich ist als in Rohr2.

6.2 Numerische Untersuchungen mit ABAQUS

In ABAQUS wurde die Rohrleitung mit dem Elementtyp PIPE31 modelliert, so dass der Außen- oder Innendruck bemessen werden konnte. Die Boden-Pipeline-Interaktion wurde mit dem federartigen Rohr-Boden-Interaktionselementen PSI34 modelliert, welche die Bodenreaktion auf Bodenbewegung in axialer, lateraler und vertikaler Richtung darstellen. Das Materialmodell für den Stahl P235GH des Mediumrohres wurde innerhalb der von Mises-Plastizitätstheorie mit nichtlinearer Härtung definiert. Die Materialparameter des Stahlwerkstoffs P235GH werden in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur T nach EN 13941 [N2] bestimmt. Tabelle 5 zeigt die Werte der P235GH-

Stahlstreckgrenze, des Elastizitätsmoduls E , der Poissonzahl ν und des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α bei einer Betriebstemperatur von $T = 130^\circ\text{C}$.

Tabelle 5. Materialparameter des Stahlrohres P235GH

Spannung σ_y	204.6 MPa
Bruchspannung σ_u	235.0 MPa
Bruchdehnung ε_u	4.0 %
E-Modul E ($T = 130^\circ$)	206571.429 MPa
Poissonzahl ν	0.3
Wärmeleitkoeffizient α ($T = 130^\circ$)	12.408 E-06 1/K

Die Kraft-Weg-Beziehung für die Wechselwirkungen zwischen Boden und Rohrleitung wird als bilinear elastoplastischer Verbund angenommen und nach den aktuellen nationalen und internationalen Normen, einschließlich der deutschen FW 401 [N4] und der ALA-Richtlinien 2001 [N10] berechnet. Die in diesen Normen vorgeschlagene Methodik zur Interaktionsbewertung zwischen Boden und Rohrleitung wurde oben ausführlich beschrieben. Anschließend werden die Werte der maximalen Bodenreibungsreaktion F_R , der lateralen Bodenreaktion P_U , und der entsprechenden Grenzverschiebungen Δ_R und Δ_U für alle betrachteten Bodenverhältnisse berechnet. Darüber hinaus sollte die axiale Haltekraft pro Rohrlängeneinheit F_H die Scherfestigkeit des PUR-Schaumstoffs ($\tau_{\text{PUR}} = 0,04 \text{ MPa}$) nicht überschreiten, so dass gilt:

$$F_H < \tau_{\text{PUR,max}} \cdot D_s = 0,04 \text{ MPa} \cdot 0,1683 \text{ m} = 6,732 \text{ kN/m} \quad (28)$$

Die numerische Analyse zur Beurteilung der Fernwärmeleitung erfolgt in einem statischen Schritt bei gleichzeitigem Aufbringen der Betriebslasten in Form des Innendrucks $P_i = 12 \text{ bar}$, sowie der Installations- und Betriebstemperatur $T_i = 10^\circ\text{C}$ und $T_f = 130^\circ\text{C}$.

6.3 Numerische Untersuchungen mit ROHR2

ROHR2 ist ein Finite Elemente Programm zur Untersuchung von Spannungszuständen an Rohren und basiert auf den Berechnungsgrundsätzen verschiedener branchenrelevanter Normen und Regelwerken wie z.B. ASME, EN, ISO14692, AGFW FW401, etc. Mit ROHR2 können Verbundrohrsysteme und nahezu beliebige Verlegefiguren inklusive Dehnpolster abgebildet und untersucht werden. Als Bettungsmaterial kann ROHR2 hingegen nur nicht bindige Böden berücksichtigen. Materialparameter für bindige Böden können nicht eingegeben werden. Deshalb wurde zu Vergleichszwecken nur der Fall einer Sandbettung untersucht. Dabei wurden die gleichen Parameter verwendet wie in den übrigen Berechnungen.

6.4 Rohr-Boden-Interaktion für ZFSV und Sand

Zur Beschreibung der Rohr-Boden-Interaktion in axialer und lateraler Richtung wurden alle erforderlichen Kennwerte unter Verwendung der oben angegebenen Gleichungen ermittelt und sind vergleichend in Tabelle 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die axiale Haltekraft F_H pro Rohrlängeneinheit für ZFSV 1 und ZFSV 2 den maximal zulässigen Wert ($F_{H,\text{max}} = 6,732 \text{ kN}$) überschreitet, welcher der rechnerisch zulässigen axialen Scherfestigkeit der Dämmung ($\tau_{\text{PUR}} = 0,04 \text{ MPa}$) entspricht. Dies muss bei der Planung von Fernwärmeleitungssystemen berücksichtigt werden. Gegebenenfalls muss über der Wert für die rechnerisch zulässige Scherfestigkeit neu diskutiert werden. Da bei der Fernwärmestatik die Integrität des Stahlrohrs im Vordergrund steht, wurde die Untersuchung unter Vernachlässigung der begrenzten Scherfestigkeit durchgeführt.

Tabelle 6. Berechnungsparameter für die verschiedenen Bettungsmaterialien

Systemparameter	Einheiten	Dichter Sand	ZFSV 1	ZFSV 3
H	m	0.925	0.925	0.925
D _s	m	0.1683	0.1683	0.1683
D _{PE}	m	0.25	0.25	0.25
D _{CU}	m	0.45	0.45	0.45
t _s	m	0.004	0.004	0.004
t _{FOAM}	m	0.03695	0.03695	0.03695
t _{PE}	m	0.0039	0.0039	0.0039
ρ _{Boden}	kg/m ³	1834.86	933.37	1544.0
γ _{Boden}	kN/m ³	18.0	9.16	15.15
γ _{Wasser}	kN/m ³	10.0	10.0	10.0
γ _{Stahl}	kN/m ³	78.5	78.5	78.5
φ°	°	32.5	38.7	27.9
K ₀ = 1-sin φ		0.463	1.0	1.0
μ = tan δ = tan (2/3 φ°)		0.397	0.48	0.34
c _u (undränierte Scherfestigkeit)	kN/m ²	-	66.600	140.700
c' (Kohäsion)	kN/m ²	-	37.000	76.000
c' (Kohäsion in ksf)	ksf	-	1.391	2.939
α (ALA 2001)		-	0.53	0.24
σ ₀ = γ _{Boden} H	kN/m ²	16.650	8.470	14.011
A _s = π [D _s ² - (D _s - 2 t _s) ²] / 4	m ²	0.002065	0.002065	0.002065
A _i = π (D _s - 2 t _s) ² / 4	m ²	0.020182	0.020182	0.020182
G _s = γ _s A _s	kN/m	0.162	0.162	0.162
G _w = γ _w A _i	kN/m	0.202	0.202	0.202
F _G = G _s + G _w	kN/m	0.364	0.364	0.364
F _N = σ ₀ πD _{PE} ·(1+K ₀) / 2	kN/m	9.564	6.652	11.004
F _{N,CU} = σ ₀ πD _{CU} ·(1+K ₀) / 2	kN/m	17.215	11.974	19.807
F _R = μ (F _G + F _N)	kN/m	3.944	3.392	3.826
F _{R,CU} = μ (F _G + F _{N,CU})	kN/m	6.984	5.964	6.788
F _C = α c _u D _{PE}	kN/m	-	27.819	27.015
F _{C,CU} = α c _u D _{CU}	kN/m	-	50.074	48.627
F_{ax} = F_{ax,CU} = F_R + F_C	kN/m	3.944	31.210	30.840
Δ_t = Δ_{t,CU}	m	0.003	0.005	0.005
N _{ch}		-	6.560	6.560
N _{qh}		10.378	16.515	6.999
N _{ch,CU}		-	5.950	5.950
N _{qh,CU}		8.587	13.633	5.905
P_u = N_{ch} c' D_{PE} + N_{qh} γ_H D_{PE}	kN/m	43.197	95.652	149.162
P_{u,CU} = N_{ch,CU} c' D_{PE} + N_{qh,CU} γ_H D_{CU}	kN/m	64.337	151.033	240.727
Δ_p = min {0.04·(H+D_{PE}/2); 0.15 D_{PE}}	M	0.0375	0.0375	0.0375
Δ_{p,CU}	M	0.2573	0.604	0.963

6.5 Ergebnisse der numerischen Berechnung

Dieser Abschnitt analysiert die strukturelle Reaktion der erdverlegten DH-Pipeline unter Betriebsbedingungen, unter dem Einfluss von Innendruck- und Temperaturlast und unter Berücksichtigung der verschiedenen Bettungsverhältnisse. Es kann festgestellt werden, dass der thermischen Ausdehnung die Haltekraft entgegenwirkt. Die maximale axiale Verschiebung in der Rohrleitung $u_{\max}$ kann analytisch unter Verwendung der in den Regelwerken AGFW FW 401 [N4] und EN 13941 [N2] angegebenen Formeln unter der Annahme einer elastisch-plastischen Kraft-Weg-Beziehung für die axiale Boden-Rohr-Wechselwirkung wie folgt abgeschätzt werden:

$$u_{\max} = \left(\alpha_T \Delta T + \frac{(1-2\nu)}{E} \frac{P_l D_s}{4t_s} \right) \cdot L_0 - \left(\frac{7}{10} \cdot \frac{F_R}{EA_s} \right) \cdot L_0^2 \quad (29)$$

mit $A_s = 2064,7 \text{ mm}^2$ Stahlrohrquerschnittsfläche, mit Reibgleitlänge L_0 :

$$L_0 = \frac{\left(E \alpha_T \Delta T + (1-2\nu) \frac{P_l D_s}{4t_s} \right) A_s}{F_R} \cdot \frac{5}{6} \quad (30)$$

Die Länge L_0 des Gleitreibungsbereichs ist umgekehrt proportional zur axialen Haltekraft F_H beziehungsweise Reibungskraft F_R , wie in Gleichung (30) dargestellt. Folglich nimmt die maximale Verschiebung $u_{\max}$ bei größeren Werten der Reibungskraft $F_{H,R}$ ab. Analytisch berechnet ergeben sich für alle Bettungsverhältnisse sehr ähnliche maximale axiale Verschiebungen der Rohrleitung unter Betriebsbedingungen wie mit dem in ABAQUS [L32] und ROHR2 numerisch berechneten Werten (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7. Maximale axiale Verschiebung in der Rohrleitung ($u_{\max}$) für die verschiedenen Bodenverhältnisse.

		Dichter Sand	ZFSV 1	ZFSV 3
Analytisch (FW 401)	L_0 (m)	136.273	17.221	17.427
	$u_{\max}$ (mm)	79.6	10.9	11.0
Numerisch (ABAQUS)	$u_{\max}$ (mm)	85.9	16.2	16.3
Numerisch (ROHR2)	$u_{\max}$ (mm)	79.9		

Beide Programme liefern plastische Spannungen und Verformungen im Bogenbereich (siehe Abbildung 14 und 15) für die Bettung in dichtem Sand. Dies ist auf die geringeren Haltekräfte im Vergleich zu ZFSV zurückzuführen, die zu höheren Biegemomenten und Dehnungen führen (s. Abbildung 14, 16 und 17). Die Axialspannung im geraden Rohr nimmt linear innerhalb des Gleitbereichs ab, da die axial wirkende Schubspannung an der Rohrummantelung der Temperaturdehnung und dem Innendruck entgegenwirkt bis Gleichgewicht erreicht ist. Im Haftbereich bleibt die Axialspannung konstant. Für die ZFSV 1 und ZFSV 3 ergibt sich bei einer Gleitbereichslänge von ca. 17,5m eine maximale Axialkraft im Mediumrohr von 397.0 kN, welche die elastische Grenzkraft von 395.8 kN leicht überschreitet.

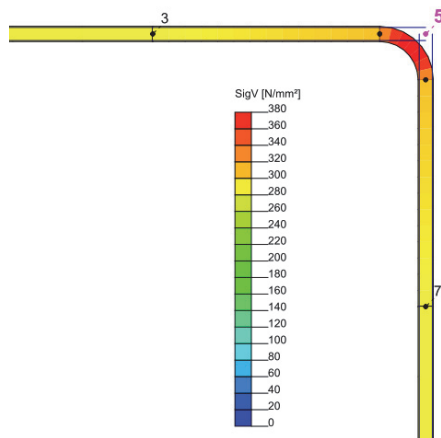


Abbildung 14. Verteilung der von Mises Spannungen im Biegebereich der Betriebsleitung, berechnet mit Rohr2.

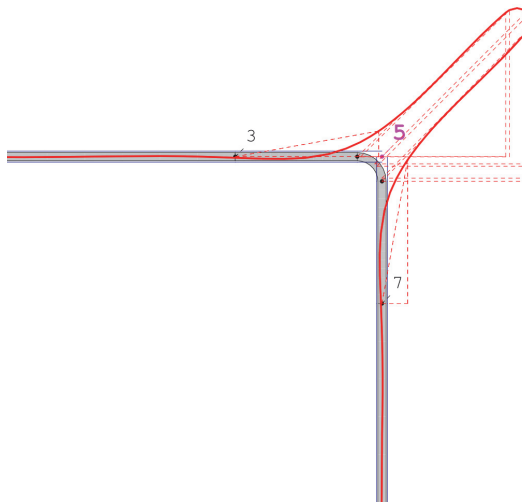


Abbildung 15. Verschiebungen am Brechpunkt des 90°-Bogens, berechnet mit ROHR2.

