

ABSCHLUSSBERICHT

Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung

Verfahren zur flüssigen Grabenverfüllung

KURZFASSUNG

Im Auftrag des:



Land
Nordrhein-Westfalen

Ministerium für Klimaschutz,
Umwelt, Landwirtschaft, Natur-
und Verbraucherschutz des
Landes NRW

Durchführung:

pecher

Dr. Pecher AG

Projektleitung:

Dr.-Ing. Klaus Hans Pecher

Bearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Quarg-Vonscheidt
Dipl.-Ing. Katharina Sosinka
Dipl.-Ing. Miriam Baukloh
Dipl.-Ing. Anna Jasmin Gropengießer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	1
1.2	Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens feststoffreicher Suspensionen	2
1.3	Das Ballon-Experiment	3
2	Stabilität der Suspension	4
3	Die Auftriebswirkung der Suspension	5
3.1	Laborversuche zur Auftriebswirkung in Suspensionen	5
4	Stützwirkung auf Grabenwände	6
4.1	Standsicherheit des offenen Grabens	6
4.2	Ableitung eines Nachweisformates für die innere Standsicherheit suspensionsgestützter Gräben	7
4.3	Abschätzung des Verlustes an stützender Flüssigkeit	8
5	Messung der Parameter fließfähiger Verfüllbaustoffe	9
5.1	Baustellentaugliches Pendelgerät	9
6	Zusammenfassung	10
7	Literatur- und Quellennachweis	12

1 Einleitung

Seit einigen Jahren wird in Deutschland die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung angewendet. Dabei werden in Baugruben und Gräben im Einbauzustand fließfähige, selbstverdichtende und anschließend selbstverfestigende Verfüllmaterialien auf der Basis von Baustoff-Bindemittel-Gemischen oder Boden-Bindemittel-Gemischen eingesetzt. Diese Füllmaterialien werden je nach Hersteller als Flüssigboden, Boden-Verfüllmörtel oder stabilisierte Sandmischung bezeichnet und im Kanalbau überwiegend zur Verfüllung der Leitungszone, teilweise auch zur Herstellung der Hauptverfüllung, verwendet.

Im Vergleich zur herkömmlichen offenen Bauweise ist dieses Verfahren unter Berücksichtigung eines fachgerechten Einsatzes besonders vorteilhaft aufgrund von Kosteneinsparungen (bspw. Bauzeitenreduzierungen durch schnellere Grabenverfüllung und kleinere wiederherzustellende Oberflächen) sowie einer idealen Bettung des eingebauten Rohres (Optimierung der Nutzungsdauer). Auch kann die Methode der flüssigen Grabenverfüllung unter beengten Platzverhältnissen im innerstädtischen Bereich und bei Leitungskreuzungen eingesetzt werden, wobei über den technischen und wirtschaftlichen Erfolg dieser Maßnahmen insbesondere die Einbaumethode entscheidet.

Neben einem allgemein angepassten Bauablauf ist die Wahl des richtigen Verbaus und der optimalen Lagesicherung der Rohre sowie ein kontrollierter Rückbauzustand der Grabensicherung von entscheidender Bedeutung, dies bestätigen auch eine Vielzahl einschlägiger Veröffentlichungen (u.a. *Stolzenburg, 2009*) und einige Richtlinien. Verbindliche Regelungen fehlen in den aktuellen Normen jedoch weitgehend oder sind nicht ausreichend konkret und allgemeingültig, dies betrifft insbesondere den Nachweis des Rückbauzustandes des flüssigkeitsgestützten unverbauten Grabens oder die Bestimmung der Stabilität und der effektiven Auftriebswirkung der Suspensionen.

Aufgrund dieses noch nicht vorhandenen Nachweises sowie fehlender geeigneter und herstellerunabhängiger Methoden zur Qualitätssicherung, aber auch infolge höherer Kosten des Verfüllmaterials selbst, hat sich die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung noch nicht flächendeckend durchgesetzt.

Als Grundlage für die notwendige Konkretisierung der gültigen Regelwerke wurden im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen die Mechanismen der flüssigen Grabenverfüllung untersucht und die relevanten Parameter hochkonzentrierter Suspensionen identifiziert sowie eine einfache Methode zur Messung dieser Parameter unter Baustellenbedingungen entwickelt.

1.1 Grundlagen

Fließfähige Verfüllbaustoffe werden in unterschiedlichen Bereichen zur Verfüllung von Hohlräumen bspw. bei alten Tankanlagen, Tunneln, Stollen, stillgelegten Wasser-, Abwasser- und Gasleitungen eingesetzt.

Für die flüssige Grabenverfüllung im Rohrleitungsbau eignet sich jedoch nur eine Auswahl dieser Materialien, wobei die Rezepturen einzelner Hersteller sowohl hinsichtlich der verwendeten Ausgangsmaterialien als auch der späteren Feststoffeigenschaften teilweise erheblich variieren. Konkrete Entscheidungshilfen zur Auswahl des optimalen Materials für die jeweilige Anwendung sind nicht Gegenstand der nachfolgend dargestellten Untersuchungen. An dieser Stelle wird auf die zahlreichen Veröffentlichungen von Herstellern und Anwendern sowie auf die weiterführende Literatur anderer

Autoren verwiesen. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen beschränken sich auf die Eigenschaften der noch flüssigen Verfüllbaustoffe im Zustand des Einbaus.

