



ZUR BEMESSUNG VON IN ZFSV VERLEGTEN ROHRLEITUNGEN Einsatz von Flüssigboden

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus,
Leibniz Universität Hannover

Das Forschungsvorhaben wurde durch die Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) gefördert und durch die Mitglieder der Betreuungsgruppe „Flüssigboden“ fachlich unterstützt.

Sonderdruck aus THIS
Ausgabe 3/2018

Bauverlag BV GmbH
Avenwedder Str. 55, 33311 Gütersloh
www.bauverlag.de

Zur Bemessung von in ZFSV verlegten Rohrleitungen

Einsatz von Flüssigböden

ZFSV bzw. Flüssigböden werden vermehrt auch bei der Verfüllung von Leitungsgräben eingesetzt. Das Material verspricht eine gleichmäßige Bettung des Rohres. Es fehlt aber bislang eine anerkannte Bemessungsrichtlinie.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus,
Leibniz Universität Hannover

1 Einleitung

Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllmaterialien (Zfs-Verfüllmaterial oder ZFSV, oft auch „Flüssigböden“ genannt) sind Böden bzw. Korngemische, welche durch Zugabe von Wasser, Bindemittel (meist Zement) und weiterer Additive wie z. B. Bentonit zu einem anfänglich fließfähigen Material verarbeitet werden. Durch die Hydratation des Bindemittels weist das Material nach einer gewissen Zeit feste Konsistenz auf, wobei Steifigkeit und Festigkeit zeitabhängig zunehmen. Sowohl die Zeit, in der das Material flüssig ist, als auch der zeitliche Verlauf und die Endwerte von Steifigkeit und Festigkeit sind durch die Rezeptur in gewissen Grenzen beeinflussbar. Typische Verläufe der zeitlichen Steifigkeitszunahme von Zfs-Verfüllmaterialien zeigt Bild 1.

ZFSV werden in den letzten Jahren vermehrt im Erdbau und insbesondere bei der Verfüllung von Leitungsgräben eingesetzt, da dieses Material verspricht, eine gleichmäßige und tragfähige Verfüllung in der gesamten Leitungszone zu erzielen. Vorteil ist dabei die hohe

Fließfähigkeit und somit selbstverdichtende Wirkung des Materials. Diese Eigenschaften führen dazu, dass anders als bei den herkömmlichen Verfahren (lagenweiser Einbau und Verdichtung von Verfüllmaterial) eine gleichmäßige Bettung des Rohres über den gesamten Umfang erzielt werden kann. Des Weiteren können Hohlräume bzw. Einbrüche, die gegebenenfalls beim Ziehen des Verbaus entstehen, vermieden werden.

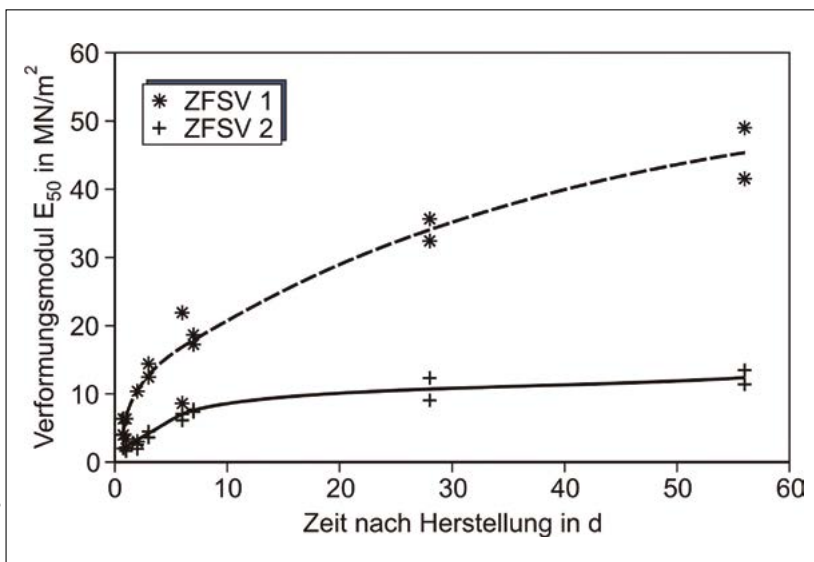
Arsic [1] hat am IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen, durchgeführte Versuche mit duktilen Gußrohren DN 800 ausgewertet. Es wurden zwei unterschiedliche Zfs-Verfüllmaterialien eingesetzt. Die gemessenen Rohrbeanspruchungen wurden u. a. mit den Ergebnissen bei Einbettung in einem Kies-Sand-Gemisch verglichen. In den Versuchen wurden im Einbauzustand bei einer Erdüberdeckung von rd. 3,2 m über Rohrscheitel keine signifikanten Unterschiede in den Dehnungen zwischen den unterschiedlich eingebetteten Rohren festgestellt. Allerdings lagen die Beanspruchungen bei den mit ZFSV eingeebneten Rohren tendenziell niedriger. Bei Oberflächenbelastung waren die Veränderungen der Dehnungen bei den konventionell eingeebneten Rohren ebenfalls tendenziell größer.

Ein entscheidender Vorteil der in ZFSV gebetteten Leitungen ergab sich beim Ziehen der als Grabenverbau eingesetzten Stahlleichtprofile 28 Tage nach Einbau. Hier wurden nahezu keine Effekte hinsichtlich der Rohrbeanspruchung festgestellt, während die herkömmlich eingebetteten Rohre deutliche Erhöhungen der Beanspruchungen zeigten.