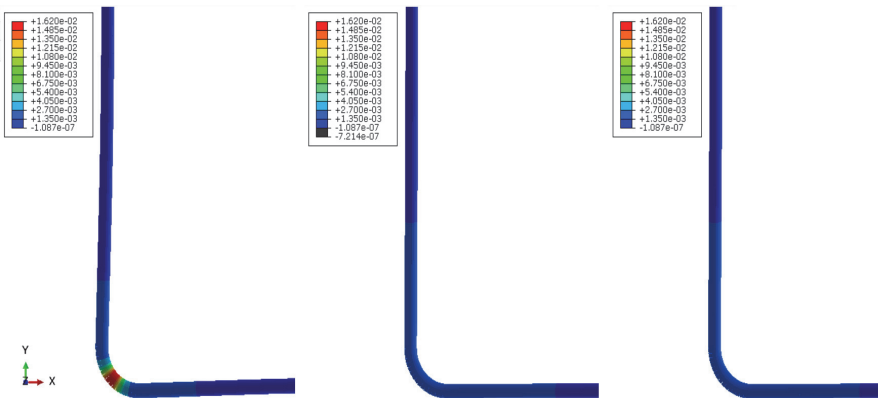


Abbildung 16. Längsdehnungskontur und Verformung der Rohrleitung im Biegebereich unter Betriebsbedingungen, für unterschiedliche Bodenverhältnisse: a) dichter Sand; b) ZFSV 1; c) ZFSV 3., berechnet mit ABAQUS

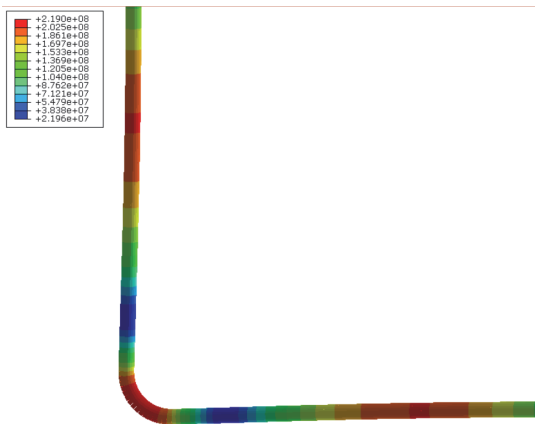


Abbildung 17. Verteilung der von Mises-Spannungen (Pa) im Bogenbereich der Leitung für Bettung in dichter Sandbettung, berechnet mit ABAQUS.

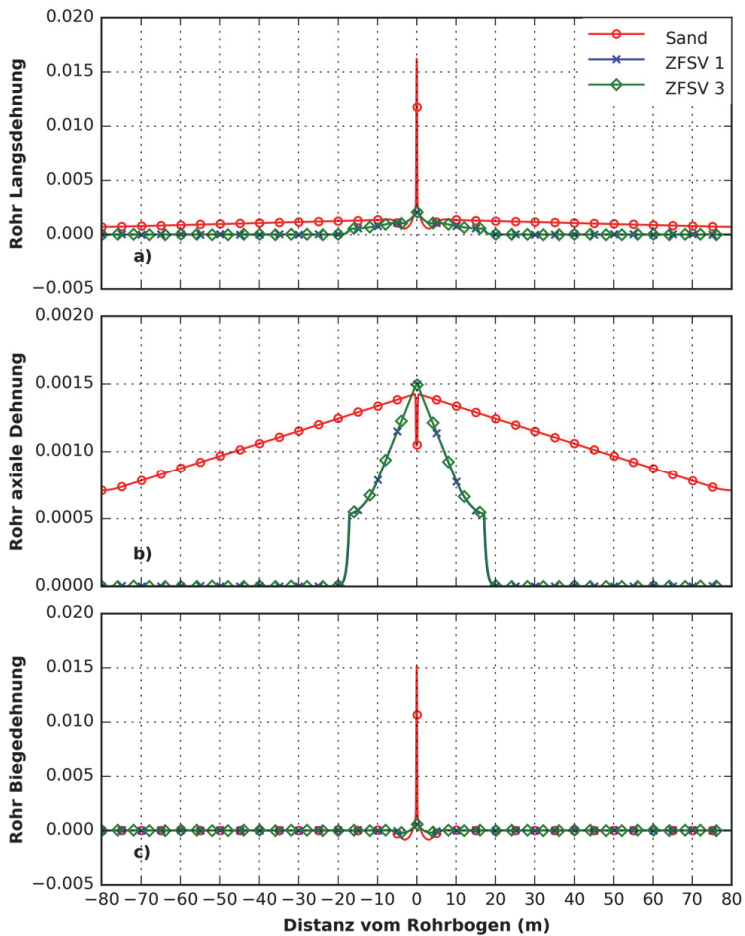


Abbildung 18. Verformung entlang der Betriebsleitung für unterschiedliche Bodenverhältnisse.

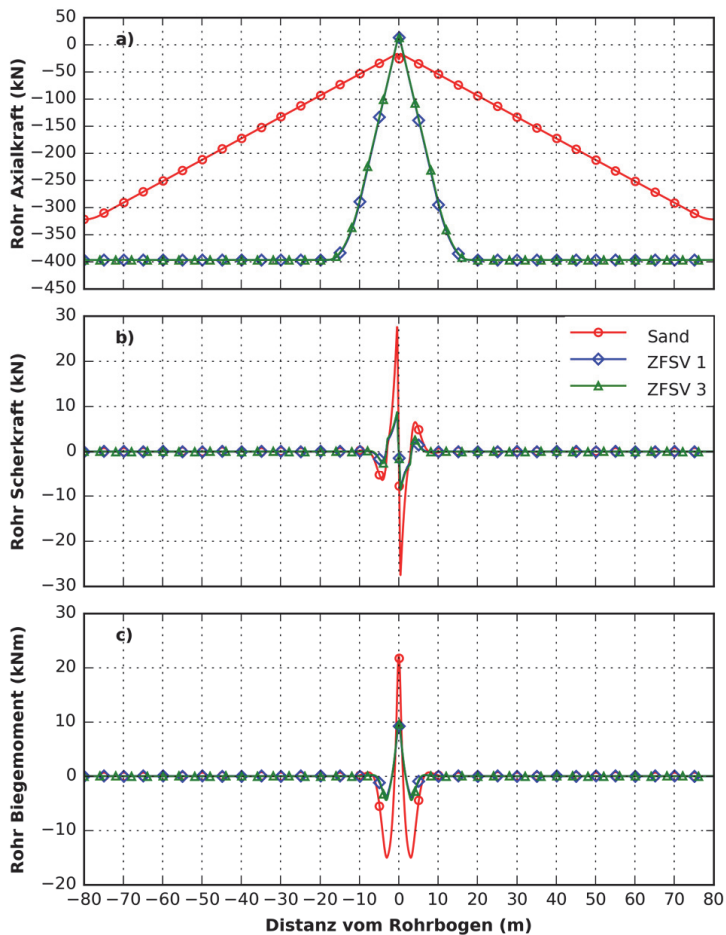


Abbildung 19. Schwankungen der Kräfte entlang der Betriebsleitung für unterschiedliche Bodenverhältnisse.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen für diesen Bericht zeigen, dass ein umfangreiches Literaturwerk zur Verfügung steht, durch das das Tragverhalten von Fernwärmeleitungen in ZFSV unter Verwendung üblicher Bruchtheorien grundsätzlich beschrieben werden kann.

Die wesentlichen Erkenntnisse sind:

- ZFSV besitzen Kohäsions- und Adhäsionskräfte, die in der bisherigen FW-Statik nicht berücksichtigt werden.
- Zum lateralen Bettungsreaktionsdruck im ZFSV gibt es noch keine Untersuchungen. Die Recherchen zeigen, dass dieser aber mit den vorhandenen Erkenntnissen in Abhängigkeit der bodenmechanischen Scherparameter ϕ' und c' eines ZFSV grob abgeschätzt werden kann.
- ZFSV weisen beim ersten Anfahren im axialen Interaktionsverhalten nach wenigen Millimetern einen ausgeprägten Peak-Wert der Scherspannungen auf, der für die Auslegung beim ersten Anfahren angesetzt werden muss. Danach stellt sich wie im Sand ein Residualwert der Scherspannungen ein, der für die Ermüdungsnachweise anzusetzen ist.
- Die Haltekraft kann in Abhängigkeit der geotechnischen Parameter ϕ' und c_u bzw. c' vereinfacht abgeschätzt werden.
- Zum zyklischen Interaktionsverhalten zwischen ZFSV und Fernwärmerohr ist noch sehr wenig bekannt. Es wird daher empfohlen ein entsprechendes Materialgesetz zu entwickeln und in die Anwendung zu bringen. Bis dahin kann mit den einfachen, in diesem Bericht vorgestellten Ansätzen gerechnet werden.

Die Berechnungen zeigen, dass der Einhaltung der zulässigen Scherfestigkeit in der Dämmung eine erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Die hohen Haltekraften können im Gleitbereich zu einer mechanischen Überlastung führen. Gleichzeitig sind die hohen Haltekraften für die Biegemomente im Stahlrohr günstig. Die Biegemomente fallen im ZFSV geringer aus als im Sand. Das Zusammenspiel zwischen Bettungsreaktionen und den Schnittkräften muss daher genau untersucht werden, wofür eine Qualitätssicherung des Bettungsmaterials und die Bestimmung der Berechnungsparameter notwendig ist. Dabei konzentriert sich die Betrachtung auf den Bereich außerhalb der Dehnpolster und außerhalb des Haftbereichs. Für diesen Gleitbereichsabschnitt kann es sinnvoll sein eine höhere Schaumdichte der Dämmung zu fordern, oder konstruktive Verbindungen zwischen dem Mediumrohr und dem Mantelrohr vorzusehen. Die hieraus zu befürchtenden Wärmeverluste, könnten durch Rohre mit einer Dämmung geringerer Dichte und damit weniger Wärmeverlusten im Haftbereich ausgeglichen werden. Bautechnisch wäre daher zu überlegen, ob sich die Verlegetechnik zukünftig zwischen Haftbereich und Gleitbereich unterscheiden sollte. Vor dem Hintergrund der obigen Ausführungen erscheint dies insbesondere für ZFSV sinnvoll.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Standards, Normen und Regelwerke

[N1] H ZFSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau. H ZFSV Ausgabe 2012. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1, Regelwerke, 563)

[N2] EN 13941, Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating, CEN/TC 107, Deutsches Institut für Normung e.V. Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS), Beuth Verlag, Berlin, 2010

[N3] prEN 13941, Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating, CEN/TC 107, Deutsches Institut für Normung e.V. Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS), Beuth Verlag, Berlin, 2015

[N4] AGFW-Arbeitsblatt FW401 – Teil 1-18, „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze“, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2007

[N5] ZTV A-StB 12, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen. ZTV A-StB Ausg. 2012. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1, Regelwerke, 976)

[N6] ZTV E -StB 09, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. ZTV E-StB Ausg. 2009. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1, Regelwerke, 599)

[N7] ONR/FW 110A, Fernwärmeversorgung – Stabilisierte Rohrgrabenverfüllmaterialien, „Technische Spezifikation für stabilisierte Rohrgraben-Verfüllmaterialien – SVM für den Einbau von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren – KMR“, Österreichische Norm, zurückgezogen, 1999

[N8] EN 489, District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Joint assembly for steel service pipes, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene; Beuth Verlag Berlin, 2009

[N9] ATV-DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (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).

[N10] American Lifeline Alliance, ALA. (2001). Richtlinien für die Auslegung von erdverlegten Stahlrohren, FEMA.

[N11] American Society of Civil Engineers, ASCE. (1984). Leitlinien für die seismische Auslegung von Öl- und Gaspipelinesystemen, Ausschuss für die Lebensdauer von Gas- und Flüssigbrennstoffleitungen.

[N12] American Lifeline Alliance, ALA. (2005). Auslegungsrichtlinien für seismisch resistente Wasserleitungsanlagen. FEMA.

[N13] Pipeline Research Council International, PRCI. (2004). Richtlinien für die seismische Auslegung und Bewertung von Erdgas- und Flüssigkohlenwasserstoffleitungen.

8.2 Literaturverweise

- [L1] Wagner, Bernd, „Ein Beitrag zur axialen Bettung von Kunststoffmantelrohren der Fernwärme in Zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV)“, Hrsg. Wolfram Kudla, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Techn. Universität Bergakademie Freiberg, 2017
- [L2] „EnEff:Wärme, Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“, AGFW –Forschung und Entwicklung Heft 43, ISBN 3-89999-068-4, BMWi Forschungsbericht, FKZ 03ET1063D, 2017
- [L3] Schmitt, Frieder; Caspar, Jürgen; Holler, Stefan, „Wärmetransport im Wettbewerb zu dislozierter Wärmeerzeugung und Maßnahmen zur Senkung der Baukosten von Transportleitungen“. Frankfurt am Main: AGFW Forschung und Entwicklung Heft 28, 2014 und Schmitt, Frieder; Caspar, Jürgen; Holler, Stefan „Bautechnische Entwicklungen von Fernwärme-Transportleitungen“. Frankfurt am Main: AGFW Forschung und Entwicklung Heft 32, 2015.
- [L4] Hansen, B.J., „The Ultimate Resistance of Rigid Piles against Transversal Forces“, The Danish Geotechnical Institute, Bulletin No. 12, Copenhagen 1961.
- [L5] Gräfen, Hubert ; Werkstofftechnik, VDI-Gesellschaft: Lexikon Werkstofftechnik: Berichtigter Nachdruck. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013.
- [L6] Habenicht, Gerd: Kleben : Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008.
- [L7] Burbaum, Ullrich: Adhäsion bindiger Böden an Werkstoffoberflächen von Tunnelvortriebsmaschinen, Fachbereich Material- und Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt, Dissertation, 2009.
- [L8] Kisselbach G., „Technische Spezifikation für stabilisierte Rohrgraben-Verfüllmaterialien – SVM für den Einbau von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren – KMR“, Im Auftrag des Fachverbandes Gas&Wärme, 1998
- [L9] Berger W., Keller H., Grage T., „Experimentelle Erfassung der Interaktion von Kunststoffmantelrohren der Fernwärmeversorgung und neuartige Rohreinbettungsverfahren“, 3R International, Heft 1, S. 33-38 Januar 2000
- [L10] Schmitt F., Hoffmann H.-W., „Reuse of Excavated Material“, International Energy Agency – District Heating and Cooling, Programme of Research, Development and Demonstration on District Heating and Cooling ISBN: 90-5748-013-1, 1999
- [L11] Büchau A., Pareidt H., Liebermann A., „Ansätze zur innovativen Sanierung von Kanälen“, EuroHeat&Power 33.Jg., Heft 3, S. 68-76, 2004
- [L12] Tawfiq K.S., Caliendo J.A., „Laboratory Investigation of Polyethylene Sheeting as a Friction Reducer in Deep Foundation“, Geotextiles and Geomembranes, 12, 739-762, 1993
- [L13] AUDIBERT, J.M.E.; NYMAN, K.J.: Soil restraint against Horizontal Motion of Pipes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 3, No. GT10, 1977.
- [L14] TRAUTMANN, C.H.; O’ROURKE, T.D.: Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 9, 1985.