Allen fließfähigen Verfüllmaterialien ist gemeinsam, dass ihr Fließverhalten und ihre Stabilität maßgeblich von den Eigenschaften einer tragenden Mehlkornsuspension sowie der Kornverteilung und der Kornform ihrer groben Zuschlagstoffe bestimmt werden. Quantifiziert wird das Fließverhalten im Wesentlichen durch die beiden Parameter der plastischen Viskosität (Zähigkeit) sowie der Fließgrenze und kann am einfachsten mit dem Modell einer Bingham-Flüssigkeit beschrieben werden, die erst dann fließt, wenn eine Mindestschubspannung (Fließgrenze) überschritten wird.

Die Fließgrenze einer Suspension ist dabei der entscheidende Parameter zur Beurteilung der Entmischungsneigung, der effektiven Auftriebswirkung und der Stabilisierung des offenen, unverbauten Grabens.

Die Fähigkeit zur vollständigen Umschließung der Rohrleitungen und zur Füllung der Verbauspur ist nicht maßgeblich abhängig von den im Einbauzustand auftretenden Fließgeschwindigkeiten, daher reicht zur Beurteilung des Einbauverhaltens der Verfüllbaustoffe zunächst auch hierfür die Kenntnis der Fließgrenze und der Wichte der Suspension sowie der Kornverteilung ihrer Zuschläge.

Einfache Methoden zur Bestimmung der Fließgrenze unter Baustellenbedingungen sind aus der Geotechnik bekannt und werden bspw. im Schlitzwandbau angewendet. Für die Messung der Eigenschaften flüssiger Verfüllbaustoffe wurde im Rahmen des Forschungsprojektes das in der Schlitzwand-Norm DIN 4126 (2008) beschriebene Pendelgerät nach Weiß modifiziert, da es in der ursprünglichen Form für die Untersuchung hochkonzentrierter Suspensionen nur bedingt geeignet ist.

1.2 Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens feststoffreicher Suspensionen

Bei den zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen handelt es sich um feststoffreiche Suspensionen mit einer vorwiegend weitgestuften Kornverteilung, die abhängig vom Ausgangsmaterial von weniger als einem μm im Mehlkornbereich bis zu einigen cm im Bereich der größten Kornfraktionen reichen kann.

Das Fließverhalten der Verfüllbaustoffe kann an dem folgenden Modell erläutert werden, das auch zur anschaulichen Erklärung der Fließgrenze von Suspensionen dienen kann, bei denen eine Fließbewegung erst nach Überschreiten der Reibung im Korngerüst möglich ist. Handelt es sich bei der flüssigen Phase um eine Newton'sche Flüssigkeit – z.B. Wasser – wird die Fließgrenze der Suspension ausschließlich durch die Reibung (viskos und intergranular) bestimmt. Ist ein ausreichend großer Anteil der flüssigen Phase vorhanden und handelt es sich bei dem Fluid um eine Bingham'sche Flüssigkeit, so werden zusätzlich zur Reibung auch Kräfte entsprechend der Fließgrenze des Fluids auf die Partikel übertragen, da bei einer Bewegung der Suspension auch ein Fließvorgang innerhalb der beengten Porenräume initiiert wird. Die Größe und die Verteilung dieser Porenkanäle wird ebenfalls maßgeblich von der Kornform bestimmt, so dass die effektive Fließgrenze τ_0 der Suspension insgesamt eine Funktion der relativen Feststoffkonzentration ist (*Ferraris und de Larrard, 1998*).

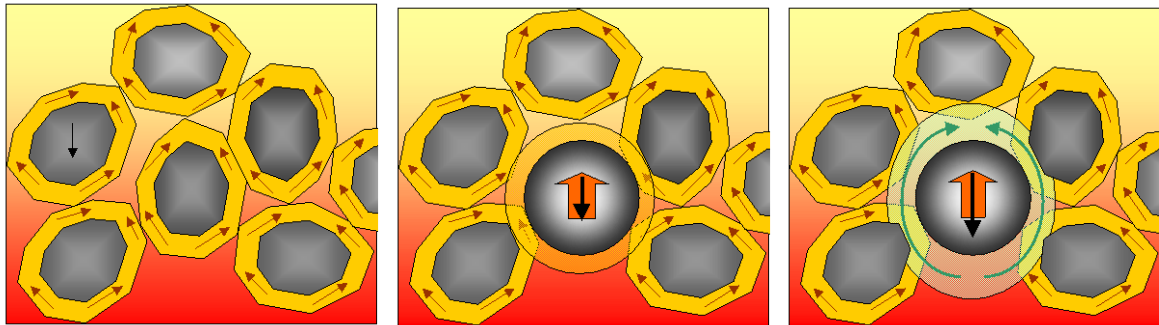


BILD 1: FLÜSSIGKEITSSTRÖMUNG IN DEN PORENKANÄLEN – MIKROSKOPISCHE BETRACHTUNGSWEISE DER STABILITÄT EINER SUSPENSION

Sinkt also ein Körper aufgrund seines Gewichtes in einer Suspension nach unten ab, muss er durch sein Gewicht den Druck auf die flüssige Phase der Suspension so weit erhöhen, dass eine entsprechende Fließbewegung des Fluids in den Porenkanälen initiiert wird (Bild 1: mikroskopische Betrachtungsweise) oder - bei eher großvolumigen Körpern – eine Suspensionsströmung in einem räumlichen Fließbereich stattfindet. Liegt der für die Umströmung erforderliche Flüssigkeitsdruck wesentlich über dem Porenflüssigkeitsdruck der stabilen Suspension, so wirkt auf den Körper eine größere Auftriebskraft, als der Ansatz nach Archimedes (verdrängtes Volumen multipliziert mit der Wichte) ergibt.