Durch spezielle Plattendrucktests aus dem Rohr heraus konnte in den Untersuchungen auch gezeigt werden, dass die Bettung der Rohre in ZFSV deutlich gleichmäßiger war als die Bettung in konventionellem Schüttmaterial.

Nach diesen Untersuchungen können in ZFSV gebettete Rohrleitungen ein günstigeres Tragverhalten aufweisen als in traditionellem Verfüllmaterial (lagenweise verdichteter Boden) gebettete Leitungen. Um diesen Vorteil nutzen zu können, fehlt es aber bislang an einer anerkannten Bemessungsrichtlinie. Wünschenswert

Bild 1: Zeitabhängigkeit der Steifigkeit von Zfs-Verfüllmaterialien (Verformungsmodul E_{50} aus einaxialem Druckversuch).



wäre die Einbindung von Bemessungsregeln in das Arbeitsblatt ATV-DWK-A 127 [2], welches den Stand der Technik bezüglich der statischen Berechnung erdverlegter Rohrleitungen darstellt.

In diesem Beitrag wird ein Konzept beschrieben, nach dem in ZFSV gebettete Rohrleitungen in Anlehnung an das Arbeitsblatt A 127 bemessen werden können. Dieses Konzept umfasst Anforderungen an die Materialien, für die nach dem Verfahren bemessen werden kann, Empfehlungen für die Durchführung der Berechnung und die Wahl der Parameter und schließlich zusätzliche Nachweise, welche sich aus der anfänglich flüssigen Konsistenz der Materialien ergeben.

In einer Neufassung des Arbeitsblatts [2] (zukünftige Bezeichnung: DWA-Arbeitsblatt A 127) sollen in ZFSV gelagerte Rohrleitungen ebenfalls behandelt werden. In der DWA-Arbeitsgruppe ES 5.5, welche das Arbeitsblatt A 127 weiterentwickelt und deren Mitglied der Autor ist, wird das nachfolgend beschriebene Konzept derzeit diskutiert.

2 Berechnung der Rohrbelastung gemäß Arbeitsblatt A 127

Die Berechnung der für die statische Bemessung relevanten Lasten auf ein Rohr nach ATV-DWK-A 127 [2] teilt sich auf in die Schritte

- Einordnung der Bodenarten und Festlegung der Grundwerte der Bodenparameter,
- Ermittlung der Vertikallast in Rohrscheitelebe (Lastermittlung),
- Lastaufteilung (unter Berücksichtigung der Rohr-Boden-Interaktion).

Das Tragverhalten eines Rohres hängt wesentlich von den Steifigkeiten des Rohres und des das Rohr umgebenden Bodens ab. Bezüglich des Bodens werden vier Bereiche unterschieden, in denen im Allgemeinen

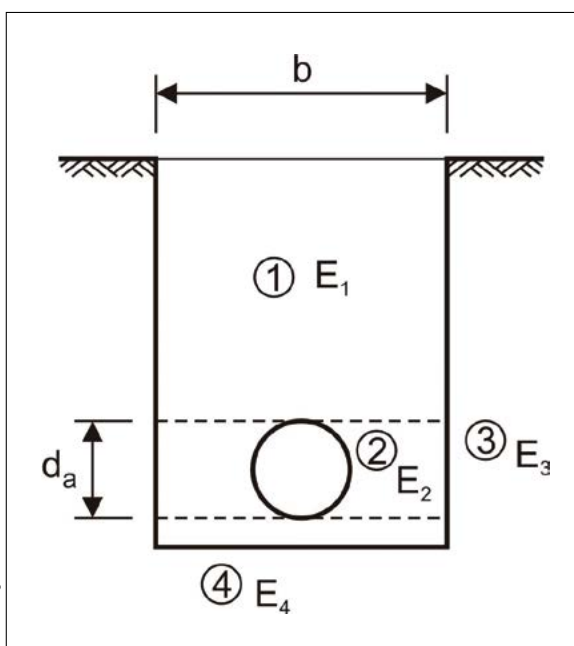


Bild 2: Bodenzone um ein Rohr und zugehörige Verformungsmoduln.

unterschiedliche Steifigkeiten bzw. Verformungsmoduln E zu berücksichtigen sind (Bild 2).

Bei den anstehenden bzw. als Verfüllmaterial vorgesehenen Bodenarten wird eine Zuordnung in eine von vier Bodengruppen G1 bis G4 vorgenommen. Die Gruppe G1 umfasst die nichtbindigen Böden (max. 5% Feinanteil), Gruppe G2 die schwachbindigen Böden (max. 15% Feinanteil) und die Gruppen G3 und G4 bindige Mischböden und Schluffe bzw. Tone. Für jede Bodengruppe werden in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D_{Pr} Verformungsmoduln E_B als Richtwerte angegeben, welche der statischen Berechnung zugrunde gelegt werden können. Für außerhalb des Grabens anstehende gewachsene Böden ist zukünftig (DWA-A 127) eine Abhängigkeit des Verformungsmodulrichtwerts von Lagerungsdichte bzw. Konsistenz statt vom Verdichtungsgrad vorgesehen. Für das innerhalb des Grabens eingesetzte und entsprechend zu verdichtende Material (Bereiche 1 und 2 gemäß Bild 2) bleibt es aber dabei, dass die Verformungsmoduln E_1 und der Grundwert des Verformungsmoduls $E_{2,0}$ vom Verdichtungsgrad abhängen. Welcher Verdichtungsgrad dabei angesetzt werden darf, hängt von der Art des Einbaus (Einbettungs- bzw. Überschüttungsbedingung) ab. Die beste Einbaubedingung 0 (Überschüttungsbedingung A0 bzw. Einbettungsbedingung B0, dies entspricht in der derzeitigen Fassung der A 127 den Bedingungen A4 bzw. B4) liegt zum Beispiel vor, wenn lagenweise gegen den gewachsenen Boden mit Nachweis des Verdichtungsgrads verdichtet wird (s. auch Tab. 2). In Tabelle 1 sind die Richtwerte gemäß der aktuellen Entwurfsfassung der DWA-A 127 wiedergegeben.