[L15] 2016 Achmus M., Weidlich I., „Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und dem umgebenden Boden“, Bautechnik 93, Heft 9, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Seiten 663-671, 2016

[L16] Thewes M., „Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden“, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bodenmechanik und Grundbau, Bericht Nr. 21, Dissertation, Hrsg. B. Walz und M. Pulsford, 1999

[L17] Potyondy, J.G., „Skin friction between Various Soils and construction materials“, Geotechnique, 11, 4, S. 339-353, 1961

[L18] Lund H., Werner S., Wilthire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V., „4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems“, Energy 68, 1-11, Elsevier. (2014)

[L19] Weidlich I., Grajcar M. "Expected Potential of Bound and Recycled Backfill Material in Low Temperature District Heating Networks", International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies - CONECT 2017, Science direct, Energy Procedia, ISSN 18766102, Elsevier Ltd., London, 2017

[L20] Weidlich I., "Sensitivity analysis on the axial soil reaction due to temperature induced pipe movements", DHC2016, the 15th International Symposium on District Heating and Cooling, September 4th to September 7th, 2016, Seoul, South Korea.

[L21] Weidlich I., "Erddruck auf Rohre", 1. Auflage, AGFW | Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Postfach 70 01 08, D-60551 Frankfurt am Main, ISBN 3-89999-027-7, 227 Seiten, 2012

[L22] Hoffmann H.W., Göhler T., Klöpsch M., „Fernwärmeleitungsbau mit Recyclingmaterial“, (*District heating pipe construction with recycled material*), Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit Projekt Nr. 032 7270 A, MVV Energie AG, 2006

[L23] Pecher K.H., Quarg-Vonscheidt J., Sosinka K., Baukloh M., Gropengießer A.J., „Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung, Verfahren zur flüssigen Grabenverfüllung“, Abschlussbericht, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW, 2014

[L24] Moser U., Wieland M., „Statische Probleme bei erdverlegten Fernheizleitungen“, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 7, ETH Zürich, 1972

[L25] Weidlich I., Illguth M., „Überprüfung geometrischer Vorgaben für Prüfkörper nach EN253“, EuroHeat&Power, ISSN 0949-166X – D 9790F, Verlag: EW Medien und Kongresse GmbH, 47. Jg., Heft 4-5, Seiten 45- 49, 2018

[L26] White D.J., Ganesan S.A., Bolton M.D., „Safebuck Jip – Observations of axial soil-pipe interaction from testing on soft natural clays“, Offshore Technology Conference, 2011

[L27] Randolph M., Gourvenec S., „Offshore Geotechnical Engineering“, Spon Press, ISBN13 978-0-415-47744-4, 2011

[L28] Hirschberger H., „Böschungsherstellung durch Aufspülen“, in Grundbau-Taschenbuch, Teil 2. Geotechnische Verfahren, Sechste Auflage, Hrsg. Ulrich Smolczyk, Ernst und Sohn, 2001

[L29] Huber S., Heyer D., Anwendungen von Recycling-Baustoffen im Erdbau. Zentrum Geotechnik, TU München. 5. BVSE Mineraliktag 2018 Berchtesgaden, 06.02.2018

[L30] Grage T., Herbst V., Praxisgerechte Qualitätsprüfungen von KMR-Muffensystemen, EuroHeat&Power, 42. Jg., Heft 9, Seiten 46-53, ISSN 0949-166X-D9790F, 2013

[L31] Banushi G., Weidlich I., "Seismic analysis of a district heating pipeline", In: Energy Procedia, Volume 149, 16th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC2018, 9–12 September 2018, Hamburg, Germany, doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.186, 2018

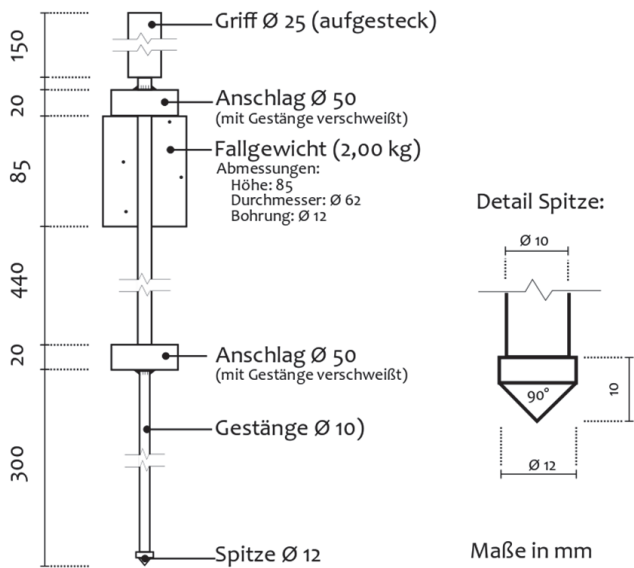
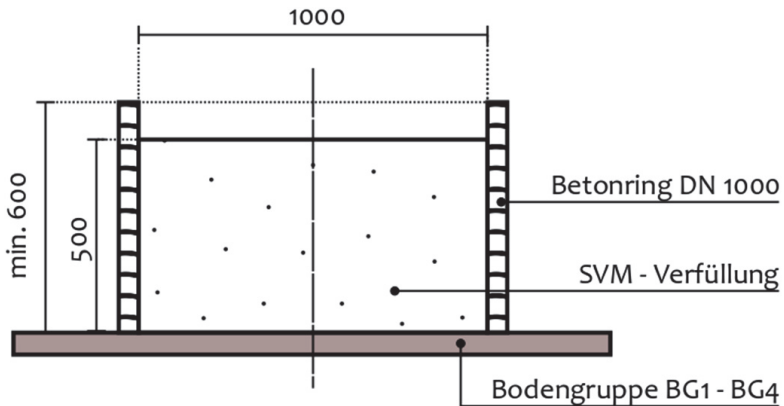
[L32] ABAQUS. (2019). Benutzerhandbuch. Simulia, Providence.

[L33] Wolfrum D., Neidhart T., "District Heating pipes buried in Temporarily Flowable Backfill Materials", Energy Procedia, Elsevier, 16th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC2018, Hamburg, Germany, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.181>, 2018

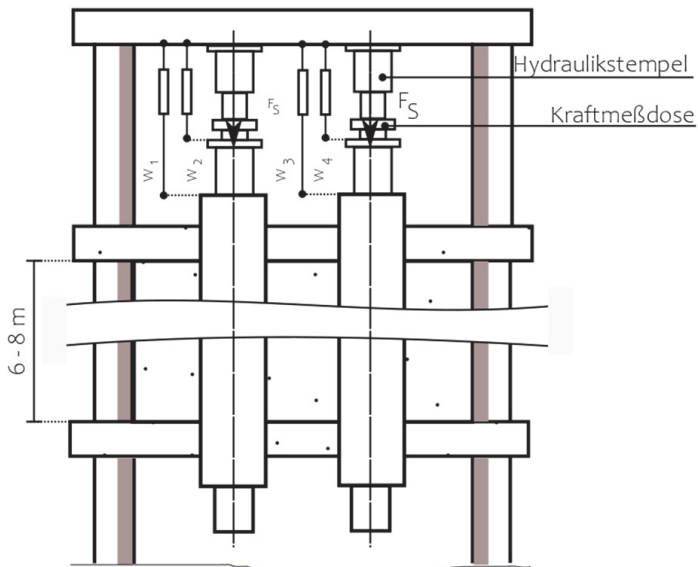
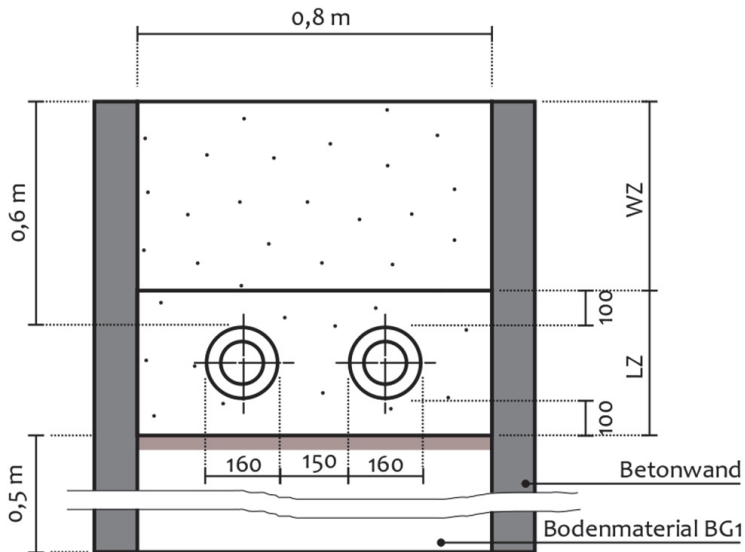
[L34] Rudolf Floss, „ZTVE-StB 94 : zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ; Fassung 1997 ; Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau unter Berücksichtigung der nationalen und europäischen Regelwerke“, 3, Auflage, Kirschbaum Verlag Bonn, 2006

9 Anhang A

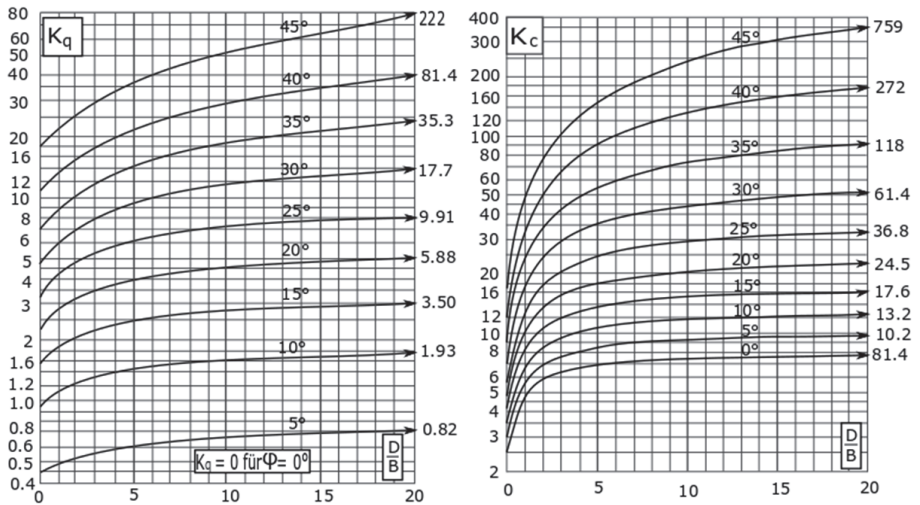
9.1 Versuchsaufbau ONR/FW 110A, Rammsondierung



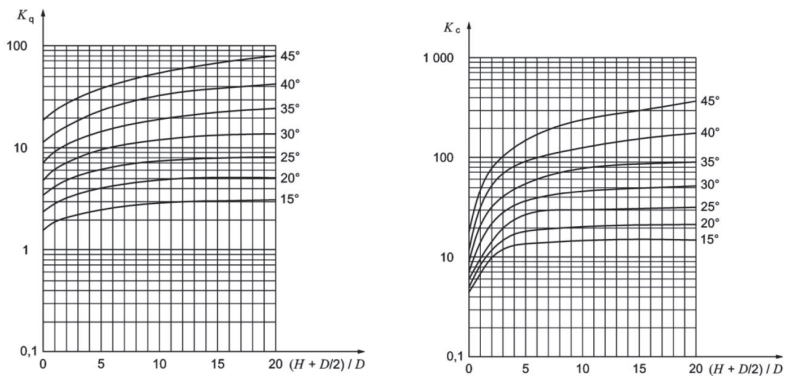
9.2 Versuchsaufbau ONR/FW 110A, Interaktion Rohrleitung - SVM