Drängt der Körper aufgrund seiner relativ geringen Wichte an die Oberfläche der Suspension, so ist auch in diesem Fall der Flüssigkeitsdruck in den Porenkanälen entsprechend zu erhöhen. Dieser erhöhte Druck wirkt der Aufwärtsbewegung des Körpers entgegen, wodurch die effektive Auftriebswirkung geringer erscheint als durch den Ansatz über die Wichte der Suspension (makroskopische Betrachtungsweise) ermittelt wird.

Dieses Modell soll nachfolgend anhand eines Experiments verdeutlicht werden.

1.3 Das Ballon-Experiment

Ein wassergefüllter Ballon ist in Wasser annähernd gewichtslos, da die wirksamen Auftriebskräfte infolge des verdrängten Volumens der Gewichtskraft des Ballons entsprechen. Der Ballon taucht in das Wasser ein ohne aufzusteigen oder abzusinken (links in Bild 2). Bei dieser Betrachtung werden das Gewicht und das Volumen der Ballonhülle vernachlässigt.

Wird das gleiche Experiment in einer Bingham'schen Flüssigkeit durchgeführt, so taucht der mit der Bingham'schen Flüssigkeit gefüllte Ballon trotz gleicher Wichte von Ballon und Flüssigkeit nicht vollständig ein (rechts in Bild 2), da durch die Fließgrenze der Suspension beim Eintauchvorgang unterhalb des Körpers ein höherer als der primäre Flüssigkeitsdruck entsteht. Ein Ausgleich der Druckdifferenz ist aufgrund der Fließgrenze der Suspension behindert und es entsteht eine effektive Auftriebskraft.

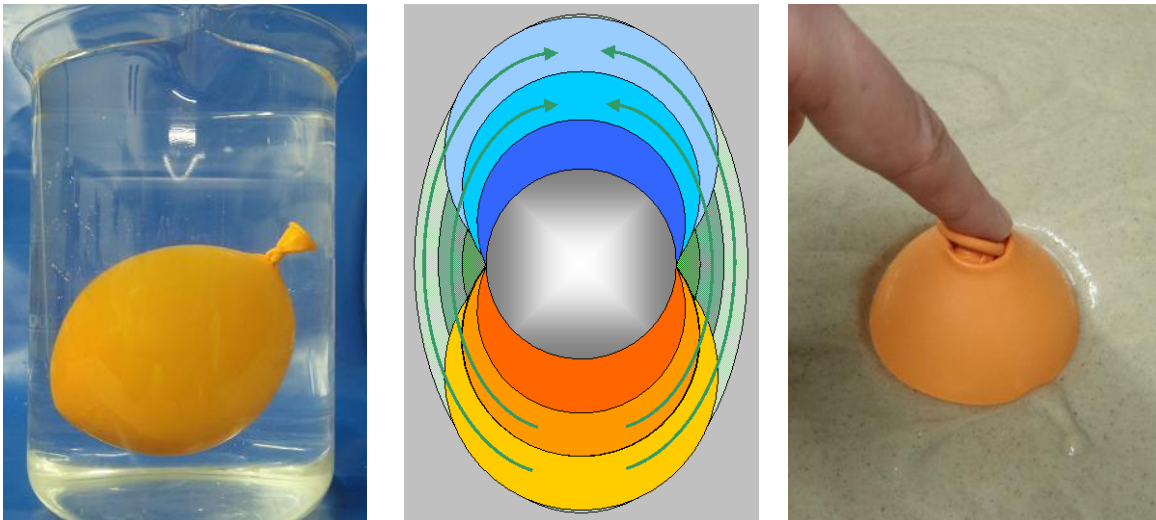


BILD 2: BALLON-EXPERIMENT IN NEWTONSCHER (LINKS) UND BINGHAM'SCHER (RECHTS) FLÜSSIGKEIT

Soll der Ballon, der im Sinne des Archimedischen Prinzips auftriebslos ist, in die Flüssigkeit eingetaucht werden, so ist hierzu eine Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich, welche die Fließgrenze der Suspension überwindet. Die Eintauchbewegung stagniert, wenn die wirksame Kraft so weit reduziert wird, dass diese mit dem Druckunterschied in der Flüssigkeit oberhalb und unterhalb des eingetauchten Körpers (bei lotrechter Bewegungsrichtung) im Gleichgewicht steht.

Wird die auf den Ballon wirkende Kraft weiter reduziert, so bewirkt der Druckunterschied eine Umkehrung der ursprünglichen Krafrichtung. Die Resultierende ist nun in Richtung des geringeren Druckes oberhalb des Ballons gerichtet. Es wirkt eine Auftriebskraft auf den Ballon, wodurch der Körper nun die Bestrebung hat, in der Flüssigkeit aufzusteigen. Die Suspension kann den Körper aber erst umfließen, wenn die Fließgrenze innerhalb der Suspension überschritten wird. Um den Ballon in Richtung Oberfläche zu bewegen, ist somit wieder eine Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich.