Tabelle 1: Richtwerte der Verformungsmoduln E_1 und $E_{2,0}$ gemäß Entwurf des Arbeitsblatts DWA-A 127

Einbaubedingung		A0/B0		A1/B1		A2/B2		A3/B3	
		D_{Pr} %	$E_1, E_{2,0}$ N/mm ²	D_{Pr} %	$E_1, E_{2,0}$ N/mm ²	D_{Pr} %	$E_1, E_{2,0}$ N/mm ²	D_{Pr} %	$E_1, E_{2,0}$ N/mm ²
Bodengruppe	G1	100	23	95	16	92	9	90	6
	G2	97	11	95	8	92	4	90	3
	G3	95	5	92	3	92	3	90	2
	G4	-	-	92	2	92	2	90	1,5

Für den Boden in der Leitungszone neben dem Rohr (Bereich 2) muss schließlich noch eine Korrektur (Reduktion) des Verformungsmoduls $E_{2,0}$ vorgenommen werden, um insbesondere die Schwierigkeiten beim Verdichten in schmalen Gräben zu berücksichtigen:

$$E_2 = f_1 \cdot f_2 \cdot \alpha_B \cdot E_{2,0} \quad (1)$$

Die Faktoren f_1 und f_2 berücksichtigen Kriechen sowie Sackungen infolge Grundwassereinfluss; für Böden der Bodengruppen G1 und G2 mit $D_{Pr} \geq 95\%$ dürfen sie zu 1,0 angesetzt werden. Der Faktor α_B ist dagegen bei den Einbettungsbedingungen B1 bis B3 mit $\alpha_B \leq 1$ gemäß Bild 3 anzusetzen. Eine Reduktion des Verformungsmoduls neben dem Rohr führt bei der Lastaufteilung zu einer höheren Vertikalbelastung des Rohres und wirkt sich somit ungünstig auf die Rohrbeanspruchung aus.

In dem Schritt der Lastermittlung wird die Vertikalspannung in Rohrscheitelhöhe p_E unter der Annahme ermittelt, dass kein Rohr vorhanden ist bzw. das Rohr und der neben dem Rohr anstehende Boden identische Steifigkeiten aufweisen. Hierbei darf unter bestimmten Bedingungen eine Silowirkung im Rohrgraben angesetzt werden, wodurch die Vertikalspannung in Rohrscheitelhöhe gegenüber der reinen Bodenauflast bei Dammbedingung (unendlich breiter Graben) reduziert wird. Entscheidende Parameter der Berechnung sind (neben dem Verhältnis von Überdeckungshöhe zu Grabenbreite) der Erd-druckbeiwert K_1 und der Wandreibungswinkel δ zwischen Grabenverfüllmaterial und anstehendem Boden. Diese werden abhängig von den Überschüttungsbedingungen A0 bis A3 festgelegt (s. Tab. 2).

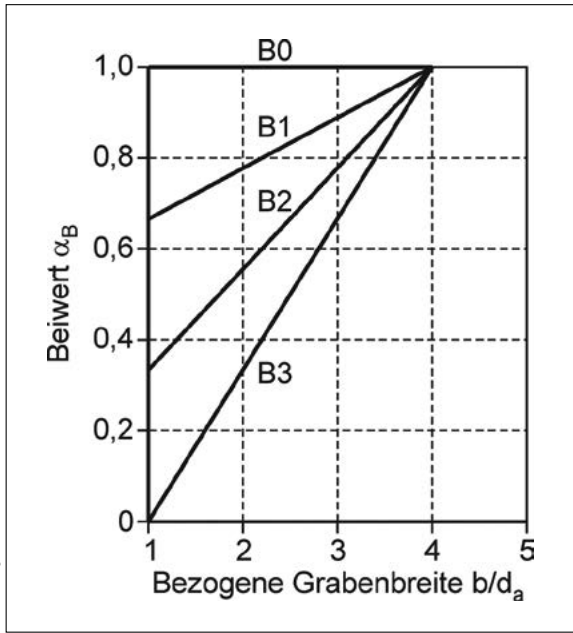


Bild 3: Abminderungsfaktor α_B

Tabelle 2: Überschüttungsbedingungen und Parameter K_1 und δ gemäß ATV-DVWK-A 127 [2] bzw. Entwurf DWA-A 127 (Bezeichnung A0 statt A4)		
Überschüttungsbedingung	K_1	δ
A0: Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung mit Nachweis des nach ZTVE-StB erforderlichen Verdichtungsgrades; gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau). Die Überschüttungsbedingung A0 ist nicht anwendbar bei Böden der Gruppe G4.	0,5	φ'
A1: Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung (ohne Nachweis des Verdichtungsgrades); gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau).	0,5	$2/3 \varphi'$
A2: Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Kanaldielen, die erst nach dem Verfüllen gezogen werden. Verbauplatten oder -geräte, die bei der Verfüllung des Grabens schrittweise entfernt werden. Unverdichtete Grabenverfüllung. Einspülen der Verfüllung (nur geeignet bei Böden der Gruppe G1).	0,5	$1/3 \varphi'$
A3: Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Spundwänden, Leichtspundprofilen, Holzbohlen, Verbauplatten oder -geräten, die erst nach dem Verfüllen entfernt werden.	0,5	0

