

Verhalten von Rohren im Lastfall „Auftrieb in Flüssigboden nach RAL Gütezeichen 507“ und der wirtschaftliche Zusammenhang mit der erzielbaren Bauleistung

Leipzig. Da Flüssigboden nach RAL Gütezeichen 507, hergestellt auf der Grundlage des RSS Flüssigbodenverfahrens, ein temporär thixotropes Verfüllmaterial ist, gelten für das Auftriebsverhalten von Rohren beim Einbau in Flüssigboden andere Gesetzmäßigkeiten als beim Auftrieb im Wasser. Denn Wasser als Newtonsches Fluid weist eine gleichbleibende Viskosität auf, die sich jedoch bei Flüssigboden im Sinne der vorausgegangenen Definition, in Abhängigkeit von kinetischen Energieeinträgen z. B. beim Einbau des Flüssigbodens und dem mittels individueller Rezeptur steuerbaren Rückverfestigungsverhalten des Materials verändert. Dies hat zur Folge, dass einerseits die Berechnung des Auftriebs in Flüssigboden nicht auf dem seit Archimedes bekannten Rechenweg erfolgen kann und andererseits auch die Rohre ein anderes Verhalten während diesen Lastfalls aufweisen, als es bei einer klassischen Auftriebsberechnung zu erwarten wäre. Es galt, durch den Verfahrensentwickler erarbeitete theoretische Ansätze zur Berechnung des Auftriebs von Rohren im Flüssigboden im Rahmen eines Großversuches an biegeweichen Rohren der Firma REHAU zu überprüfen, mit den Ergebnissen der Prüfungen das Berechnungsmodell auf das konkrete Rohr zu kalibrieren oder gar weiterzuentwickeln und so auf Grund exakterer Berechnungen, Reserven bei der Einbautechnologie zu identifizieren und deren Auswirkungen auf mögliche Leistungssteigerungen zu quantifizieren. Dieses Thema wurde vom Forschungsinstitut für Flüssigboden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Münster bearbeitet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in diesem Beitrag vorgestellt. Sie können praxiswirksam von den Anwendern des untersuchten Rohrmaterials und über die Ergebnisse projektbezogener Rohrstatiken für die jeweiligen Baustellen genutzt werden.

Einleitung

Flüssigboden nach RAL GZ 507 ist ein Verfüllmaterial, das auf der Grundlage eines Verfahrens hergestellt wurde, das vor über 20 Jahren durch das derzeitige Forschungsinstitut für Flüssigboden (FiFB) aus Leipzig entwickelt wurde. Im Rahmen eines damaligen Forschungsprojektes, das sich mit Lösungen von Infrastrukturproblemen auf der Grundlage komplexer Leitungstrassen beschäftigte, die den gemeinsamen Bau von Regenwasser, Schmutzwasser und sonstigen Versorgungsleitungen betrafen, erhielt das Ergebnis dieser Verfahrensentwicklung die Bezeichnung RSS Flüssigbodenverfahren. Dieses damals neue Verfahren löste eine Reihe von Problemen des klassischen Kanal- und Leitungsbaus. Deshalb gab es auch schnell Nachnutzer des Begriffes „Flüssigboden“, deren Angebote allerdings oft nichts mit Flüssigboden im Sinne der Vermeidung von mörtel- oder betonartigen Strukturen oder gar der Erhaltung bodentypischer Eigenschaften zu tun hatten. Zur Vermeidung der zunehmenden Anzahl von Bauschäden durch die mitunter sogar wohl gar gezielt irreführende Verwendung des Begriffes „Flüssigboden“, gründeten primär Auftraggeber und Planer im Jahre 2008 die RAL Gütegemeinschaft Flüssigboden e. V. Deren erklärtes Ziel wurde es, transparente Maßstäbe der Gütesicherung als Hilfsmittel zur sicheren Vermeidung von Bauschäden zu erarbeiten und verfügbar



zu machen. In diesem Zusammenhang stand auch der Lastfall „Auftrieb im Flüssigboden“ erstmals auf der Tagesordnung.

Doch zu den zu beachtenden neuen Aspekten bei der Anwendung des RSS Flüssigbodenverfahrens gehörte auch die Tatsache, dass solch ein Flüssigboden zeitweise thixotrop reagiert, also bei Eintrag kinetischer Energie, seine Viskosität verändert. Erste Untersuchungen dieses Verhaltens fanden bereits im Jahre 2000 durch die Universität Leipzig/MFPA in Zusammenarbeit mit dem Verfahrensentwickler statt und führten zur Erarbeitung der ersten Berechnungsmodelle durch den Verfahrensentwickler, die einen praxisnahen Umgang mit diesem Materialverhalten ermöglichten, allerdings als Folge der noch geringen Datendichte und fehlenden Erfahrungen aus der Praxis auf Baustellen, im Jahre 2000 und den dann unmittelbar folgenden, noch eine gewisse Unschärfe aufwiesen.