Prinzipiell sind zwei verschiedene Vorgänge zu unterscheiden:

- Die Umströmung der Kugel durch die Suspension (makroskopische Betrachtungsweise zur Beschreibung des Auftriebs)
- Die schleichende Umströmung als Voraussetzung für die Berechnung der Stabilität der Suspension nach dem Ansatz von Saak *et al.* (2001) (mikroskopische Betrachtungsweise zur Berechnung der Stabilität der Suspension)

2 Stabilität der Suspension

2.1 Nachweis der Stabilität

Für die Ermittlung der Stabilität einer Suspension (mikroskopische Betrachtungsweise) gibt es in der Literatur Berechnungsansätze, von denen nachfolgend jener von Saak *et al.* (2001) erläutert wird.

Ein Absinken von Grobzuschlägen innerhalb der Suspension kann ausgeschlossen werden, wenn nach dem Ansatz von Saak *et al.* (2001) eine Mindestfließgrenze $\tau_{0,\min}$ der Suspension nachgewiesen werden kann.

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

mit

γ_{Korn} = Wichte des Zuschlagskorns

γ_{Fluid} = Wichte des Fluids (tragende Mehlkornsuspension)

r_{Korn} = Radius des Zuschlagskorns

Für nicht poröse mineralische Zuschläge kann die Wichte der Zuschlagkörner mit $\gamma_{Korn} = 27,2 \text{ kN/m}^3$ angesetzt werden. Aus dem maximalen Korndurchmesser der Zuschläge und der Wichte der Suspension ergibt sich dann die Mindestfließgrenze der stabilen Suspension.

3 Die Auftriebswirkung der Suspension

3.1 Laborversuche zur Auftriebswirkung in Suspensionen

Bei den Laborversuchen zur Auftriebswirkung in Suspensionen wird ein an beiden Stirnseiten verschlossenes Rohr an einer Haltevorrichtung befestigt. Das Rohr wird in waagerechter Lage innerhalb eines Glasbeckens fixiert, die Haltevorrichtung ist über eine Kraftmessung an einem äußeren Rahmen zur Lastabtragung befestigt (Bild 3).



BILD 3: VERSUCHSANORDNUNG ZUR MESSUNG DER AUFTRIEBSWIRKUNG IM LABOR

Die Ergebnisse dieser Versuche lassen sich durch den zuvor beschriebenen Tauchballon-Effekt anschaulich erläutern. Im Unterschied zum gefüllten Ballon ist das luftgefüllte Rohr leichter als die umgebende Suspension, wodurch der Druckunterschied oberhalb und unterhalb des Rohres nicht mehr allein durch die äußere Kraft und die behinderte Fließbewegung bestimmt wird.

Die gemessene Auftriebskraft in der Versuchssuspension übersteigt bei zunehmender Eintauchtiefe des Rohres die Gewichtskraft des verdrängten Suspensionsvolumens um ca. 30% (Bild 4). In diesem Versuch wird auch der Effekt der behinderten Umströmung des Rohres erkennbar, wodurch sich auf der Unterseite des Rohres ein höherer Flüssigkeitsdruck als oberhalb des Rohres und somit die gemessene erhöhte effektive Auftriebskraft ergibt.

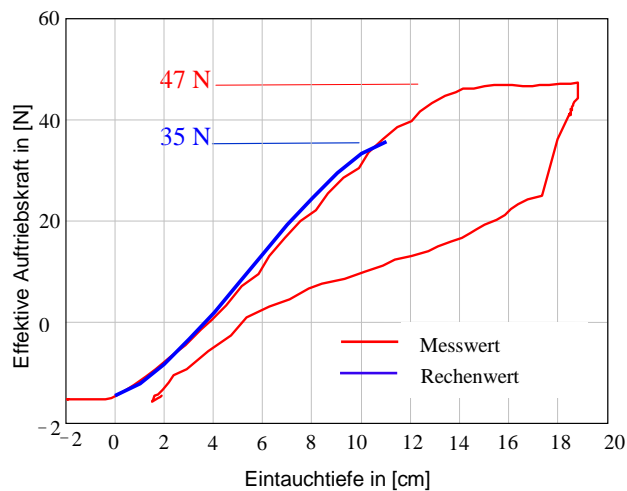


BILD 4: LABORVERSUCH ZUR AUFTRIEBSWIRKUNG VON SUSPENSIONEN

Durch die Auswertung weiterer Messungen an klein- und großmaßstäblichen Versuchen an der HS Bochum sowie Messungen im Rahmen einer Pilotbaustelle der WSW Energie und Wasser AG in Wuppertal konnten die entsprechenden Werte bestätigt werden.