In dem Schritt der Lastaufteilung wird schließlich die Wechselwirkung zwischen Rohr und Boden berücksichtigt. Die Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B berücksichtigen die Umverteilung der Lasten in der Rohrscheitelebene infolge der unterschiedlichen Steifigkeiten des Rohres und des neben dem Rohr anstehenden Bodens. Die Berechnungsgleichungen basieren auf dem von Leonhardt entwickelten Modell des schubsteifen Balkens [3], weshalb ihre Anwendung auf Böden bzw. bodenähnliche Materialien beschränkt ist. Bezüglich der Details der relativ komplexen Berechnungsprozedur wird auf [2] verwiesen. Das Ergebnis der Berechnungen ist schließlich eine Vertikallast q_v und ein Seitendruck q_h auf das Rohr:

$$q_v = \lambda_{RG} \cdot p_E + p_v \quad (2)$$

$$q_h = K_2 \cdot \left(\lambda_B \cdot p_E + \lambda_B \cdot \frac{d_a}{2} \right) \quad (3)$$

Abhängig von der relativen Steifigkeit Rohr/Boden werden im Arbeitsblatt A 127 biegesteife und biegeweiche Rohre unterschieden. Bei biegeweichen Rohren kommt noch ein seitlicher Bettungsreaktionsdruck hinzu. Die resultierenden Lastbilder sind in Bild 4 dargestellt.

Der Beiwert K_2 , welcher die Größe des Seitendrucks q_h gemäß obiger Gleichung (3) bestimmt, ist in der ATV-DVWK-A 127 abhängig von der Bodengruppe und der (relativen) Rohrsteifigkeit festgelegt (s. Tab. 3).

Auf die Größe der Rohrbeanspruchung wirkt sich schließlich auch der „Lagerungsfall“ bzw. der „Auflagerwinkel“ 2α aus (s. Bild 4). Bei biegesteifen Rohren muss in der Regel ein (relativ ungünstiger) Auflagerwinkel von $2\alpha = 90^\circ$ angesetzt werden, während bei biegeweichen Rohren mit $2\alpha = 120^\circ$ bzw.

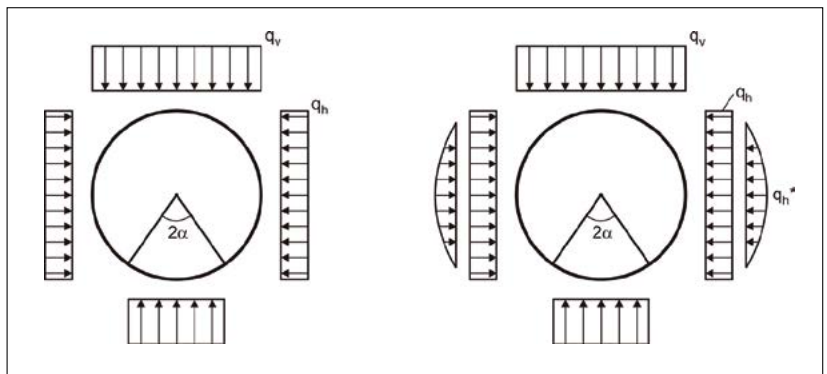


Bild 4 Lastbilder für steife (links) und biegeweiche (rechts) Rohre.

bei Vorliegen der Einbettungsbedingungen B0 oder B1 sogar mit $2\alpha = 180^\circ$ gerechnet werden darf.

3 Konzept für in ZFSV gebettete Rohre

Bei der Bemessung von in ZFSV gebetteten Rohrleitungen in Anlehnung an das Arbeitsblatt A 127 sind insbesondere folgende Aspekte zu beachten:

- Die generelle Eignung eines Zfs-Verfüllmaterials für die Bettung von Rohren und für die Anwendung des Berechnungsverfahrens der A 127 – letzteres setzt insbesondere bodenähnliches Verhalten voraus – muss gegeben sein.
- Die Zeitabhängigkeit der Steifigkeits- und Festigkeitsparameter als Besonderheit von ZFSV muss bei der Berechnung berücksichtigt werden.
- Es sind zusätzliche Nachweise für den Zustand, in dem das Verfüllmaterial noch flüssig ist, zu führen (Auftriebsnachweis, Nachweis der Standsicherheit der Grabenwand).

Auf diese drei Aspekte wird nachfolgend eingegangen.

3.1 Anforderungen an ZFSV

Die generelle Eignung für ZFSV als Verfüllmaterial für Rohrleitungen, welche in Anlehnung an das Arbeitsblatt A 127 bemessen werden sollen, ist nur gegeben, wenn das verfestigte Material eine bodenähnliche Struktur und bodenähnliches Verhalten aufweist und das Material im flüssigen Zustand stabil

Tabelle 3: Erddruckbeiwert K_2 gemäß ATV-DVWK-A 127 [2]

Bodengruppe	K_2	
	Biegesteifes Rohr	Biegeweiches Rohr
G1	0,5	0,4
G2	0,5	0,3
G3	0,5	0,2
G4	0,5	0,1

gegen Entmischung und fließfähig ist. Wesentliche Materialeigenschaften sind in diesem Zusammenhang:

- Fließfähigkeit/ Selbstverdichtungsfähigkeit des ZFSV im Zustand während des Einbaus;
- Stabilität bzw. keine Entmischungsneigung im flüssigen Zustand;
- Begrenzte Druckfestigkeit des erhärteten Materials (im Hinblick auf Bodenähnlichkeit und Wiederaushubfähigkeit);
- Volumenstabilität des erhärtenden/ erhärteten Materials.