9.3 Tragfähigkeitskurven für kohäsive Böden nach J.B. Hansen (1961) und prEN13941:2015

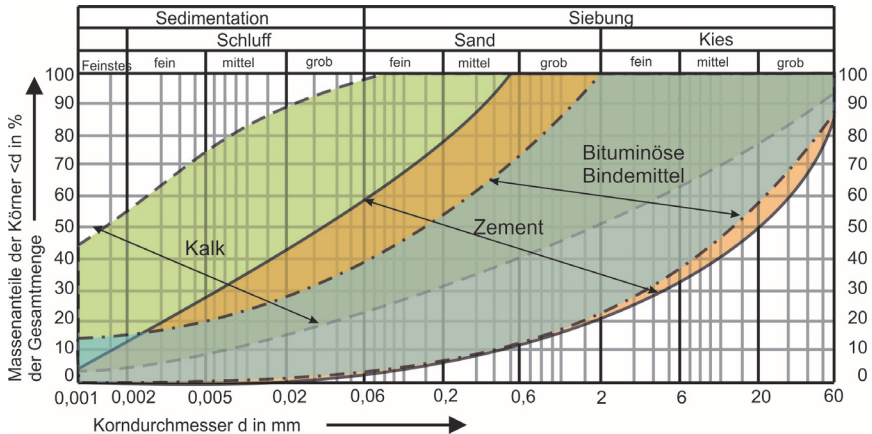


D=Tiefe, B=Pfahlbreite

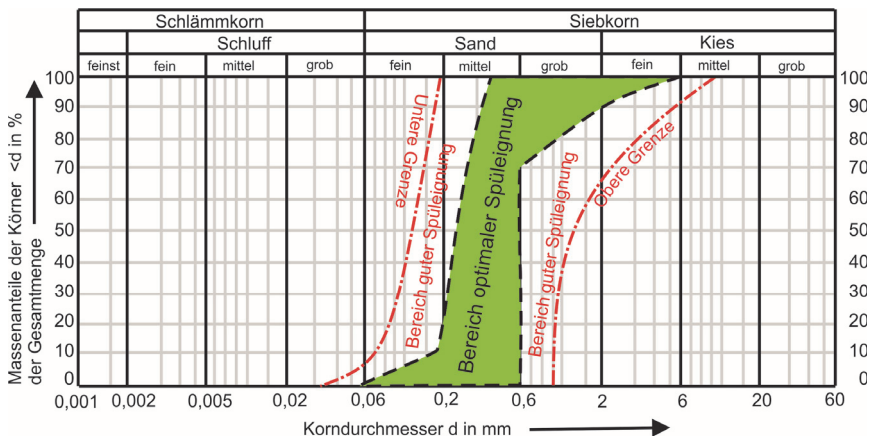


$H+D/2$ =Verlegetiefe, D=Rohrdurchmesser

9.4 Körnungsbereiche für die Verfestigung und Verbesserung von Böden mit verschiedenen Bindemitteln nach Floss [L34]



9.5 Geeignete Körnungsbereiche zum Einspülen nach Hirschberger [L28]



10 Anhang B, Experteninterviews

Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau

Infrastructural Engineering

Experteninterview

Im Auftrag von:

*AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
Stresemannallee 30
60596 Frankfurt am Main*

Berichtsnr.: 2019-AF02-E1

Projekt: C-5-UNT-BIW-18-007

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

Hamburg, 04.09.2018

HafenCity Universität Hamburg
Überseecallee16
D-20457 Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

Tel +49 (0)40 – 4 28 27-5700

www.hcu-hamburg.de

Inhalt

1	Vorgang und Aufgabenstellung	3
2	Experteninterview mit Horst Rüdiger am 04.09.2018	3

1 Vorgang und Aufgabenstellung

Die HafenCity Universität führt im Zeitraum vom 01.04.2018 bis 31.03.2019 einen Forschungs- und Entwicklungsauftrag im Arbeitsgebiet Technisches Infrastrukturmanagement für den AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich durch. Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde mit dem Schreiben vom 13.03.2019 eine kostenneutrale Projektverlängerung genehmigt. Ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe ist die Erstellung eines Entwurfs für ein AGFW-Merkblatt. Wie sich in den Recherchen gezeigt hat, ist eine Entwurfserstellung eines Merkblatts ohne umfangreichere Voruntersuchungen nicht möglich. Zudem wurden seitens des Auftraggebers verschiedene Zusatzinformationen erwünscht.

Eine Befragung von Experten aus dem Fernwärmebereich wurde durchgeführt um die Erkenntnisse abzugleichen und weitere Informationen einzuholen.

2 Experteninterview mit Horst Rüdiger am 04.09.2018

Am 04. 09.2018 wurde ein Experteninterview mit Herrn Horst Rüdiger in Bielefeld durchgeführt. Herr Rüdiger war bis zu seinem Renteneintritt Mitarbeiter bei den Stadtwerken Bielefeld GmbH. Er war dort Leiter Instandhaltung und Instandsetzung im Bereich Kabelmesstechnik. Zu seinen Aufgaben gehörte u.a. Fehlerlokalisierung an Fernmelde-, LWL, 1 bis 30 KV Kabeln sowie Einschaltprüfungen nach Verlegungen und Montagen. Des Weiteren war H. Rüdiger für die Leckage Systeme in KMR Rohren der Fernwärme zuständig. Er begleitete bis heute die Normungsarbeit des AGFW und auch der Europäischen Normung seit mehreren Jahrzehnten. Herr Rüdiger arbeitete an der Erstellung des AGFW Arbeitsblattes FW 401 von Anfang an bis zur vorliegenden Entwurfsfassung sowie an der Erstellung des AGFW „Technisches Handbuch“ Fernwärme 2. Auflage mit und ist Mitglied des deutschen Spiegelausschusses der Europäischen „Normung NA 041-01-12 AA“ Werkmäßig gedämmte Mantelrohre der Fernwärme.

Das Experteninterview wurde am 04.09.2018 von 9.30h bis 12.30 in Bielefeld durchgeführt.

Sehen Sie Vorbehalte beim Einsatz von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau oder im Leitungsbau insgesamt?

Es gibt bei den Versorgungsunternehmen noch Vorbehalte beim Einsatz von ZFSV, da die Sicherstellung einer leichten Wiederaushubfähigkeit angezweifelt wird. Wird diese nicht erreicht, führt dies zu Mehrkosten durch Nachträge. ZFSV ist dann nur mit Hilfe von zusätzlichem Aufwand im Vergleich zum Sand ausbaubar. Tiefbaufirmen setzen das Mittel der Nachträge bewusst ein. Daher ist bei der Ausschreibung der Baumaßnahme und aller nachfolgenden Wiederaushubmaßnahmen die notwendige Transparenz und Sorgfalt geboten. Es sollte zudem eine umfassende Absprache mit den Straßenlastträgern beim Einsatz von ZFSV erfolgen.

Zudem dürfen vorhandene Leitungen nur mit schriftlichem Einverständnis der anderen Leitungsträger mit ZFSV befüllt werden. Dieses ist in jedem Fall in den Bestandsplänen zu dokumentieren und es besteht sektorübergreifender Abstimmungsbedarf.

Welche Vorteile sehen Sie beim Einsatz von ZFSV?

Im Gegensatz zum Sand kann ZFSV erschütterungsfrei und ohne Verdichtungsarbeit eingebaut werden. Im Zwickelbereich der Rohrleitung kann hierdurch eine bessere Bettung erreicht werden. Die einzige Alternative hierzu wäre das Einschlämmen von Sand, was aber einen hohen Wasserbedarf hat und nicht zu den erwünschten Lagerungsdichten führt. Daher ist ZFSV im Vorteil. ZFSV eignet sich für Bereiche, die schlecht zu verdichten sind, besonders gut.

Welche Hemmnisse sehen Sie beim Einsatz von ZFSV

Es ist wichtig, dass die Technologie in Normen präsent ist. Dies hat unterschiedliche Gründe. Heute gibt es für Berufsanfänger kaum noch Bearbeitungszeit. Normen können eine gute Dokumentation von Technologie sein und bei der Einarbeitung in ein Thema sehr helfen. Normen sind auch ein Teil der Aufklärungsarbeit. Diese ist aber insgesamt sehr wichtig. Nur wenn das Wissen um die Technologie transparent verfügbar ist, kann von einer starken Marktdurchdringung ausgegangen werden. Dabei sollten die Normen nicht zu kompliziert gestaltet werden. Ein spartenübergreifendes Denken kann nicht vorausgesetzt werden. Es sind in der Regel disziplinäre Grenzen der Einzelpersonen zu überwinden.

Zudem halte ich es für sehr wichtig, dass die Sensitivität bei den Versorgern für die Bedeutung der Normungsarbeit gepflegt wird.

Ein weiterer Aspekt ist die Aufgabenverteilung zwischen Hersteller, Baufirma, Versorgungsunternehmen und Kommunen. Meiner Meinung nach müssen die Kommunen Vorgaben machen, dass z.B. nur zertifizierte ZFSV eingebaut werden dürfen.

Welche bautechnischen Herausforderungen sehen Sie beim Fernwärmeleitungsbau mit ZFSV

ZFSV haftet so in sich, dass das Eigengewicht nicht mehr auf das Rohr drückt. Zudem haftet ZFSV am Rohr. Es kann passieren, dass der ZFSV Klotz im Ganzen verschoben wird. Als besonders wichtig halte ich die Qualitätssicherung. Dies gilt erstens für den Baustoff selbst aber auch für den gesamten Zertifizierungsprozess. Fernwärmestatiker müssen für das veränderte Tragverhalten des Bettungsmaterials sensibilisiert werden.

Zudem sind bautechnische Anforderungen und die damit verbundenen Folgekosten beim Wiederaushub im Blick zu behalten. Eine Baufirma reagiert sofort mit Bedenken wenn ein „Betonklotz“ im Untergrund gefunden wird. Die Art des Füllmaterials sollte in den Aufmaßplänen eingezeichnet werden.

Daher ist die Kartierung und Kennzeichnung der Bereiche in denen ZFSV verwendet wurde wichtig. Ein ZFSV-Trassenband z.B. mit Zertifikatsaufdruck könnte zusätzliche Transparenz auf der Baustelle herstellen.

Zudem muss ZFSV auch in kleinen Mengen verfügbar sein, damit bei Reparaturmaßnahmen etc. die Kopflöcher wieder geschlossen werden können.

Hinsichtlich des Materials muss auf das Schrumpfen geachtet werden. Das Schrumpfen muss begrenzt werden, damit sich keine unzulässigen Spalte ergeben. Die Einhaltung des Schrumpfmaßes ist meiner Meinung nach ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung.

Sehen Sie noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf der Technologie FW-Leitungsbau im ZFSV?

In Bezug auf die Weiterentwicklung der Technologie sehe ich, wie schon gesagt, die Entwicklung von Regelwerken als vordergründig an. Es sollte ein Arbeitsblatt entwickelt werden und danach die Erkenntnisse bei der nächsten Überarbeitung der EN13941 eingearbeitet werden. Eine solche Einarbeitung in das Europäische Regelwerk der Technologie FW-Leitungsbau mit ZFSV würde ich im Spiegelausschuss NA 041-01-12 AA „Werkmäßig gedämmte Mantelrohre für Fernwärme“ unterstützen, wenn ein transparentes Berechnungsverfahren vorliegt. Meine Empfehlung wäre zudem die Regelwerke möglichst leicht verständlich zu formulieren. Zusätzlichen Forschungsbedarf über die vorliegenden Forschungsprojekte hinaus sehe ich derzeit nicht.

Vielen Dank für das Gespräch.

Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau

Infrastructural Engineering

Experteninterview

Im Auftrag von:

*AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
Stresemannallee 30
60596 Frankfurt am Main*

Berichtsnr.: 2019-AF02-E2

Projekt: C-5-UNT-BIW-18-007

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

Hamburg, 13.06.2019

HafenCity Universität Hamburg
Überseecallee 16
D-20457 Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

Tel +49 (0)40 – 4 28 27-5700

www.hcu-hamburg.de

Inhalt

1	Vorgang und Aufgabenstellung	3
2	Experteninterview mit Ingo Wolf am 11.06.2019.....	3

1 Vorgang und Aufgabenstellung

Die HafenCity Universität führt im Zeitraum vom 01.04.2018 bis 31.03.2019 einen Forschungs- und Entwicklungsauftrag im Arbeitsgebiet Technisches Infrastrukturmanagement für den AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich durch. Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde mit dem Schreiben vom 13.03.2019 eine kostenneutrale Projektverlängerung genehmigt. Ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe ist die Erstellung eines Entwurfs für ein AGFW-Merkblatt. Wie sich in den Recherchen gezeigt hat, ist eine Entwurfserstellung eines Merkblatts ohne umfangreichere Voruntersuchungen nicht möglich. Zudem wurden seitens des Auftraggebers verschiedene Zusatzinformationen erwünscht.

Eine Befragung von Experten aus dem Fernwärmebereich wurde durchgeführt um die Erkenntnisse abzugleichen und weitere Informationen einzuholen.

2 Experteninterview mit Ingo Wolf am 11.06.2019

Am 11.06.2019 wurde ein Experteninterview mit Herrn Ingo Wolf in Hannover durchgeführt. Herr Ingo Wolf ist Mitarbeiter der enercity Netz GmbH in Hannover im Bereich Leitungsbau und begleitet die Normungsarbeit des AGFW und auch der Europäischen Normung seit mehreren Jahrzehnten. Herr Ingo Wolf ist Autor zahlreicher Fachveröffentlichungen in Zeitschriften und ist Mitglied des deutschen Spiegelausschusses der Europäischen Normung NA 041-01-12 AA „Werksmäßig gedämmte Mantelrohre für Fernwärme“.

Das Experteninterview wurde am 11.06.2019 von 15.00h bis 16.00 in Hannover durchgeführt.

Sehen Sie Vorbehalte beim Einsatz von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau oder im Leitungsbau insgesamt?

Vorbehalte beim Einsatz von ZFSV haben die Versorgungsunternehmen neben technischen Aspekten im Wesentlichen im Bereich der Wirtschaftlichkeit. Hier können teilweise lokale Verfügbarkeit und andere regionale Randbedingungen eine wichtige Rolle spielen.

Welche Vorteile sehen Sie beim Einsatz von ZFSV?

Die Vorteile beziehungsweise die Hauptanwendung sehe ich bei komplexen Rohrleitungsfiguren, wo vernünftige Verfüllung und Verdichtung nicht möglich ist, sowie bei alten Gebäuden, die durch Erschütterungen (Verbau und Verdichtung) beschädigt werden könnten. Das Thema sollte ferner mit der ASR (*Technischen Regeln für Arbeitsstätten, Hinweis des Protokollanten*) in der neuesten Fassung und seinen wesentlich verbreiteten Arbeitsräumen sowie ZTV-E und -A in Verbindung mit den lokalen Behörden abgeglichen werden.