Für die effektive Auftriebskraft, die auf ein Rohr wirkt, ergibt sich insgesamt:

$$f_{A,eff} = r_{Rohr} \cdot \pi \cdot (r_{Rohr} \cdot \Delta\gamma_{Rohr} + 6 \cdot \Delta\tau_f)$$

mit

- Differenzwichte von hochkonzentrierter Suspension und Rohr
 $\Delta\gamma_{Rohr} = (\rho_{Rohr} - \rho_{Suspension}) \cdot g$
- Auftriebswirksame Fließgrenze
 $\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{0,min}$
- Messwert der Fließgrenze der Suspension
 τ_f
- Mindestfließgrenze der stabilen Suspension
 $\tau_{0,min}$

4 Stützwirkung auf Grabenwände

4.1 Standsicherheit des offenen Grabens

Bei Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung sollte der Grabenverbau gezogen werden, solange das Verfüllmaterial fließfähig ist und die entstehende Verbauspur schließen kann (vgl. z.B. Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen - FGSV). Hierbei ist die Standsicherheit des Grabens gemäß DIN 4126 (2008) in jedem Bauzustand und in allen Rückbauzuständen zu gewährleisten. Das noch fließfähige Verfüllmaterial muss daher in der Lage sein, während und nach dem Ziehvorgang, die Grabenwand stützen.

In den aktuellen Regelwerken und Vorschriften sind allgemeine Hinweise auf den Rückbauzustand zu finden, konkrete Vorgaben zum Nachweis des offenen, flüssigkeitsgestützten Grabens fehlen jedoch. Aus bodenmechanischer Sicht ist das Prinzip der Stützung des offenen Grabens durch fließfähige Verfüllmaterialien mit der Suspensionsstützung im Schlitzwandbau prinzipiell vergleichbar, daher werden zunächst die Regelungen und die Nachweisführung der Schlitzwandnorm näher betrachtet.

Die Materialeigenschaften der im Schlitzwandbau üblichen Stützsuspensionen und der flüssigen Verfüllmaterialien unterscheiden sich jedoch teilweise erheblich, so dass in einem weiteren Schritt ein eigenständiges Nachweisformat für den offenen Graben in Anlehnung an die Schlitzwandnorm vorgeschlagen wird.

4.2 Ableitung eines Nachweisformates für die innere Standsicherheit suspensionsgestützter Gräben

Der Nachweis gegen Herausbrechen einzelner Körner oder Bodenbereiche nach E DIN 4126:2004-08 [Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden] (Bild 5) sollte in Anlehnung an den Nachweis der Suspensionsstabilität von Frischbeton geführt werden. Hierbei ist wichtig, dass für den Nachweis die Wichte der Mehlkornsuspension betrachtet wird. Im Schlitzwandbau entspricht die Wichte der Bentonitsuspension der Wichte der tragenden Mehlkornsuspension, wodurch eine Differenzierung nicht erforderlich wird. Für die Methode der flüssigen Grabenverfüllung ist diese Unterscheidung aber wesentlich hinsichtlich der Nachweisführung.

Es wird nachfolgend vorgeschlagen, beide Betrachtungsweisen zu kombinieren und für den Nachweis der inneren Standsicherheit des unverbauten suspensionsgestützten Rohrgrabens nach *Walz (1989)* von einem Winkel der Gleitebene im angrenzenden Boden von $\varphi = 45^\circ$, entsprechend der lockersten Lagerung der Kugelpackung (Bild 6), auszugehen. Diese Annahme berücksichtigt, dass bei Aushub und Rückbau der Grabensicherung eine Auflockerung der Grabenwand stattfindet, zudem liegt diese Annahme für den Nachweis auf der sicheren Seite.

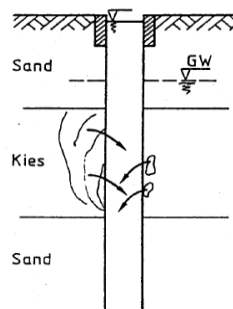


BILD 5: EINDRINGUNG DER SUSPENSION UND KRAFT-ÜBERTRAGUNG AUF DAS KORNGERÜST (WALZ, 1989)

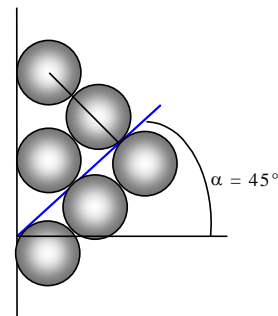


BILD 6: LOCKERSTE LAGERUNG DER KUGELPACKUNG ALS ANSATZ FÜR DEN UNGÜNSTIGSTEN Gleitflächenwinkel IM BODEN (WALZ, 1989)

Nach *Saak et al. (2001)* errechnet sich die Mindestfließgrenze einer stabilen Suspension zu:

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

Als ungünstigster Berechnungsfall für das Herausbrechen einzelner Körner wird die lockerste Kugelpackung (*Walz, 1989*) berücksichtigt:

$$\tau_{f,min} \geq \frac{4}{3} \cdot (\gamma_{Korn} - \gamma_{Fluid}) \cdot r_{Korn} \cdot \sin\alpha$$

Mit $\alpha = 45^\circ$ als konservative Annahme folgt aus diesen Überlegungen für die Mindestfließgrenze zum Nachweis der inneren Standsicherheit näherungsweise die Bedingung:

$$\tau_{f,min} \geq (\gamma_{Korn} - \gamma_{Fluid}) \cdot r_{Korn}$$

Relevant wird der Nachweis in der vorgeschlagenen Form bei nichtbindigen Böden, wobei der für den Nachweis maßgebende Korndurchmesser d_{90} - also der Maschenweite bei 90% Siebdurchgang - entsprechen sollte. Ein weiterer Sicherheitszuschlag ist dann nicht erforderlich, da es den Überlegungen von *Weiß (1971)* folgend ausreicht, wenn das Korngerüst insgesamt gestützt wird. Die kleineren Körner sind dann in der Lage, das gesamte Gefüge ausreichend zu stabilisieren, so dass auch wenn einzelne besonders große Körner aus der Wand abgleiten, ein fortschreitender Versagensmechanismus nicht zu erwarten ist.