Hinweise für die Herstellung und die Anwendung von ZFSV sowie Qualitätsanforderungen enthält das H ZFSV-Dokument der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [4]. Demnach kann die Fließfähigkeit über das Zieh- und Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5 beurteilt werden. Das H ZFSV-Dokument [4] fordert ein Zieh- und Ausbreitmaß zwischen 50 und 70 cm.

Weil die Dichte der Bodenkörner größer ist als die Dichte der aus Wasser, Bindemittel und Zusatzstoffen bestehenden Suspension, besteht die Gefahr einer Entmischung durch Absinken der Körner in der Suspension. Ein stabiles Zfs-Verfüllmaterial liegt vor, wenn die mobilisierbaren Schubspannungen in der Suspension groß genug sind, um das Absinken auch des größten Kornes des Bodens bzw. Korngemisches zu verhindern. Die mobilisierbare Schubspannung wird auch als Fließgrenze τ_f bezeichnet. Die Stabilität kann nach einem Vorschlag von Quarg-Vonschheidt et al. [5] durch den Nachweis der Fließgrenze ($\tau_f \geq \tau_{0,\min}$) gemäß folgender Gleichung nachgewiesen werden:

$$\tau_{0,\min} = \frac{4}{3} \left(\gamma_{\text{Korn}} - \gamma_{\text{Fluid}} \right) \cdot r_{\text{Korn}} \quad (4)$$

mit:

γ_{Korn} : Wichte des Zuschlagskorns (für nicht poröse mineralische Zuschläge $\approx 27,2 \text{ kN/m}^3$)

γ_{Fluid} : Wichte der Mehlkornsuspension (Suspension ohne Grobkörner, $\approx 11 \text{ kN/m}^3$)

r_{Korn} : (Maximaler) Radius des Zuschlagkorns.

Entsprechend wäre die baubegleitende Messung der Fließgrenze von ZFSV erforderlich. Ein dafür geeignetes Messverfahren wird ebenfalls in [5] beschrieben. Für erdverlegte Rohrleitungen ist in aller Regel die Wiederaushubfähigkeit des Grabenverfüllmaterials gefordert. In dem H ZFSV-Dokument [4] werden sowohl die Druckfestigkeit als auch der zeitliche Zuwachs der Festigkeit für eine Beurteilung herangezogen. Leichte Lösbarkeit besteht demnach, wenn die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen maximal 300 kN/m^2 beträgt und der den zeitlichen Zuwachs charakterisierende Parameter f_z folgende Bedingung erfüllt:

$$f_z = \frac{f_2 - f_1}{\log(t_2 / t_1)} \leq 150 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

▷

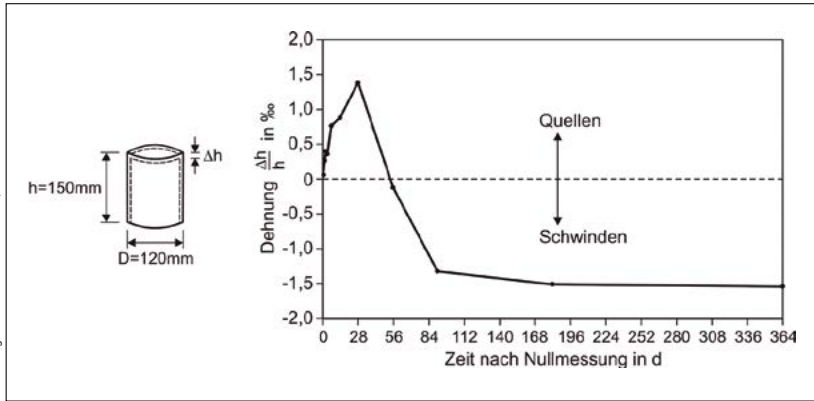


Bild 5 Ergebnisse von Schwindversuchen an ZFSV [6].

Hierin sind t_2 und t_1 die Messzeiten (56 Tage und 7 Tage) und f_2 und f_1 die jeweils gemessenen einaxialen Druckfestigkeiten. Mittelschwere Lösbarkeit besteht demnach bei einer Druckfestigkeit nach 28 Tagen zwischen 300 und 800 kN/m² und $f_z \leq 200$ kN/m² (Anmerkung: Dieser Wert soll im Zuge der Überarbeitung des H ZFSV-Dokuments auf 300 kN/m² angehoben werden). Schließlich ist zu fordern, dass ein Zfs-Verfüllmaterial beim Erhärten nicht zu stark schwindet bzw. – um in der bodenmechanischen Terminologie zu bleiben – schrumpft, weil hierdurch die günstigen Bettungsbedingungen des Rohres unter Umständen verloren gehen. Hinsichtlich dieses Kriteriums besteht derzeit noch Klärungsbedarf. Es ist weder bekannt, wie stark Zfs-Verfüllmaterial in der Leitungszone schwinden dürfte, ohne dass die Bettungsbedingungen signifikant verschlechtert werden, noch, mit welchem Prüfverfahren und bei welchen Randbedingungen ein für die Leitungszone realistisches Schwind- bzw. Schrumpfmaß experimentell bestimmt werden kann.

Die Heidelberger Beton GmbH hat spezielle Schwindversuche mit einem Zfs-Verfüllmaterial durchgeführt [6]. Dabei wurden zylindrische Probekörper bei Raumklima bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Das gemessene einaxiale Schwindmaß betrug bei Versuchsende rd. 0,15% (s. Bild 5). Ein vergleichbares Material wurde als Bettungsmaterial für ein Gussrohr DN 500 in Untersuchungen ähnlich denen von Arsic in [1] dokumentierten eingesetzt. Dabei wurde festgestellt, dass hier vergleichbar günstige Bettungsbedingungen wie bei den in [1] untersuchten Zfs-Verfüllmaterialien vorlagen [7].