Welche Hemmnisse sehen Sie beim Einsatz von ZFSV?

Neben den ganzen technischen Fragen zu ZFSV wird der Baustellenablauf mit seinen Aufwendungen eine maßgebliche Rolle spielen. Hierbei unterstelle ich, dass der Aufwand für Lieferung und Montage von KMR sowie Rohrbau identisch ist und nur durch Unterschiede im

Tiefbau mit Auftriebsicherung gekennzeichnet ist. Dabei sollten wir die folgenden Arbeitsabläufe betrachten:

- Oberflächenaufbruch
- Baustelleneinrichtung und –abspernung einschließlich Räumung
- Herstellung Verbau und Aushub, Abfuhr und Anfuhr
- Verfüllung des Grabens
- Oberflächenwiederherstellung usw.

einschließlich Vorhaltung und Einberechnung aller notwendiger Materialien und Hilfsmittel. Weiterhin muss eine Zulassung der KMR Hersteller vorliegen. Das Sieblinienband in der EN 13941 ist von den Herstellern akzeptiert worden. Dahinter verbirgt sich die Systemgewährleistung über die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems. Gleiches muss für ZFSV erfolgen.

Welche bautechnischen Herausforderungen sehen Sie beim Fernwärmeleitungsbau mit ZFSV?

Grundwasserlinien können durch ZFSV gestört werden und den Grundwasserverlauf verändern. Dies könnte eine Frage für die unteren Naturschutzbehörden werden. Weiterhin ist die geometrische Kombination Mantelrohrdurchmesser und Muffendurchmesser nicht genormt. Ist eine stark aufragende Muffe in ZFSV verlegt kann sich daraus ein Festpunkt ergeben. Risiken könnten ein Muffenabriss bzw. Beschädigung der Muffen, sowie mögliche Überbeanspruchung der PUR Wärmedämmung sein. Zudem muss geklärt sein, wie ein Holzverbau nach Verfüllung mit ZFSV entfernt werden soll. Sollen die Rohre für die Auftriebsicherung mit Wasser gefüllt sein? Weiterhin sollten für den Lastfall Auftrieb die Stützweiten für alle Dämmreihen definiert werden und der Verbau muss so gezogen werden, dass die Verbauspur sich schließen kann.

Sehen Sie noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf der Technologie FW-Leitungsbau im ZFSV?

Nach meinem Kenntnisstand beziehen sich die Untersuchungen der durchgeführten Forschungsvorhaben in der Branche ausschließlich auf das Standardsystem Kunststoffmantelrohr nach EN 253. Daher sehe ich noch Forschungsbedarf für andere Rohrsysteme der Fernwärme, die gegebenenfalls auch in ZFSV verlegt werden könnten. Dies erscheint mir für flexible Rohrsysteme wirtschaftlich sinnvoll und technisch machbar. Bei PMR sehe ich die Gefahr, dass Wärmedämmung durch Permeation von Wasserdampf über das Mediumrohr durchfeuchtet und eine Wasserabfuhr durch Permeation über die Ummantelung im ZFSV unterbunden wird. Es muss also sichergestellt werden, dass ZFSV in der Lage ist Wasser aufzunehmen und das PMR nicht gegen die Umgebung als quasi Wassersperre abschottet. Zudem sollte untersucht werden, wie sich die gemeinsame Verlegung, zum Beispiel mit Kabelleerrohre, realisieren lässt und wie die Wärmeverteilung bei solchen Systemen im Rohrgraben zu erwarten ist.

Vielen Dank für das Gespräch.

11 Anhang C, Entwurf AGFW Merkblätter

Merkblatt FW ZFSV, Teil 1

Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze in zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen

- Grundlagen der Spannungsermittlung –

Juni 2019

ENTWURF

Inhalt

0	Geltungsbereich	4
1	Formelzeichen	4
2	Allgemeines	5
2.1	Positionsplan	6
2.2	Gleitbereich, Haftbereich, Übergangsbereich	6
2.2.1	Gleitbereich.....	6
2.2.2	Haftbereich.....	7
2.2.2	Übergangsbereich.....	7
2.2	Verlegungsmethoden für gerade Rohre, Kaltverlegung, Verlegung mit Vorwärmung	7
2.2.1	Kaltverlegung (1. Methode).....	7
2.2.2	Kaltverlegung (2. Methode).....	7
2.2.3	Verlegung mit Vorwärmung.....	8
3	Statische Auslegung	8
3.1	Vorbemerkungen	8
3.2	Bettungsreaktionen.....	8
3.2.1	Axial wirkende Reaktionen des Bettungsmaterials	8
3.2.1	Lateral wirkende Reaktionen des Bettungsmaterials	11
3.2.2	Dehnpolster.....	11
3.2.3	Abfahren der Leitung und Wechsellasten	11
4	Zitierte Normen und Technische Regeln.....	12
5	Literatur.....	13

ENTWURF

0 Geltungsbereich

Für das vorliegende Merkblatt gilt der Geltungsbereich gemäß Arbeitsblatt FW401 Teil 1 sinngemäß. Es wird den mit der Planung, Bauausführung und dem Betrieb von KMR in zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen betrauten Personen eine zielgerichtete Arbeitsunterlage zur Verfügung gestellt. In den Teilen des Merkblatts werden die Herstellung und Verarbeitung, Prüfung und Qualitätssicherung, Dokumentation und den Betrieb von Kunststoffmantelrohren, Anforderungen, Durchführungshinweise und Nachweisführungen in zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen beschrieben.

Dieses Arbeitsblatt gilt für Kunststoffmantelrohrleitungen in Fernwärmenetzen für Betrieb mit Warmwasser und Dauerbetriebstemperaturen von 120°C und für kurzzeitigen Betrieb mit Spitzentemperaturen von 140°C.

In dem vorliegenden Merkblatt sind die Grundlagen der Spannungsermittlung für in ZFSV verlegten Fernwärmeleitungen dargestellt. In dem Merkblatt FW ZFSV Teil 2 sind die praktischen Grundlagen der Qualitätssicherheit beim Fernwärmeleitungsbau in zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllmaterialien enthalten.

1 Formelzeichen

σ_N = Erddruck Normalspannung

σ_0 = Erddruck Normalspannung

$\bar{\gamma}$ = Wichte des erdfeuchten Bettungsmaterials

$\bar{\gamma}_A$ = Wichte des Bettungsmaterials unter Auftrieb

H = Verlegetiefe der Rohrachse unter GOF

H_w = Tiefe des Grundwasserstandes unter GOF

F'_N = Resultierende Normalkraft aus Erddruck pro Meter

D_a = Außendurchmesser der Ummantelung

F'_H = Haltekraft im ZFSV pro Meter

F'_G = Gewichtskraft des Rohres pro Meter

μ = Reibungskoeffizient zwischen Bettungsmaterial und Ummantelung

a = Adhäsion zwischen Bettungsmaterial und Ummantelung

φ'_{ZFSV} = Innerer Reibungswinkel des ZFSV

c'_{ZFSV} = Kohäsion des ZFSV

$c_{u,\text{ZFSV}}$ = Undränirte Scherfestigkeit des ZFSV

p_u = maximaler Bettungsreaktionsdruck

K_q = Bettungsreaktionsfaktor, Reibung

K_c = Bettungsreaktionsfaktor, Kohäsion

α = Haftbeiwert

2 Allgemeines

Die Verlegung von KMR in zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) wird seit Ende der 1990er Jahre in der Fernwärmebranche untersucht und angewendet. Dabei ermangelte es über fast 20 Jahre an umfangreichen, wissenschaftlich belastbaren Versuchsreihen, mit denen das Interaktionsverhalten zwischen KMR und ZFSV mit ausreichender Genauigkeit so untersucht wurde, dass die Verwendung von ZFSV im Fernwärmerohrgraben zweifelsfrei ermöglicht wurde. Daher waren in diesem Zeitraum die Einsatzbeispiele selten und es wurden positive und negative Erfahrungen mit dieser Verlegetechnologie im Fernwärmeleitungsbau gemacht.

Da die ZFSV verschiedene Vorteile, wie zum Beispiel beim Personaleinsatz oder beim Baustellenablauf bieten, werden Sie bei der Verlegung von „kalten“ Rohren vermehrt eingesetzt. Dies führte zu einer Verbreitung von ZFSV und vermehrter fachlichen Auseinandersetzung mit dieser Technologie im Rohrleitungsbau. Daher wurde auch die systematische Entwicklung der Bautechnik für die Verwendung von ZFSV im Fernwärmeleitungsbau in den 2010er Jahren wieder aufgegriffen. Die wichtigsten Fragen für warmgehende Rohre in ZFSV wurden auf diese Weise beantwortet [1, 2, 6].

Im Vergleich zur konventionellen Verlegung von KMR, die sich durch eine Verlegung in der Leitungszone in Sand nach FW401 T12 Abschnitt 3.6.3.2 charakterisiert, erfordert die Verwendung von ZFSV zusätzliche Fachkenntnisse. ZFSV besteht meistens aus den Komponenten Boden, Wasser, hydraulischen Bindemitteln und Bentonit (Schichtsilikat). Die Eigenschaften des ZFSV-Endprodukts werden durch die Eigenschaften der genannten Materialien und das Mischungsverhältnis beeinflusst. Eine Rezeptur muss festgelegt werden, sowie der Zeitpunkt der Vermischung der Bestandteile insbesondere der Wasserzugabe. Eine Marktanalyse des AGFW hat gezeigt, dass sich ZFSV in drei Typen unterteilen lassen:

- Typ 1 mit hydraulischen Zusatzstoffen

- Typ 2 mit schichtsilikatischen Zusatzstoffen¹
- Typ 3 mit hydraulischen und schichtsilikatischen Zusatzstoffen

ZFSV ist für den Einbau fließfähig und zeichnet sich durch ein anschließendes Aushärten aus, welches durch die Zugabe von Bindemitteln gesteuert wird. ZFSV verhält sich daher grundsätzlich anders als ein Sand. Es wird deshalb empfohlen entsprechende Fachplaner hinzuzuziehen und nur zertifizierte ZFSV-Hersteller zu beauftragen.

Besonders wichtig ist die erforderliche individuelle Beurteilung des Interaktionsverhaltens zwischen Leitung und Bettungsmaterial. Ein vereinfachter Ansatz für die Reibungskraft am Rohrmantel nach FW 401 Teil 10 Abschnitt 4.3.4 ist nicht mehr möglich. Aufgrund der Bindemittel verhält sich ZFSV ähnlich wie ein bindiger Boden. Neben der Reibung des Korngerüsts müssen zusätzlich Adhäsionskräfte berücksichtigt werden. In den meisten Fällen wird hierdurch die Leitung bei Erwärmung stärker festgehalten, wodurch einerseits die Verschiebungen minimiert werden, aber andererseits die Axialspannungen im Rohr erhöht werden. Damit das Rohr nicht zu stark festgehalten wird, wird empfohlen die gewünschten Haltekräfte dem ZFSV-Hersteller in einer sinnvollen Bandbreite vorzugeben.

2.1 Positionsplan

Neben den Anforderungen an einen Positionsplan nach FW401 Teil 10 Abschnitt 2.1 sind bei der Verwendung von ZFSV die Rezepturen und geometrischen Randbedingungen der unterschiedlichen Trassenabschnitte anzugeben. Je nach Verfahren können z.B. bei Wiederverwendung des Aushubs etc. angepasste Rezepturen erforderlich sein. Es muss ersichtlich werden, welche ZFSV mit welchen Rezepturen an welcher Stelle je Abschnitt zum Einsatz kommen.

Im Bereich der Dehnpolster sind offenzellige Dehnpolster gegen das Eindringen von Suspensionsanteilen des ZFSV zum Beispiel durch eine Folie zu schützen. Hierdurch wird eine Verhärtung des Dehnpolsters verhindert.

2.2 Gleitbereich, Haftbereich, Übergangsbereich

2.2.1 Gleitbereich

Im Gleitbereich verschiebt sich das Rohr in Richtung der Dehnzonen. In der Kontaktzone zwischen Rohr und ZFSV wirkt nach Aushärtung Reibung und Adhäsion. Der Gleitbereich ist im ZFSV daher in der Regel kleiner als im Sand. Werden Dehnpolster im Gleitbereich eingesetzt, ist davon auszugehen, dass bei einem Anhaften der Dehnpolster (Verbundsystem) die Haltekräfte von der axialen Schersteifigkeit des Dehnpolsters abhängen. Sind die Dehnpolster nicht kraftschlüssig mit dem Rohr und dem ZFSV verbunden, stellen sich Haltekräfte nur in

¹ Nach Wagner [3] kommt Typ 2 deutschlandweit nur selten vor und wird für den Fernwärmeleitungsbau aufgrund fehlender Erfahrungen nicht empfohlen

Form von Reibung zwischen Dehnpolster und Rohr ein. Diese können sehr gering sein und sollten dann gleich Null gesetzt werden.

2.2.2 Haftbereich

Im Haftbereich stehen die Dehnungen aus Wärme immer mit den Stauchungen aus der Reaktionskraft mit dem Verfüllmaterial im Gleichgewicht. D.h. auch nach Inbetriebnahme bleibt das Rohr im Haftbereich in Ruhe. Axiale Bodenreaktionen sind verschiebungsabhängig. Die Verschiebung ist im Haftbereich gleich Null, es wirkt daher auf den Rohrmantel nur der Primärspannungszustand nach Installation der Leitung (Erddruck). Die Reibeigenschaften des Bettungsmaterials sind im Haftbereich unbedeutend.