4.3 Abschätzung des Verlustes an stützender Flüssigkeit

Die Standsicherheit eines mit stützender Flüssigkeit gefüllten Grabens kann nur nachgewiesen werden, wenn der Flüssigkeitsspiegel nicht unter das für den Nachweis mindestens erforderliche Niveau absinkt (Bild 7).

Ein unplanmäßiges Absinken des Flüssigkeitsspiegels kann auftreten, wenn beim Aushub Hohlräume z.B. Rohrleitungen oder besonders grobporige Bodenschichten angeschnitten werden.

Insbesondere bei der Methode der flüssigen Grabenverfüllung ist das tatsächliche Volumen des zu verfüllenden Grabens zu ermitteln. Neben der Verbauspur, die beim Rückbau der Grabensicherung entsteht, ist zu berücksichtigen, dass infolge von Ausbrüchen beim Ausheben des Grabens Hohlräume hinter den Verbaulementen entstehen können, die sich beim Rückbau der Sicherung mit Suspension füllen (Bild 8). Der tatsächliche Rauminhalt des Grabens kann sich hierdurch gegenüber der planmäßigen Geometrie erheblich vergrößern.

In jedem Fall ist der zu erwartende Verlust an stützender Flüssigkeit vor dem Verfüllen des Grabens abzuschätzen und bei der Bereitstellung des fließfähigen Verfüllmaterials zu berücksichtigen. Der Rückbau der Grabensicherung sollte erfolgen, solange ausreichendes Ersatzmaterial zum Ausgleich von Flüssigkeitsverlusten zur Verfügung steht.

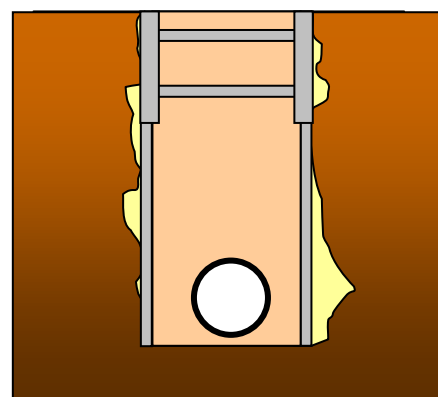


BILD 7: SUSPENSIONSSPIEGEL NACH VERFÜLLEN DES VERBAUTEN GRABENS

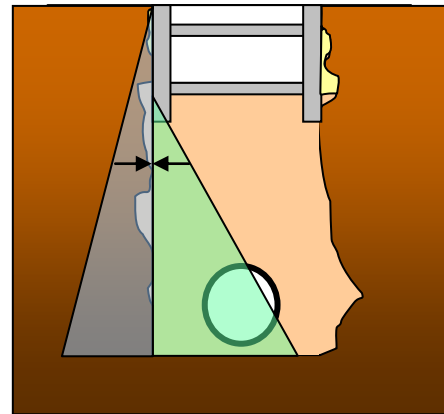


BILD 8: SUSPENSIONSSPIEGEL NACH RÜCKBAU DER DIELEN DES KAMMERDIELENVERBAUS

5 Messung der Parameter fließfähiger Verfüllbaustoffe

5.1 Baustellentaugliches Pendelgerät

Um die wichtigsten Charakteristika der Suspensionen im Zustand des Einbaus überwachen zu können, sind insbesondere die Parameter

- Wichte der Suspension
- Kornverteilung der Zuschläge
- Fließgrenze der Suspension

auf der Baustelle zu messen.

Während die Messung der Suspensionswichte nur einen geringen Aufwand bedeutet und die Kornverteilung der Zuschläge aus der Rezeptur ersichtlich sind, ist eine zuverlässige Messung der Fließgrenze mit den bekannten einfachen Messverfahren, bspw. aus der Geotechnik (Kugelharfe oder Pendelgerät) oder aus der Betontechnologie (z.B. Ausbreitversuch), nicht möglich.

Für eine Messung der Fließgrenze unter Baustellenbedingungen wurde das Pendelgerät nach Weiß grundlegend modifiziert. Die Funktion des Gerätes und die Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden kurz beschrieben.

Das modifizierte Pendelgerät (Bild 9) besteht im Wesentlichen aus einem Traggestell und einem Tauchkörper (Kugel oder Flügel), welcher über einen Kunststoffaden und zwei Umlenkrollen mit einem Gewichtskörper verbunden ist.

Der Gewichtskörper ist ein geschlossener, wassergefüllter Zylinder, der sich als Kolben in einem offenen äußeren Zylinder bewegt. Der äußere Zylinder wird ebenfalls mit Wasser gefüllt, wodurch der Kolben bei steigendem Wasserspiegel im Zylinder auftriebt, da seine Wichte aufgrund eines geringen Restvolumens an Luft im Kolben geringer ist als die des Wassers.

Der Tauchkörper am anderen Ende des Kunststoffadens wird in einem mit Suspension gefüllten Probebehälter abgesenkt.