Auf dieser Grundlage wird – solange keine Ergebnisse weitergehender Untersuchungen vorliegen – folgendes Kriterium für die Volumenstabilität eines Zfs-Verfüllmaterials vorgeschlagen:

- Das einaxiale Schwindmaß bei Austrocknung von Probezylindern mit Höhe 150 mm und Durchmesser 120 mm unter Raumklima (20°C, 65% relative Luftfeuchtigkeit) soll maximal 0,15%⁽¹⁾ betragen. Sofern von vergleichbaren Ergebnissen ausgegangen werden kann, können auch andere Probekörpergeometrien verwendet werden.
- Entsprechend der in [6] beschriebenen Vorgehensweise sollte die Probe bei dem Versuch zunächst 28 Tage vor dem Austrocknen geschützt werden und anschließend sollte das Schwindmaß der ungeschützten Probe bei Raumklima beobachtet werden, bis keine wesentlichen Änderungen mehr auftreten. Die Nullmessung der Probenhöhe sollte 5h nach Herstellung des Probekörpers erfolgen.

3.2 Nachweise für den flüssigen Zustand

Eine wichtige Besonderheit für in ZFSV gebettete Rohre ist, dass es während der Bettung im noch flüssigen Material zu einem Auftriebsversagen kommen kann. Darüber hinaus ist, wenn der Grabenverbau gezogen wird, während das

Verfüllmaterial noch flüssig ist, die Stabilität der durch ZFSV gestützten Grabenwand nachzuweisen. Mit beiden Nachweisen haben sich Quarg-Vonscheidt et al. in [5] befasst.

Bei experimentellen Untersuchungen zum Auftrieb auf in ZFSV gebettete Rohrleitungen ergab sich, dass die Auftriebskraft sogar größer ist als das bei Auftrieb in Wasser anzusetzende Gewicht der durch das Rohrvolumen verdrängten Flüssigkeit. Grund dafür ist, dass bei der Auffüllung mit ZFSV der Flüssigkeitsspiegel am Rohr ansteigt und die Flüssigkeit wegen ihrer Scherfestigkeit (Fließgrenze) nicht nur radiale Spannungen, sondern auch Scherspannungen auf das Rohr überträgt. Dieser Effekt tritt bei Wasser nicht auf, weil Wasser keine Fließgrenze aufweist.

Quarg-Vonscheidt et al. [5] haben festgestellt, dass die zusätzliche Auftriebskraft linear von der Differenz der Fließgrenze τ_f des ZFSV und der für die Stabilität gegen Entmischung erforderlichen Fließgrenze $\tau_{0,min}$ (s. Gl. 4) abhängt. Die resultierende Auftriebskraft pro Meter Rohrleitung $f_{A,eff}$ kann demnach mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$f_{A,eff} = r_{Rohr}^2 \cdot \pi \cdot (\gamma_{ZFSV} - \gamma_{Rohr}) + 6 \cdot r_{Rohr} \cdot \pi \cdot (\tau_f - \tau_{0,min}) \quad (6)$$

Hierin sind r_{Rohr} und γ_{Rohr} der Radius und die mittlere Wichte (auf den Rohrcherschnitt bezogene Gewichtskraft pro Meter Länge) des Rohres und γ_{ZFSV} ist die Wichte des Zfs-Verfüllmaterials.

Der Nachweis der Standsicherheit der suspensions- bzw. ZFSV-gestützten offenen Grabenwand (innere Standsicherheit), d.h. nach Ziehen des Verbaus bei noch nicht erhärtetem Verfüllmaterial, kann gemäß [5] mittels folgender Nachweisgleichung erfolgen:

$$\tau_f \geq (\gamma_{Korn} - \gamma_{Fluid}) \cdot r_{Korn,90} \quad (7)$$

Hierin ist $r_{Korn,90}$ der Kornradius bei 90% Siebdurchgang des anstehenden Bodens, γ_{Korn} die Kornwichte (bei mineralischen Böden rd. 27,2 kN/m³) und γ_{Fluid} die Wichte der Mehlkornsuspension des Flüssigbodens, welche etwa zu $\gamma_{Fluid} = 11$ kN/m³ abgeschätzt werden kann (s. auch Gl. 4). Bezüglich Details zu diesem Nachweis wird hier auf [5] verwiesen.

3.3 Rohrstatik in Anlehnung an ATV-DVWK-A 127

ZFSV unterscheidet sich von herkömmlichen, als Grabenverfüllmaterialien genutzten Böden insbesondere durch die anfänglich flüssige Konsistenz und seine zeitabhängige Steifigkeit und Festigkeit. Er kann daher keiner Bodengruppe nach ATV-DVWK-A 127 [2] zugeordnet werden, sondern ist separat zu behandeln. Es ist zu fordern, dass die Zeitabhängigkeit insbesondere der Steifigkeit des zur Verwendung vorgesehenen Zfs-Verfüllmaterials bestimmt wird bzw. auf Grundlage vorliegender Erfahrungen zumindest zuverlässig abgeschätzt werden kann.

⁽¹⁾ In der aktuellen Entwurfsfassung der DWA-A 139 [8], auf welche die DWA-A 127 verweist, ist ein Wert von 0,2% vorgesehen.