Rohr, seitlich geführt in einer Versuchsanordnung [1]



Auftriebsmessung als Zugkraft [1]

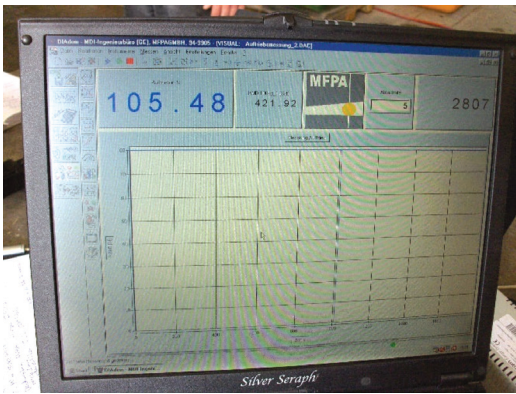


Mit RSS Flüssigboden gefüllter Prüfbehälter [1]

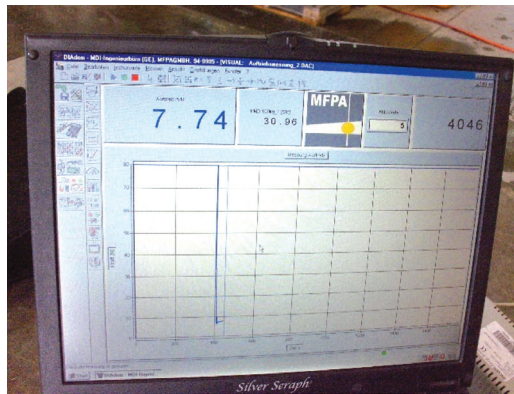


Plausibilitätsprüfung Verfestigung [1]

Mit Hilfe dieser ersten Versuche wurde sowohl der zeitliche Verlauf der Rückverfestigung bei unterschiedlich eingestellten Fließfähigkeiten des RSS Flüssigbodens gemessen als auch die Plausibilität der gemessenen Ergebnisse überprüft, indem das Ansteifungsverhalten mit kleiner Labortechnik gemessen und mit dem Auftriebsverlauf verglichen wurde.



Aufzeichnung Rohrauftrieb zu Beginn [1]



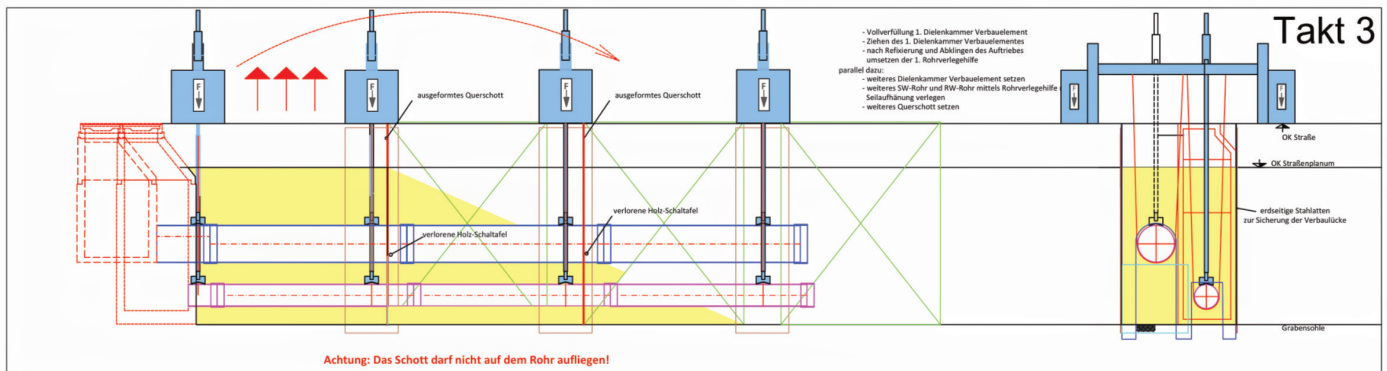
Höhe Rohrauftrieb zu Versuchsende [1]

Der entstehende Auftrieb ist nicht allein von der Dichte des Flüssigbodens, im temporär, fließfähigen Zustand abhängig, sondern von weiteren Faktoren, deren Art und Wirkung für eine korrekte Berechnung erst einmal erkannt und verifiziert werden mussten. Zahlreiche kleinmaßstäbliche Laborversuche des FiFB als Verfahrensentwickler berücksichtigten erstmals das teils stark unterschiedliche rheologische Verhalten der verschiedenen Bodenarten in der temporär fließfähigen Phase und führten zu ersten Berechnungsmodellen. Diese wurden von Fachplanern für Flüssigbodenanwendungen erstmals seit dem Jahr 2002 genutzt.