Der Probebehälter, einschließlich Tauchkörper, befindet sich auf einer Waage, die das Gesamtgewicht von Behälter und Suspension anzeigt, während die Gewichtskraft des Tauchkörpers über den Kunststofffaden auf den Kolben wirkt. Wird nun der Wasserstand im Zylinder reduziert, verringert sich die Eintauchtiefe des Kolbens, wodurch sich die Auftriebswirkung auf den Kolben ebenfalls reduziert. Das Gewicht des Kolbens, das über den Kunststofffaden auf den Tauchkörper wirkt, nimmt zu. Der nun noch teilweise eingetauchte Kolben hat nun das Bestreben, den Tauchkörper aus der Suspension herauszuziehen. Aufgrund ihrer Fließgrenze können in der Suspension Scherkräfte mobilisiert werden, die der Vertikalbewegung des Tauchkörpers in der Suspension entgegenwirken.

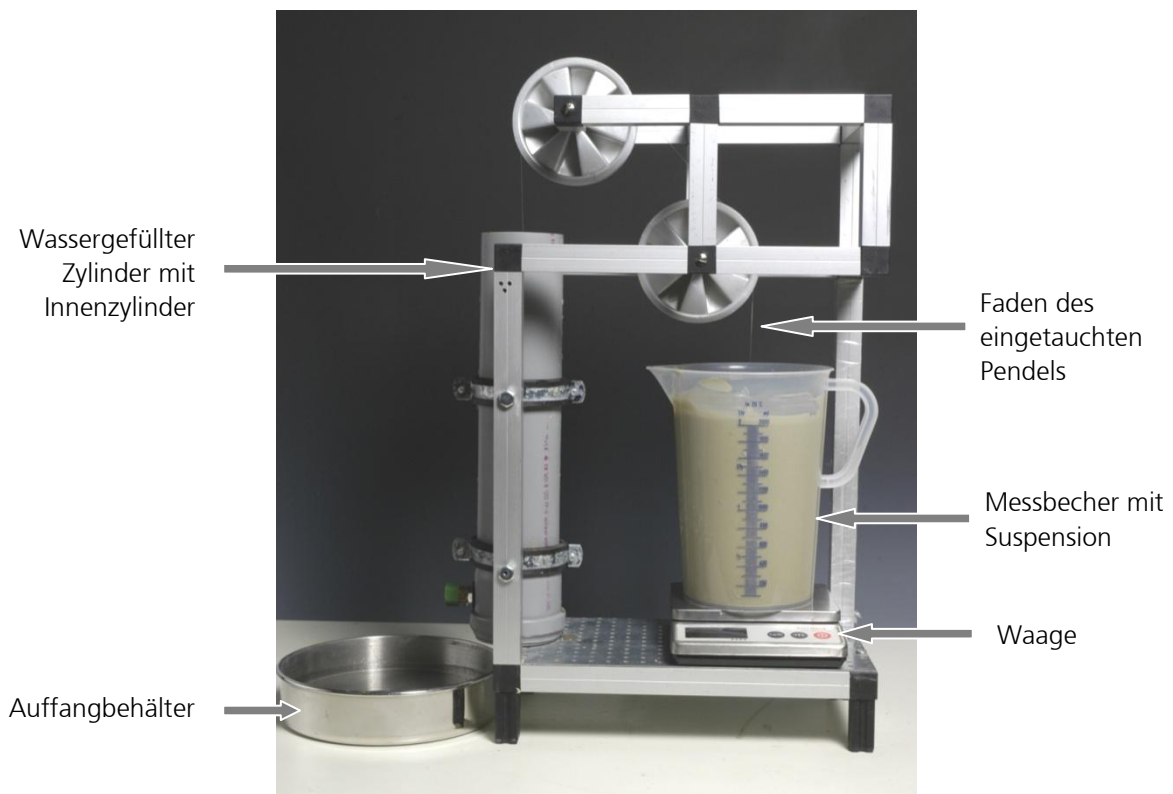


BILD 9: MODIFIZIERTES PENDELGERÄT

Die Größe der mobilisierten Scherkräfte entspricht der Abnahme der gemessenen Gewichtskraft des gefüllten Probenbehälters während der Versuche.

6 Zusammenfassung

Die problemlose Anwendung der Methode der flüssigen Grabenverfüllung setzt einen sicheren Umgang mit dem fließfähigen Verfüllbaustoff auf der Baustelle voraus. In der Praxis und in den zurzeit gültigen Vorschriften sowie Empfehlungen bestehen hierzu noch Unsicherheiten. Da verbindliche Regelungen und Bemessungsgrundlagen weitgehend fehlen, werden im vorliegenden Bericht zunächst die Grundlagen für das Stoffverhalten hochkonzentrierter Suspensionen im Allgemeinen und fließfähiger Verfüllbaustoffen im Besonderen betrachtet.

Die Methode der flüssigen Arbeitsraumverfüllung hat sich weiterhin aufgrund der höheren Kosten des Flüssigbodens selbst gegenüber konventioneller Baustoffe noch nicht flächendeckend durchgesetzt, jedoch liegt das Potential des selbstverdichtenden Verfüllbaustoffs insbesondere in seiner Nachhaltigkeit und somit in der Wirtschaftlichkeit der Gesamtbaumaßnahme. Es sind erhebliche Kosteneinsparungen u. a. durch verkürzte Bauzeiten, Wiederverwendung von Bodenaushüben sowie geringere Instandhaltungskosten infolge der idealen Bettungsverhältnisse und dem Wegfall der mechanischen

Verdichtung. Vor allem in urbanen Räumen respektive in Bereichen von komplizierten Leitungsknotenpunkten bzw. Engpässen ergeben sich wesentliche Vorteile bei der Anwendung fließfähiger Verfüllbaustoffe.