Unmittelbar nach dem Verfüllen des Grabens ist das Verfüllmaterial flüssig und das Rohr ist – zumindest ganz überwiegend – durch radial wirkende Spannungen sowie die Reaktionskraft der Auftriebssicherungs-konstruktion belastet (Bild 6 links). Die Scheitelspannung ergibt sich aus dem Produkt aus Wichte des Verfüllmaterials und Überdeckungshöhe. Silowirkung darf also zumindest für die Eigenlast des Zfs-Verfüllmaterials nicht berücksichtigt werden und der Lastkonzentrationsfaktor ist $\lambda_R = 1,0$.

Mit der Verfestigung des Materials, d. h. dem Wechsel vom flüssigen zum festen Zustand, wird sich der Belastungszustand ändern. Die Auftriebssicherung kann entfernt werden. In dem noch relativ weichen Material unmittelbar nach Verfestigung wird sich das Rohr biegesteif verhalten (Systemsteifigkeit V_{RB} nach Arbeitsblatt A 127 > 1), die Scheitelspannung wird sich aber nicht nennenswert verändern. Wie groß die Horizontalspannungen auf das Rohr unmittelbar nach Verfestigung sind, kann nicht zuverlässig angegeben werden. Eine Reduktion gegenüber dem flüssigen Zustand kann nicht ausgeschlossen werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Ansatz eines Seitendruckbeiwerts von $K_2 = 0,5$, d.h. ein Ansatz von $q_h = 0,5 \lambda_B (h+d_a/2)$ auf der sicheren Seite liegt.

Dementsprechend wird vorgeschlagen, für den Zustand unmittelbar nach Verfestigung des ZFSV (Anfangszustand) eine Bemessung für ein biegesteifes Rohr ($K_2 = 0,5$) mit $\lambda_R = \lambda_B = 1,0$ vorzunehmen (Bild 6 mitte). Die Größe des Verformungsmoduls im Anfangszustand (unmittelbar nach dem Übergang von der flüssigen in die feste Zustandsform) ist undefiniert, muss aber auch nicht bekannt sein, da die Lastkonzentrationsfaktoren vorgegeben sind.

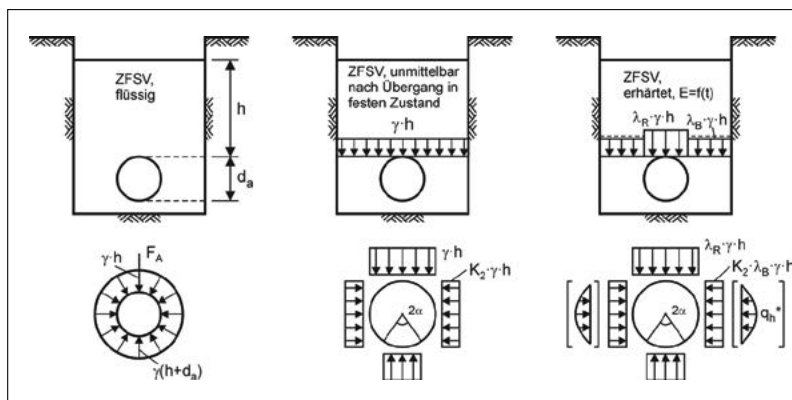


Bild 6 Belastungszustände für ein Rohr in Zfs-Verfüllmaterial.

Mit weiter zunehmender Verfestigung werden weitere Lastumlagerungsvorgänge einhergehen. Unter Ansatz des Endwerts des Verformungsmoduls (Endzustand) ist das Rohr rechnerisch möglicherweise als biegeweich einzustufen, während es unmittelbar nach Verfestigung (Anfangszustand) noch biegesteif war. Es kann nicht zuverlässig angegeben werden, in welcher Weise sich die Verfestigung (und ggf. einhergehende Schwindprozesse) auf die Lastkonzentrationsfaktoren auswirken. Es wird vorgeschlagen, für den Endzustand die Lastkonzentrationsfaktoren unter Ansatz des Endwerts des Verformungsmoduls neu zu berechnen. Je nach Steifigkeitsverhältnissen ergeben sich dann – bei biegeweichem Verhalten des Rohres – auch abweichende K_2 -Werte sowie ein Bettungsreaktionsdruck (Bild 6 rechts). Üblicherweise werden Festigkeiten und Steifigkeiten von ZFSV bis zum Zeitpunkt 56 Tage nach Herstellung geprüft. Der Endwert des Verformungsmoduls kann – sofern nicht die maximale Steifigkeit bereits nach 56 Tagen erreicht ist – mittels Extrapolation des gemessenen zeitlichen Verlaufs abgeschätzt werden.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise bedeutet also, dass für in ZFSV gebettete Rohre immer (mindestens) zwei Berechnungen durchzuführen sind: Eine für den Anfangszustand unmittelbar nach Verfestigung mit $\lambda_R = \lambda_B = 1,0$ und $K_2 =$ ▷

0,5 und eine für den Endzustand mit dem maximalen Verformungsmodul nach vollständiger Aushärtung. Wenn mit dem Auftreten zusätzlicher Lasten wie z. B. erheblicher Verkehrslasten oder einer Übersättigung bereits vor dem Erreichen des Endwerts des Verformungsmoduls zu rechnen ist, ist zusätzlich eine Berechnung für den Zwischenzustand unter Ansatz des zu diesem Zeitpunkt gültigen Verformungsmoduls vorzunehmen.

Bezüglich der Ermittlung der Rohrbelastung im End- oder Zwischenzustand (Lastaufteilung) ist die Festlegung des Faktors α_B , des Erddruckbeiwerts K_2 sowie des Auflagerwinkels 2α entscheidend.