2.2.2 Übergangsbereich

Axiale Bodenreaktionen sind verschiebungsabhängig. Die maximalen Reaktionskräfte werden erst bei einer Relativverschiebung von wenigen Millimetern erreicht. Hieraus ergibt sich ein Übergangsbereich im System in dem die Reaktionskräfte nur anteilig aktiviert wurden. Der Übergangsbereich wird in der Statik nach FW401 T10 auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt. Diese Vereinfachung ist für ZFSV gleichermaßen zulässig.

2.2 Verlegungsmethoden für gerade Rohre, Kaltverlegung, Verlegung mit Vorwärmung

2.2.1 Kaltverlegung (1. Methode)

Die Axialspannungen σ_x werden auf die zulässige Druckspannung des Stahlquerschnitts $R_e / 1,1$ unterhalb der Streckgrenze begrenzt. Die zulässigen Druckspannungen führen über den axialen Dehnungsverbund mit der Dämmung und dem Mantel zur Interaktion mit dem umgebenden Bettungsmaterial. Diese Druckspannungen müssen daher als axiale Scherspannung in der Dämmung und Mantel sicher aufgenommen werden. Im Falle von höheren Spannungen sollte das Bettungsmaterial so eingestellt werden, dass die maximale Scherfestigkeit des Bettungsmaterials gerade überschritten wird und sich der Residualwert einstellt. Zu hohe Spannungen können dann durch zusätzliche Dehnungen kompensiert werden.

2.2.2 Kaltverlegung (2. Methode)

Als Kaltverlegung der 2. Methode wird die betriebliche Selbstvorspannung bezeichnet. Bei dieser Verlegetechnik wird eine plastische Stauchung des Mediumrohres im Haftbereich in Kauf genommen. Eine betriebliche Selbstvorspannung erfordert bei relativ großen Dehnungen eine möglichst konstante Scherspannung in Dehnungsrichtung und zurück. Diese sind im ZFV nur dann zu erwarten, wenn die Adhäsionsspitze überschritten wurde. Die Adhäsionsspitze sollte daher möglichst niedrig eingestellt werden, wobei die Residualscherspannung bei großen Verformungen hoch sein sollte, um die Verschiebungen gering zu halten. Darüber hinaus siehe FW 401 T10 Abschnitt 3.3.2.

2.2.3 Verlegung mit Vorwärmung

Die Rohre werden in der offenen Baugrube vorgewärmt und durch die Verfüllung und nachgelagerten Abkühlung thermisch vorgespannt. Die bei der Vorspannung auftretenden Zugspannungen müssen von dem Rohrleitungsquerschnitt sicher aufgenommen werden. Sie sind gleichermaßen von den Bettungsbedingungen abhängig, wie die Druckspannungen bei der Kaltverlegung. Bei der Verwendung von ZFSV ist damit zu rechnen, dass hohe Festhaltekräfte beim Abkühlen durch die Adhäsionsspitze erreicht werden.

3 Statische Auslegung

3.1 Vorbemerkungen

Es gelten die Ausführungen nach FW 401 Teil 10 Abschnitt 4.1 bis 4.3.3 an dieser Stelle gleichermaßen. Die nachfolgenden Anmerkungen ersetzen den Abschnitt 4.3.4 „Erdlasten“ und anteilig den Abschnitt 4.4.2.1.3 „Erläuterungen zum Bettungswiderstand“ ff. zur Berechnung der Bettungsreaktionen von Sand.

3.2 Bettungsreaktionen

Für die statische Auslegung des Leitungssystems ist die rechnerisch richtige Einschätzung der Bettungsreaktionen des verwendeten Verfüllmaterials wichtig. Es sind zu unterscheiden:

- Die axial angreifenden Schubspannungen um den Rohrumfang, welche die axialen Dehnungen behindern.
- Die lateralen Reaktionsdrücke, die bei der Auslenkung im Bogenbereich aktiviert werden.

3.2.1 Axial wirkende Reaktionen des Bettungsmaterials

Die Axialspannung σ_x , welche im Querschnitt des Mediumrohres wirkt, steht durch den kraftschlüssigen Verbund der Dämmung mit der Ummantelung im Gleichgewicht. Die Ummantelung interagiert mit dem Bettungsmaterial.

Die Charakteristik des Interaktionsverhaltens zwischen der Ummantelung und ZFSV ist im Vergleich zu Sand vereinfacht in Abbildung 1 in einem Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Für den ZFSV ist eine ausgeprägte Adhäsionsspitze zu verzeichnen, die bei den statischen Überlegungen zum Fernwärmenetz insbesondere bei der Inbetriebnahme berücksichtigt werden muss.

Untersuchungen in [1] haben gezeigt, dass die Adhäsionsspitze sobald diese überschritten ist, sich richtungsunabhängig nicht wieder einstellt. Die residualen Scherspannungen sind näherungsweise konstant, können aber über den Werten im Sand liegen.

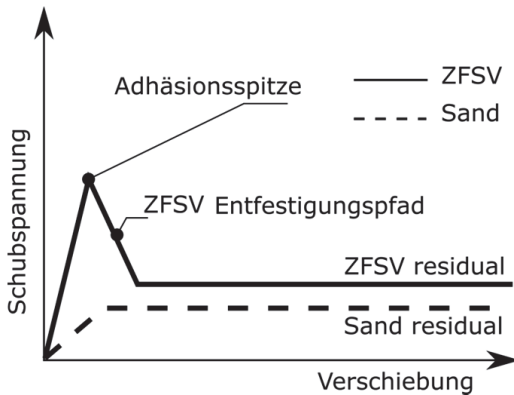


Abbildung 1, Ausbildung der Adhäsionsspitze im ZFSV

In Triaxialversuchen [1] zeigten erstarrte ZFSV ein für Mischböden ähnliches Materialverhalten, welches durch die beiden Bruchkennwerte beim Materialversagen dem inneren Reibungswinkel ϕ' und der Kohäsion c' charakterisiert werden kann.

Für die Bestimmung der Haltekräfte im ZFSV sind beide Scherparameter zu berücksichtigen, da die Kohäsionseigenschaften eines Erdstoffes mit den Adhäsionseigenschaften korrelieren.

Für die Fernwärmestatik ist die resultierende Erddruckkraft über den Rohrumfang von Bedeutung. Die exakte Verteilung ist weniger entscheidend, als die skalare Größe des Erddrucks. Untersuchungen aus [1] zeigen, dass für die Berechnung des Erdruhedruckbeiwertes k_0 im ZFSV bisher keine abgesicherte Berechnungsmethode vorliegt. Daher wird empfohlen die resultierende Erddruckkraft, bis weitere Erkenntnisse vorliegen, mit dem Spannungsniveau am Rohrscheitel oder auf der sicheren Seite auf dem Niveau der Rohrachse zu rechnen (s. Abbildung 2, Ansatz nach MOSER et al. [4]).

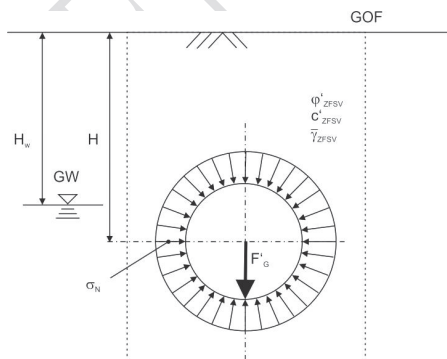


Abbildung 2, Erddruck Normalspannungen im ZFSV

Es gilt

für Grundwasser unterhalb der Rohrachse Gl. 1 ($H_w > H$):

$$\sigma_N = \sigma_0 = \bar{\gamma} \cdot H \quad \text{Gl. 1}$$

für Grundwasser oberhalb der Rohrachse Gl. 2 ($H_w < H$):

$$\sigma_N = \sigma_0 = \bar{\gamma} \cdot H_w + \bar{\gamma}_A \cdot (H - H_w) \quad \text{Gl. 2}$$

Die Integration über den Rohrumfang liefert die resultierende Erddruckkraft pro Meter senkrecht zum PE-Mantel nach MOSER et al. (Gl. 3).

$$F'_N = \sigma_0 \cdot \pi \cdot D_a \quad \text{Gl. 3}$$

Für die Haltekraft im ZFSV pro Meter gilt Gl. 4.

$$F'_H = \mu \cdot (F'_N + F'_G) + a \quad \text{Gl. 4}$$

Dabei ist

$$\mu = \tan(2/3 \cdot \varphi'_{ZFSV})$$

F'_N = resultierende Erddruckkraft pro Meter (s.o.)

F'_G = Gewichtskraft des Rohres pro Meter

a = Adhäsionsspannung

Die Adhäsionsspannung ist von der Kohäsion abhängig. Sowohl die innere Reibung also auch die Adhäsion werden durch die Konsistenz, Porenanteil, Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Anteil Tonminerale etc. des Bettungsmaterials beeinflusst. Die Adhäsion kann abgeschätzt werden, wenn in bodenmechanischen Laborversuchen c' oder c_u ermittelt wurde.

Ein allgemein bekannter Ansatz zur Korrelation der Scherfestigkeit des undrainierten Bodens c_u mit der Adhäsion a wird in DIN 1055 und DIN 4085 im Zusammenhang mit der Berechnung des Erddrucks auf Wände gemacht. Danach darf bei einem unkonsolidierten, weichen, bindigen Boden unabhängig von der Rauigkeit der Wand eine Adhäsion angesetzt werden. Die anzusetzende Adhäsion a beträgt hiernach die Hälfte der undrainierten Scherfestigkeit c_u .

Sind die Scherparameter φ' und c' bekannt, kann auf Grundlage der Untersuchungen von POTYONDY die Adhäsion mit $a=0,3 \cdot c'$ abgeschätzt werden [5]. Unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen, kann die Haltekraft im ZFSV in Abhängigkeit der Scherfestigkeit des Bodens unter Einführung eines Haftbeiwertes α wie folgt abgeschätzt werden:

$$F'_H = \tan\left(\frac{2}{3} \cdot \varphi'_{ZFSV}\right) \cdot (F'_N + F'_G) + \alpha \cdot c \quad \text{Gl. 5}$$

Im U.S.-amerikanischen Raum wird die Abhängigkeit des Haftbeiwertes von der Kohäsion nach ALA 2001 wie folgt abgeschätzt:

$$\alpha = 0,608 - 0,123 \cdot c - \frac{0,274}{c^2 + 1} + \frac{0,695}{c^3 + 1} \quad \text{Gl. 6}$$

Es wird daher empfohlen die Haltekraft im ZFSV durch die Verwendung des Haftbeiwertes nach Tabelle 3-1 zu berechnen.

<i>Haftbeiwert α der axialen Haltekraft F'_H</i>		
<i>Kohäsion</i>	<i>Haftbeiwert α</i>	<i>Quelle</i>
c'	0,3	POTYONDY
c_u	0,5	DIN 1055, DIN 4085
c', c_u	Gl. 6	ALA 2001

Tabelle 3-1

In [1] wurden für die untersuchten ZFSV sowohl c' als auch c_u in Triaxialversuchen bestimmt. Hieraus lassen sich Wertebereiche für Adhäsion im ZFSV ableiten, wobei im Anwendungsfall die Vergleichbarkeit zwischen den in [1] untersuchten ZFSV und den zur Verwendung kommenden ZFSV gegeben sein muss. Andernfalls sind die Werte φ' und c' bzw. c_u für das jeweilige Material gesondert zu bestimmen.

3.2.1 Lateral wirkende Reaktionen des Bettungsmaterials

In Bereichen von Richtungswechseln der Leitung entspricht die axiale Dehnung der lateralen Verschiebung des abzweigenden Leitungsstranges. Der Bogen wird daher in das Bettungsmaterial gedrückt und lateral belastet. Um hohe Biegemomente im Brechpunkt und hohe Druckbeanspruchungen in der Dämmung zu vermeiden, wird in der Regel eine definierte Bewegungsfreiheit durch Dehnpolster erreicht. Dehnpolster sind im ZFSV zur Vermeidung eines Strukturbruchs zu empfehlen.

Für die Berechnung einer Rohrstatik sind die Verfahren nach EN 13941:2016 unter Berücksichtigung der Kohäsionsanteile zu verwenden. Die Kurven sind im Anhang 3 zusammengestellt. Damit liegt ein grundsätzlicher Berechnungsalgorithmus für Bettungsreaktionsspannung im ZFSV vor und sollte entsprechend angewendet werden. Es gilt Gl. 7.

$$p_u = K_q \cdot \sigma_N + 0,7 \cdot \alpha_L \cdot K_c \cdot c' \quad \text{Gl. 7}$$

Nach EN 13941 werden für α_L die Optionen 0,6 für offene Verlegung und 1,0 für geschlossene Verlegung vorgegeben. Weitere Ausführungen sind der EN 13941 zu entnehmen.

3.2.2 Dehnpolster

Da im Bereich der Dehnpolster kaum axiale Schubspannungen vom Rohrmantel auf das ZFSV übertragen werden können, darf im Dehnpolsterbereich keine Haltekraft angesetzt werden. Das heißt $F_H=0$.

3.2.3 Abfahren der Leitung und Wechsellasten

Wird die Adhäsionsspitze durch eine entsprechende Verschiebungen überschritten wird die Vernadelung im ZFSV gebrochen und es stellen sich niedrigere Haltekkräfte

als beim Erreichen der Adhäsionsspitze ein (s. Abbildung 1). In [1] wurde festgestellt, dass die residualen Haltekräfte im Bereich von 10%-30% der Adhäsionsspitze liegen. Für das Abfahren der Leitung und den Ermüdungsnachweis wird daher empfohlen auf der sicheren Seite nur 10% der maximalen Haltekraft $F_{H'}$ anzusetzen.