Im Rahmen von Experimenten und Laborversuchen werden die wesentlichen Mechanismen der flüssigen Grabenverfüllung untersucht und Berechnungsansätze zur quantitativen Beschreibung des Suspensionsverhaltens, insbesondere hinsichtlich der Stabilität, der Auftriebswirkung und dem Stützvermögen der Suspension im offenen, unverbauten Graben entwickelt.

Neben der Wichte wird die Fließgrenze der Suspension als maßgebender Parameter für deren Eigenschaften identifiziert und da baustellengeeignete Messverfahren hierfür nicht verfügbar sind, wird ein einfaches Gerät zur Ermittlung der Fließgrenze entwickelt und erprobt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen kann die Stabilität von Suspensionen beurteilt, eine Auftriebssicherung dimensioniert, Belastungszustände der Rohre beim Einbau ermittelt und schließlich die Standsicherheit des offenen, unverbauten Grabens nachgewiesen werden.

7 Literatur- und Quellennachweis

Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K. (1989): An Introduction to Rheology. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Berger W. (2009): WBM Weimarer Boden-Mörtel: Erfahrungsbericht. FITR - Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V.

DAfStb (2003): Richtlinie Selbstverdichtender Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.

DIN 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4126 (2008): Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4127 (1986): Erd- und Grundbau, Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten, Anforderungen, Prüfverfahren, Lieferung, Güteüberwachung. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 12350 (2009): Prüfung von Frischbeton. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 1610 (2010): Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsches Institut für Normung e.V.

DWA-A 139 (2009): Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.

Feickert R. (2008): Selbstverdichtendes Verfüllmaterial – Vielfältige Vorteile in der Praxis. *bi Umwelt-Bau*: 4 (08), S. 33-36

Ferraris C. F., de Larrard F. (1998): Testing and modelling of fresh concrete rheology. National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 8094

FGSV (2010): Merkblatt über zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Gerlach J. (1999): Grundbau Teil 2 – Baugruben und Gründungen. B.G. Teubner Stuttgart-Leipzig

Gropengießer A. J. (2010): Verfahren zur Eignungsprüfung von Flüssigboden für Kanalgrabenverfüllungen. Diplomarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal, unveröffentlicht.

Günthert F. (2006): Projekterfahrung mit SVM. *Steinzeug-Information* 2006, S. 35-37. Fachverband Steinzeug e.V.

Haist M. (2005): Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen. *Karlsruher Reihe Massivbau, Bautechnologie, Materialprüfung*, Heft 66

Hillmann C. (2009): Innovative Lösung in der Lübecker Altstadt, *bi UmweltBau* 2 | 09

Hillmeier B., Buchenau G. (2001): Kapitel 3: Rheologie. In: Reinhardt H.W. (Hrsg.) et al. Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB), DAFStb Heft 516, Beuth Verlag, Berlin

Hochschule Bochum – Bochum University of Applied Sciences (2010): Untersuchung der Mischungsstabilität von fließfähigen Verfüllbaustoffen. Unveröffentlicht

Kisselbach G. (1999): Projektstudie über die Verfüllung von Künetten. Magistrat der Stadt Wien, Magistratabteilung 22 – Umweltschutz

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW (2012): Entwicklung kostengünstiger Sanierungsverfahren insbesondere zur Grundstücksentwässerung, Abschlussbericht

ONR 23131 (2005): Verfüllung mit stabilisierten, fließfähigen Verfüllmaterialien (SVM). Kriterienkatalog für stabilisierte Verfüllmaterialien

Österreichisches Patent AT Nr. 374163 (1984): Gießfähige Mischungen, vorzugsweise zum Verfüllen von Künetten, Gräben und dgl.

S&P GmbH: Stein R., Brauer A., Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH (2005): Einsatz von hydraulisch gebundenen Verfüllbaustoffen zur Rückverfüllung von Leitungsgräben im Kanalbau. 23.02.2005, Bochum

Saak A. W., Jennings H. M., Shah S. P. (2001): New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete. ACI Materials Journal, 98 (2001), No. 6, S. 429-439

Schade H.-W. (2010): Bodenbehandlung in der neuen ZTVE-StB09 sowie in den neuen Merkblättern. 5. Fachtagung Zementstabilisierte Böden, Chemnitz, 27. Januar 2010. GBB-Gütegemeinschaft Bodenverbesserung Bodenverfestigung

Stolzenburg, O. (2009): Fluch oder Segen eines neuen Verfahrens – Was ist Flüssigboden wirklich? LOGIC Logistic Engineering GmbH. bi UmweltBau: 1 (09), S. 56-61

Triantafyllidis T., Arsic I.(2009): Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 40, ISSN 1439-9342

Walz B. (1989): Grundlagen der Flüssigkeitsstützung von Erdwänden. 4. Christian Veder Kolloquium, Graz

Weiß F. (1971): Schlitzwandbauweise. Schriftenreihe der Tiefbau-Berufsgenossenschaft, H. 7

Wille Geotechnik (2010): www.wille-geotechnik.com/129.0.html?&L=0

Wüstholtz T. (2005): Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation an der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.