Dem Konzept der A 127 folgend, sollte für steife Rohre auch bei Bettung in ZFSV generell (wie für alle Boden- gruppen) $K_2 = 0,5$ gesetzt werden. Eine nicht so einfach zu klärende Frage ist dagegen, wie K_2 für weiche Rohre (mit $V_{RB} < 1$) anzusetzen ist. Eine pragmatische Lösung könnte sein, abhängig vom aktuellen inneren Reibungswinkel des Flüssigbodens eine Zuordnung zu einer der Bodengruppen G1 bis G4 vorzunehmen und den K_2 -Wert für diese Bodengruppe entsprechend Tab. 3 anzusetzen. Alternativ könnte eine Zuordnung in Abhängigkeit von der aktuellen, d.h. zum Zeitpunkt der betrachteten Lastsituation vorliegenden Steifigkeit vorgenommen werden.

Für die Berechnung der horizontalen und vertikalen Bettungssteifigkeiten gemäß der in [2] angegebenen Gleichungen sind die zum betrachteten Zeitpunkt gültigen Verformungsmoduln des ZFSV anzusetzen.

Unter der Voraussetzung, dass der Verbau bei noch fließfähigem Zustand des ZFSV gezogen wurde (dies sollte der Regelfall sein und wird auch im H ZFSV-Dokument [4] gefordert), ist eine Abminderung der Steifigkeit E_2 des Verfüllmaterials in der Leitungszone, wie sie für herkömmliche Verfüllmaterialien nach Arbeitsblatt A 127 in vielen Fällen erforderlich ist, für ZFSV im Allgemeinen nicht erforderlich. Grund dafür ist, dass – grundsätzliche Eignung des Materials für Rohrgrabenverfüllung vorausgesetzt – auch bei relativ engen Rohrgräben keine qualitativ schlechtere Verdichtung neben dem Rohr zu erwarten ist ($\alpha_B = 1$). Nennenswerte Kriechverformungen oder Sackungen infolge Grundwassereinfluss sind nach derzeitigem Kenntnisstand ebenfalls nicht zu erwarten, sodass die entsprechenden Faktoren (f_1, f_2 , vgl. Gl. 1) zu Eins gesetzt werden können.

Mit dem so ermittelten E_2 -Wert erfolgt die Berechnung der Lastkonzentrationsfaktoren, der Steifigkeiten und gegebenenfalls des Seitendrucks nach den im Arbeitsblatt A 127 angegebenen Gleichungen. Als Lagerungsfall kann der Lagerungsfall I wie auch von Arsic [1] vorgeschlagen mit Auflagerwinkeln von $2\alpha = 120^\circ$ für steife und $2\alpha = 180^\circ$ für weiche Rohre angesetzt werden. Dies entspricht den Ansätzen für herkömmliche Verfüllmaterialien, wenn bei steifen Rohren die Zwickelverdichtung nachgewiesen wird bzw. bei weichen Rohren die Einbettungsbedingungen B0 oder B1 (bzw. B4 oder B1 gemäß der Bezeichnung in der noch gültigen ATV-DVWK-A 127) vorliegen.

Für den (ungünstigen und damit möglichst zu vermeidenden) Fall, dass der Verbau in der Leitungszone erst nach Erhärten des ZFSV gezogen wird, bestehen noch offene Fragen. Arsic [1] hat vorgeschlagen, eine Bruchlast für den ZFSV-Körper innerhalb der Leitungszone zu berechnen. Bei einem Ausnutzungsgrad < 1 hält er es für gerechtfertigt, keine Abminderung von E_2 vorzunehmen ($\alpha_B = 1$) und die horizontale Bettungssteifigkeit ohne Berücksichtigung des in A 127 vorgesehenen Faktors ζ (s. [2]) zu ermitteln. Dieser Ansatz kann aber nicht als ausreichend abgesichert gelten. Solange keine genaueren Erkenntnisse vorliegen, könnte eine Abminderung der Steifigkeit E_2 wie für Böden über den Faktor α_B erfolgen, welcher für die Einbettungsbedingungen B2 oder B3 ermittelt wird. Ebenso sollte sicherheitshalber auch eine Reduktion des Auflagerwinkels auf $2\alpha = 90^\circ$ für steife und $2\alpha = 120^\circ$ für weiche Rohre berücksichtigt werden.

Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus
 Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover
 E-Mail: achmus@igth.uni-hannover.de
www.igth.uni-hannover.de

Literatur

- [1] Arsic, I.: Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik d. Ruhr-Universität Bochum, Heft 40, Bochum; 2009.
- [2] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A127 Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen, 3. Auflage; korrigierter Nachdruck 4/2008. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, 2008.
- [3] Leonhardt, G.: Die Belastung von starren Rohrleitungen unter Dämmen. Mitteilungsheft 4 des Lehrstuhls für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Technischen Universität Hannover, 1973.
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZFSV), Ausgabe 2012.
- [5] Quarg-Vonscheidt, J., Sosinka, K., Baukloh, M., Gropengießer, A.J.: Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung – Verfahren zur flüssigen Grabenverfüllung. Abschlussbericht (Projektleiter: Pecher, K. H.); Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW (Hrsg.), 2013.
- [6] HeidelbergCement AG: Schwinden Flüssigboden. Präsentation von Dipl.-Ing. R. Böing in der AG Flüssigboden des Bundesverbands Transportbeton (BTB), 22.10.2015 (nicht veröffentlicht).
- [7] Böing, R., Liebscher, M.: Neues selbstverdichtendes Verfüllmaterial für Leitungsgräben – Von der Eignungsprüfung bis zur Qualitätssicherung. BFT Betonwerk + Fertigteil-Technik, Ausgabe 11/2010.
- [8] Arbeitsblatt DWA-A 139 Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen - Entwurf (April 2017). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, 2017. □