Informativ:

Bei den oben genannten Formeln handelt es sich um praxisnahe Ansätze, die Vereinfachungen enthalten. Die darin enthaltenen Unsicherheiten sind dabei mit den Unsicherheiten bei der Verwendung von Sand und den in Regelwerken angegebenen Berechnungsverfahren vergleichbar.

Die Spannungsverteilung des Erddrucks im Sand nach FW 401 T10 gilt nur für Sande und ist im ZFSV ungültig. Im Abwasserbereich wird gemäß DWA-Arbeitsblatt 139 davon ausgegangen, dass die Anwendung einer Regelstatik bei einem Schrumpfmaß von $< 0,15\%$ gegeben ist. Weitere Kriterien für den Nachweis der Bodenähnlichkeit von ZFSV sind in Abschnitt 7.3.4.2 im DWA-Arbeitsblatt 139 angegeben.

Für ist eine höhere Genauigkeit bei der Berechnung sind numerische Verfahren zu empfehlen in denen in einem Stab-Feder-Modell die Kontaktmechanik nach Abbildung 1 als Federarbeitslinie abgebildet wird [5]. Hierfür sind die Werte für die Adhäsionsspitze, die residuale Haltekraft, die Steigung für den Erstbelastungspfad und die Steigung des Entfestigungspfades vom ZFSV Hersteller zu liefern.

4 Zitierte Normen und Technische Regeln

Arbeitsblatt FW401 Teil 1, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Anwendungsbereich und Gliederung, 2007

Arbeitsblatt FW 401 Teil 10, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Statische Auslegung; Grundlagen der Spannungsermittlung - 2007

Arbeitsblatt FW401 Teil 12, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Bau und Montage; Organisation der Bauabwicklung, Tiefbau, 2007

H ZFSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau. H ZFSV Ausg. 2012. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1, Regelwerke, 563)

DIN EN 13941-1:2016-09 – Entwurf, Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Heißwasser-Fernwärmenetze - Teil 1: Auslegung; Deutsche und Englische Fassung

prEN 13941-1:2016, und Teil 2: Installation; Deutsche und Englische Fassung prEN 13941-2:2016 , Beuth Verlag, Berlin, 2016

DIN 1055, Lastannahmen für Bauten, Bodenkenngrößen, Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel, 2007

DIN 4085, Berechnung des Erddrucks, Beuth Verlag, Berlin, 2017

Gemeinschaftspublikation DIN EN 1610 und DWA-A 139 Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen (März 2019)

American Lifeline Alliance, ALA. Richtlinien für die Auslegung von erdverlegten Stahlrohren, FEMA. 2001

5 Literatur

[1] „EnEff:Wärme, Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“, Abschlussbericht im BMWi-Forschungsvorhaben FKZ 03ET1063D und FKZ 03ET1063B, ISBN 3-89999-068-4, Hrsg. AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK, Juni 2017

[2] Schmitt, Frieder; Caspar, Jürgen; Holler, Stefan, „Wärmetransport im Wettbewerb zu dislozierter Wärmeerzeugung und Maßnahmen zur Senkung der Baukosten von Transportleitungen“. Frankfurt am Main: AGFW Forschung und Entwicklung Heft 28, 2014 und Schmitt, Frieder; Caspar, Jürgen; Holler, Stefan „Bautechnische Entwicklungen von Fernwärme-Transportleitungen“. Frankfurt am Main: AGFW Forschung und Entwicklung Heft 32, 2015.

[3] Wagner, Bernd, „Ein Beitrag zur axialen Bettung von Kunststoffmantelrohren der Fernwärme in Zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV)“, Hrsg. Wolfram Kudla, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Techn. Universität Bergakademie Freiberg, 2017

[4] Moser U., Wieland M., „Statische Probleme bei erdverlegten Fernheizleitungen“, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 7, ETH Zürich, 1972

[4] Potyondy, J.G., „Skin friction between Various Soils and construction materials“, Geotechnique, 11, 4, S. 339-353, 1961

[5] Wolfrum D., Neidhart T., „District Heating pipes buried in Temporarily Flowable Backfill Materials“, Energy Procedia, Elsevier, 16th International Symposium on District Heating and Cooling, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.181> DHC2018, Hamburg, Germany, 2018

[6] Weidlich I., Banushi G., Doyle L., Grajcar M., „Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau“, Abschlussbericht 2019-AF02-ZFSV, HafenCity Universität Hamburg

ENTWURF

Merkblatt FW ZFSV, Teil 2

Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze in zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen

- Qualitätssicherung, Einbau, Ausbau, Wiedereinbau, Dokumentation –

Juni 2019

ENTWURF

Inhalt

0	Geltungsbereich.....	3
1	Allgemeines	3
2	Qualitätssicherung.....	5
3	Einbau, Ausbau und Wiedereinbau	7
4	Dokumentation	9
5	Zitierte Normen und Technische Regeln	10
6	Literatur	11

0 Geltungsbereich

Für das vorliegende Merkblatt gilt der Geltungsbereich gemäß Arbeitsblatt FW401 Teil 1 sinngemäß. Es wird den mit der Planung, Bauausführung und dem Betrieb von KMR in zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen betrauten Personen eine zielgerichtete Arbeitsunterlage zur Verfügung gestellt. In den Teilen des Merkblatts werden die Zusammensetzung und Lieferung, Qualitätssicherung, Einbau, Ausbau und Wiedereinbau und die Dokumentation für in zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen verlegte Kunststoffmantelrohre beschrieben.

Dieses Arbeitsblatt gilt für Kunststoffmantelrohrleitungen in Fernwärmenetzen für Betrieb mit Warmwasser und Dauerbetriebstemperaturen von 120°C und für kurzzeitigen Betrieb mit Spitzentemperaturen von 140°C.

In dem vorliegenden Merkblatt FW ZFSV Teil 2 sind die praktischen Grundlagen der Qualitätssicherheit beim Fernwärmeleitungsbau in zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllmaterialien dargestellt. Die Grundlagen der Spannungsermittlung sind in dem Merkblatt FW ZFSV Teil 1 enthalten.

Das vorliegende Merkblatt wurde in Ergänzung für das Arbeitsblatt AGFW FW 401 Teil 12 entwickelt. Die Ausführungen in FW 401 Teil 12 gelten auch bei der Verwendung von ZFSV gleichermaßen. Die Abschnitte 3.6.1.2 „Verfüllen der Leitungszone mit fließfähigen Verfüllmaterialien“ und 3.6.3.4 „Fließfähige Verfüllmaterialien“ sind durch die AGFW ZFSV Merkblätter zu ersetzen.

1 Allgemeines

ZFSV sind Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen, die ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie, allein unter dem Einfluss der Schwerkraft in Hohl- und Zwischenräume fließen und diese vollständig ausfüllen. Die Verfüllbaustoffe erstarren nach einem definierten Zeitraum und weisen mechanische und physikalische Eigenschaften zuvor definierter Anforderungen auf und müssen diese langfristig gewährleisten. Mischungen von Bindemitteln oder Zusätzen für die Herstellung von ZFSV werden als Compound bezeichnet.

Nach ZTV A-StB sind Bereiche der Leitungszone, die sich nicht einwandfrei verdichten lassen mit Beton, Porenbeton oder Gemischen aus Boden und Bindemitteln zu verfüllen, sofern sich dies nicht nachteilig auf die Rohbettung, die Leitungen und den Oberbau auswirkt. ZFSV sind hierfür nach ZTV A-StB zu empfehlen, da sie durch eine Bodenähnlichkeit im Endzustand bei fachgerechtem Einbau keine erhöhten Eigenlasten, starre Auflager oder erschwerte Abtragbarkeit im Revisionsfall darstellen.

Darüber hinaus können ZFSV sowohl in der Leitungszone als auch in der Verfüllzone zur Anwendung kommen. Im Fernwärmeleitungsbau sind dabei die zu erwartenden Haltekraften im Betrieb (siehe AGFW ZFSV Merkblatt 1) und die Wiederaushubfähigkeit wesentliche Anforderungen für diesen Bereich.

ZFSV besteht meistens aus den Komponenten Boden, Wasser, hydraulischen Bindemitteln und Bentonit (Schichtsilikat). Die Eigenschaften des ZFSV-Endprodukts werden durch die Eigenschaften der genannten Materialien und das Mischungsverhältnis beeinflusst. Eine Rezeptur muss festgelegt werden, sowie der Zeitpunkt der Vermischung der Bestandteile insbesondere der Wasserzugabe. Eine Marktanalyse des AGFW hat gezeigt, dass sich ZFSV in drei Typen unterteilen lassen:

- Typ 1 mit hydraulischen Zusatzstoffen
- Typ 2 mit schichtsilikatischen Zusatzstoffen¹
- Typ 3 mit hydraulischen und schichtsilikatischen Zusatzstoffen

ZFSV ist für den Einbau fließfähig und zeichnet sich durch ein anschließendes Aushärten aus, welches durch die Zugabe von Bindemitteln gesteuert wird. ZFSV verhält sich daher grundsätzlich anders als ein Sand. Es wird deshalb empfohlen entsprechende Fachplaner hinzuzuziehen und nur zertifizierte ZFSV-Hersteller zu beauftragen.

Je nach Herkunft der jeweiligen Bestandteile des ZFSV können die zur Verwendung kommenden Böden und Baustoffe für ZFSV unterschieden werden in

- Böden von der Baustelle,
- Böden und Baustoffe aus Aufbereitungsanlagen,
- Böden und Baustoffe aus Gewinnungsbetrieben.

Eine Übersicht nach H-ZFSV FGSV ist in Abbildung 1-1 dargestellt.

¹ Nach Wagner [2] kommt Typ 2 deutschlandweit nur selten vor und wird für den Fernwärmeleitungsbau aufgrund fehlender Erfahrungen nicht empfohlen.

Übersicht der Böden und Baustoffe der ZFSV

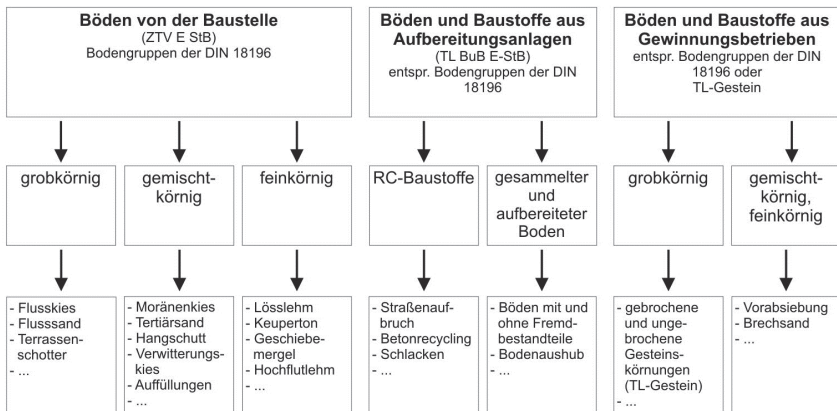


Abbildung 1-1, Übersicht der zur Verwendung kommenden Böden und Baustoffe nach [H ZFSV FGSV]

2 Qualitätssicherung

Die Notwendigkeit von Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Verwendung von ZFSV ist gegeben. Das Materialverhalten ist grundsätzlich anders als bei der Standardbettung mit Sand und erfordert eine besondere Sachkenntnis. Um diskontinuierliche Bettungsverhältnisse zu vermeiden ist eine gleichbleibende Qualität und Homogenität von ZFSV zu gewährleisten. Der Einsatz von kontrollierten Produkten mit einem Gütesiegel ist daher zu empfehlen. Aufgrund der Vielfalt der möglichen ZFSV auf dem Markt werden keine Vorgaben an die Rezeptur gegeben. Vielmehr werden die erforderlichen physikalischen Eigenschaften beschrieben, die in entsprechenden Eignungsprüfungen nachzuweisen sind. Erfahrungsgemäß sind Einzelkörner mit einem Durchmesser $d > 20$ mm nicht geeignet und als beim Zuschlagwasser sollte auf Trinkwasserqualität geachtet werden [1].

Haltekräfte

Für die Rohrstatik und damit den sicheren Betrieb müssen die auftretenden Haltekräfte der Leitung im ZFSV möglichst genau bekannt sein. Bei der thermischen Ausdehnung ist dies ein Haftverbund in Rohrachse und in Bogenbereichen und Abzweigen der laterale Bettungsdruck lateral zur Rohrachse. Ausführungen zur Berechnung sind dem AGFW ZFSV Merkblatt Teil 1 und [3, 4] zu entnehmen. Maßgebende Eingangsgrößen für die Berechnung sind die wirkenden bodenmechanischen Scherparameter und das Eigengewicht des ZFSV.

Die Scherparameter können in Kontaktscherversuchen zwischen ZFSV und dem Material der Rohrummantelung direkt ermittelt werden. Aufgrund der niedrigen

Auflastspannungen im Rohrgraben sind Versuche im Großrahmenschergerät nach EN ISO 12957-1 zu empfehlen. Alternativ kann der innere Reibungswinkel und die Kohäsion in Triaxialversuchen nach DIN EN ISO 17892-8 und -9 bestimmt werden und die Kontaktmechanik durch Korrelationen beschrieben werden (siehe AGFW ZFSV Merkblatt Teil 1). Das Eigengewicht des ZFSV kann durch die Dichtebestimmung nach DIN EN ISO 17892-2 und DIN EN 12390-2 ermittelt werden.

Wiederaushubfähigkeit

Für Revisionszwecke oder Netzverdichtung ist eine Wiederaushubfähigkeit von ZFSV zu gewährleisten. Hierfür muss eine langfristige Zunahme der Festigkeit des Verfüllbaustoffs vermieden werden. In der Regel ist daher eine leichte Wiederaushubfähigkeit für eine Lösbarkeit mit einfachen Werkzeugen von Hand erforderlich. Dies korreliert nach H-ZFSV FGSV zum Beispiel mit einer Druckfestigkeit von $\leq 0,3 \text{ N/mm}^2$. Weitere Nachweismöglichkeiten sind dem Hinweisblatt der FGSV zu entnehmen (H-ZFSV FGSV).

Tragfähigkeit

Für die Vermeidung von Setzungen muss die Grabenverfüllung eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Eine wichtige Kenngröße für die Tragfähigkeit ist der Verformungsmodul. Insbesondere zur Vermeidung von Oberflächensetzungen gelten für das Planum die Anforderungen nach ZTV E-StB. Eine ausreichende Verdichtung für nachfolgende Überbaubarkeit bei üblichen Verfüllmaterialien kann auf dem Planum mit einem E_{v2} -Wert $\geq 45 \text{ MN/m}^2$ im Plattendruckversuch nach DIN 18134 nachgewiesen werden. Dies wird in der Regel auch von ZFSV erwartet. Dabei ist es oft schwer den Wert aufgrund der gegenläufigen Anforderungen zur unerwünschten langfristigen Verfestigung unter drei Tagen Standzeit zu erreichen. Ist eine schnelle Überbauung erforderlich, wird empfohlen die oberen 10 cm ZFSV durch eine verdichtete Schottertragschicht zu ersetzen. Hierdurch lassen sich die erforderlichen Verdichtungswerte auch früher nachweisen.

Fließfähigkeit

Die anfängliche Fließfähigkeit ist eine wesentliche Eigenschaft von ZFSV. Sie ist entscheidend für die hohlraumfreie Verfüllung bzw. Selbstverdichtung. Als Maß für die Fließfähigkeit dient das Zieh- oder Ausbreitmaß. Die Bestimmung des Zieh- oder Ausbreitmaßes erfolgt nach TP BF-StB, Teil F 2.1. Erfahrungsgemäß ist die Fließfähigkeit bei einem Zieh- oder Ausbreitmaß von mindestens 60 cm gegeben.

Volumenstabilität

Die Volumenstabilität wird durch das Absetzmaß gemäß DIN EN 445 oder das Schwellmaß im CBR-Versuch nachgewiesen. Tabelle 2-1 zeigt Anforderungen in Anlehnung an Floss, R., Handbuch ZTVE – Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, 3. Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2006, S. 254

Anforderungen an die Volumenstabilität		
<i>geringe</i>	<i>mittlere</i>	<i>Hohe</i>
> 1 %	> 0,5 bis 1 %	0,2 bis 0,5%

Tabelle 2-1

Größtkorn

Das Größtkorn darf die Grenzen nach EN 13941 nicht überschreiten, damit die Ummantelung nicht beschädigt wird.

Frostsicherheit

Die Frostsicherheit für Erdstoffe wird nach ZTV-E Stb mittels der Klassen F1, F2 und F3 klassifiziert. ZFSV ist aufgrund des gebundenen Wassers als F3, frostempfindlich, einzustufen². Höhere Klassen sind nachzuweisen. Dies kann nach TP BF-StB Teil B 11.3 „Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung mit Bindemitteln“ erfolgen.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von ZFSV ist für die Bestimmung der Wärmeverluste vom ZFSV-Hersteller anzugeben. Erfahrungsgemäß liegen die Werte der Wärmeleitfähigkeit von ZFSV im Bereich von 1-2 W/mK. Auf die Wärmeleitfähigkeit optimierte Rezepturen sind möglich. Dabei ist zu beachten, dass bei einer Optimierung der Wärmeverluste die zulässigen Temperaturen am Rohrmantel nach AGFW FW 401 nicht überschritten werden dürfen.

3 Einbau, Ausbau und Wiedereinbau

Einbau

Für die Grabenerstellung und erforderlichen Geometrien gelten die Ausführungen nach AGFW FW 401 Teil 12 und DIN 4124 sinngemäß. Ist ein Verbau erforderlich muss der Erhärungszeitraum des ZFSV genau auf den Termin des Verbauziehens abgestimmt werden. Hierzu muss die zeitliche Entwicklung der Fließfähigkeit mit Zieh- oder Ausbreitmaßen oder die Fließgrenze mit der Viskosaage in der Eignungsprüfung ermittelt werden. Hat das ZFSV vor dem Ziehen des Verbaus die Fließfähigkeit verloren bildet sich eine offene Verbauspur, die nachverfüllt werden muss. Im ungünstigsten Fall lässt sich der Verbau aufgrund hoher Adhäsionskräfte im ZFSV nicht mehr entfernen.

Beim Einbau sind die Witterungsbedingungen zu beachten. Der Einbau von ZFSV ist bei Frost ohne Winterbaumaßnahmen, bei Dauerregen und bei Hitze über 35°C Umgebungstemperatur nicht zulässig.

² Die Frostsicherheit von ZFSV wurde bisher nicht wissenschaftlich untersucht. Es ist bisher nicht geklärt wie die Struktur des jeweiligen ZFSV auf die Frostbelastung reagiert. Die obigen Festlegungen liegen daher auf der sicheren Seite.

Um ein Entmischung zu vermeiden, sollte die Schütthöhe von ZFSV einen Meter nicht überschreiten.

Bautechnisch können die Leitungszone und die Verfüllzone unabhängig voneinander betrachtet werden. ZFSV können je nach Anforderungen in beiden Bereichen ganz oder teilweise eingesetzt werden. Hieraus ergeben sich verschiedene Bauweisen, die bisher in der Praxis zum Einsatz gekommen sind und beispielhaft in Abbildung 3-1 dargestellt sind. Eine vollständige Verfüllung mit ZFSV zeigt die Variante I. Die teilweise Verfüllung mit ZFSV die Variante II bis IV. In der Variante IV ist wird das Planum durch eine 10 cm Kiesschicht für eine schnelle Überbaubarkeit realisiert.

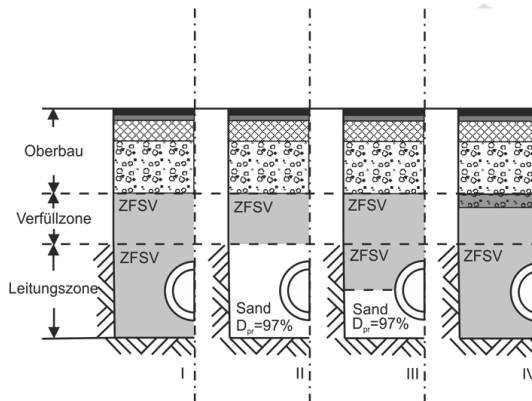


Abbildung 3-1, Grabenbauweisen mit ZFSV

Für die Anforderungen an die Leitungszone können andere Qualitätsanforderungen als in der Verfüllzone gelten. Die Unterschiede sind in Tabelle 3-1 mit Bezug auf den Anfangs- oder Endzustand dargestellt.

Anforderung	Leitungszone	Verfüllzone	Anfangs-zustand	End-zustand
Definierte Haltekräfte	X	-	-	X
Wiederaushubfähigkeit	X	X	-	X
Tragfähigkeit	x	X, hohe Anforderungen insbesondere beim Planum	-	X
Fließfähigkeit	X	X	X	-
Frostsicherheit	-	X	-	X
Wärmeleitfähigkeit	X	x	-	X

Tabelle 3-1

Die Dämmung der Kunststoffmantelrohre begünstigt die Auftriebskräfte des Rohres während der flüssigen Phase des ZFSV. Daher sind beim Einbau die Rohre gegen Auftrieb zu sichern. Dies kann durch Haltebänke oder spezielle Auftriebskonstruktionen erfolgen. Zur Herstellung von Auflager- und Haltungsbanke

sowie zur Abgrenzung von Verfüllabschnitten mit ZFSV ist eine steifere Konsistenz erforderlich. Genauere Ausführungen hierzu sind im H-ZFSV zu finden.

Die Verwendung des Aushubs aus der Grabenerstellung kann ganz oder teilweise möglich sein. Unkontaminierte, nicht bindige Erdstoffe sind hierfür geeignet. Nach FW 401 Teil 12 Abschnitt 3.4 sind ausgeprägt plastische feinkörnige Böden nicht für den Wiedereinbau geeignet. Bei der Verwendung von ZFSV kann die Rezeptur so eingestellt werden, dass dies möglich wird. Böden mit organischen Bestandteilen sind generell nicht zu empfehlen.

Der Einsatz von ZFSV in strömendem Grundwasser ist gesondert zu untersuchen und die Eignung ist nachzuweisen. Ein Festigkeitsverlust durch das Ausspülen von Zementanteilen ist zu vermeiden. Dies kann durch eine Anforderung an die Wasserdurchlässigkeit des ZFSV von $k_f=10^{-8}$ m/s als gegeben betrachtet werden.

Die Verwendung von Recyclingbaustoffen als Grundmaterial für ZFSV ist möglich. Dabei sind die Anforderungen an das Recyclingmaterial nach AGFW FW 401 Teil 12 zu erfüllen und die Rezepturen sind auf das recycelte Grundmaterial abzustimmen, sodass die Anforderungen an das Endprodukt erfüllt werden. Insbesondere unzulässige Nacherhärtungen sind zu vermeiden.

Ein Beispiel für ein Leistungsverzeichnis für den Einbau von ZFSV ist in [1] enthalten.

Muffensysteme, deren Durchmesser vom Durchmesser des Grundrohres abweichen, müssen im Gleitbereich mit einer Schaumstoffumhüllung geschützt werden, deren Dicke mindestens der halben Durchmesserdifférenz entspricht und welche 10 cm über das jeweilige Muffenende ragt.

Ausbau von ZFSV

Der Ausbau von ZFSV sollte mit leichten Werkzeugen von Hand möglich sein. Eine leichte Wiederaushubfähigkeit ist über den Betriebszeitraum der Leitung von mindestens 30 Jahren vorzusehen (vgl. EN 13941).

Wiedereinbau

Der Wiedereinbau von ZFSV ist möglich. Bei der Aufnahme und dem Aufbrechen des ZFSV werden die Verbindungen gebrochen und müssen durch eine neue Rezeptur für den Einbau wieder ermöglicht werden. Sollen entnommene ZFSV wiedereingebaut werden, ist für das entsprechende Verfüllgemisch eine eigene Eignungsprüfung vorzusehen.

4 Dokumentation

Eine abschnittsweise sorgfältige Dokumentation der mit ZFSV verfüllten Bereiche ist vorzusehen. Dabei sind insbesondere die eingesetzten Materialien, die tatsächlich verfüllten Geometrien, spätere Aufgrabepunkte und Wiederverfüllungen inklusive der

verwendeten Rezepturen festzuhalten. Weiterhin sind die üblichen in Bautagebüchern relevanten Daten, wie zum Beispiel die Wetterbedingungen, zu dokumentieren.

Zur Kontrolle der physikalischen Eigenschaften sind baubegleitend Proben zu erstellen und zu dokumentieren. Die Proben sind erschütterungsfrei zu gewinnen und zu transportieren und wasser- und luftdicht bei konstanter Raumtemperatur einzulagern. Die baubegleitenden Prüfungen an den Proben sind zu dokumentieren und zu archivieren.

5 Zitierte Normen und Technische Regeln

Arbeitsblatt FW401 Teil 1, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Anwendungsbereich und Gliederung, 2007

Arbeitsblatt FW 401 Teil 10, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Statische Auslegung; Grundlagen der Spannungsermittlung - 2007

Arbeitsblatt FW401 Teil 12, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Bau und Montage; Organisation der Bauabwicklung, Tiefbau, 2007

H ZFSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau, H ZFSV Ausg. 2012. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1, Regelwerke, 563)

EN 13941, Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating, CEN/TC 107, Deutsches Institut für Normung e.V. Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik (NHRS), Beuth Verlag, Berlin, 2016

DIN 1055, Lastannahmen für Bauten, Bodenkenngößen, Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel, 2007

DIN 4085, Berechnung des Erddrucks, Beuth Verlag, Berlin, 2017

DWA-Arbeitsblatt 139 Gemeinschaftspublikation DIN EN 1610 und DWA-A 139 Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen (März 2019)

EN ISO 12957-1, Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test, Beuth Verlag, Berlin, 2005

DIN EN ISO 17892-8 und -9, Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 8 „Unkonsolidierter undrännierter Triaxialversuch“ und Teil 9: „Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche“, Beuth Verlag, Berlin, 2018

DIN EN ISO 17892-2, Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 2 „Bestimmung der Dichte des Bodens“, Beuth Verlag, Berlin, 2014

DIN EN 445 Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren; Beuth Verlag, Deutsche Fassung EN 445:2007

6 Literatur

[1] „EnEff:Wärme, Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“, Abschlussbericht im BMWi-Forschungsvorhaben FKZ 03ET1063D und FKZ 03ET1063B, ISBN 3-89999-068-4, Hrsg. AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK, Juni 2017

[2] Wagner, Bernd, „Ein Beitrag zur axialen Bettung von Kunststoffmantelrohren der Fernwärme in Zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV)“, Hrsg. Wolfram Kudla, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Techn. Universität Bergakademie Freiberg, 2017

[3] Wolfrum D., Neidhart T., “District Heating pipes buried in Temporarily Flowable Backfill Materials”, Energy Procedia, Elsevier, 16th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC2018, Hamburg, Germany, 2018

[4] Weidlich I., Banushi G., Doyle L., Grajcar M., „Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau“, Abschlussbericht 2019-AF02-ZFSV, HafenCity Universität Hamburg

Forschung und Entwicklung | Heft 43



EnEff:Wärme Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung

www.agfw.de



**Bestellen Sie online
unter shop.agfw.de!**

ZFSV Bettungsmaterial

Spannungsermittlung

ZFSV Bettungsmaterial

Qualitätssicherung Sp

ZFSV Bettungsmaterial

Spannungsermittlung

ZFSV Bettungsmaterial

Qualitätssicherung Sp

ZFSV Bettungsmaterial

Spannungsermittlung