Im Verlauf der Weiterentwicklung technischer Einbauhilfsmittel durch den Verfahrensentwickler, die gleichzeitig als Messmittel für den zeitlichen Verlauf des Auftriebs beim Einbau von Rohren in Flüssigboden genutzt werden konnten, kam es auch zur Weiterentwicklung der Möglichkeiten der benötigten Auftriebsberechnung. Dabei fiel auf, dass einerseits die Ergebnisse kleinmaßstäblicher Versuche infolge der Versuchsspezifität in einem Labor im Vergleich zur Baustelle Differenzen aufwiesen, doch vor allem auch, dass das aus den Werkstoffkennwerten berechnete Materialverhalten der Rohre, teils starke Abweichungen im Vergleich zu den Messungen auf den Baustellen zeigte. Dafür gab es unterschiedliche Ursachen, die von einem Upscalingeffekt zwischen Labor und Baustelle bis hin zu den Wirkungen technologischer Unterschiede beim Einbau des Flüssigbodens im Zusammenspiel mit dessen zeitweise thixotropen Verhalten reichten. Daraus leiteten sich erforderliche Sicherheiten ab, die in den Auftriebsberechnungen Eingang fanden. Bei genauerer Kenntnis des tatsächlichen Materialverhaltens und exakten technologischen Vorgaben, im Zusammenspiel mit passenden Einbauhilfsmitteln kann man auf derartige und dann unnötige Sicherheiten jedoch verzichten. Da es sich aber bei statischen Berechnungen um haftungsrelevante Vorgänge handelt, müssen derartige Korrekturen auf der Grundlage exakt ermittelter Parameter erfolgen, die in den kleinmaßstäblichen Laborversuchen jedoch nicht ausreichend genau erarbeitet werden können. Deshalb bedarf es für jedes Rohr eines aussagekräftigen Großversuches, den die Hochschule Münster für Rohre der Firma REHAU in Zusammenarbeit mit dem FiFB durchführte und der anschließenden Auswertung der Ergebnisse, um auf unnötige Sicherheitsreserven verzichten zu können. Der Verzicht auf diese Reserven der Auftriebsberechnung ist interessanterweise mit konkreten Folgen für die Leistung der ausführenden Baufirma verbunden, die im Artikel ebenfalls noch dargestellt werden. Die Firma REHAU erkannte die Vorteile genauer, für die Rohrstatik relevanter Parameter für ihre Kunden und stellte die Rohre für die notwendigen Versuche zur Verfügung. Denn wenn man die vorgenannten Reserven konkret benennen und bereits in der Planung und bei der Berechnung der Rohrstatik berücksichtigen kann, ist es möglich, die Einbautechnologie in einer Form zu verändern, die mit konkreten Steigerungen der Bauleistung verbunden ist, ein relevanter Vorteil für alle am Bau Beteiligten.

Stand der Technik

Der Stand der Technik beim Einsatz von Flüssigboden besteht darin, dass die Rohrstatik neben den Angaben zur Rohrbelastung auch die Angabe des maximal zulässigen Abstandes von Lagefixierungen für die einzubauenden Rohre liefert.



In die statischen Berechnungen gehen dazu Labordaten ein, wie z. B. die Viskosität des einzubauenden Flüssigbodens oder der zeitliche Verlauf der zu erwartenden Rückverfestigung. Dieser Verlauf ist für die zu erwartenden Maxima der Auftriebskräfte und die Ermittlung dazugehöriger, für die Technologie wichtiger Punkte bei der Rückverfestigung des Flüssigbodens, wichtig. Aber besonders auch exakte Materialkennwerte, die aus den Angaben der Rohrhersteller stammen, sind für die Richtigkeit der statischen Berechnungen erforderlich. Mit den Ergebnissen dieser statischen Berechnungen kann die Baufirma auf der Baustelle unkompliziert und genau arbeiten, wenn sie über die erforderlichen Hilfs- und Messmittel verfügt, die neben der Lagefixierung der Rohre und damit der Beherrschung des Auftriebs auch ein Messmittel sind. Mit Hilfe eines solchen Messmittels können die technologisch relevanten Parameter des Prozesses der Rückverfestigung des Flüssigbodens sehr exakt bestimmt werden. Deren Bestimmung ermöglicht es dann, den jeweiligen Verbau zum richtigen Zeitpunkt zu ziehen, ohne dass es bei einem zu frühen Ziehen zum Kollabieren des Grabens kommt oder bei einem zu späten Ziehen zu Hohlräumen mit entsprechenden späteren Folgen. Aber auch auf die Leistung hat die genaue Bestimmung technologisch relevanter Momente während des Bauens einen entsprechenden Einfluss.

Beispiel einer exakt vorgegebenen Einbautechnologie [8]

Technisch gut ausgerüstete Baufirmen arbeiten daher als Grundlage einer hohen Bauleistung und eines sicheren Rohreinbaus mit den für eine wirtschaftliche Technologie des Verfahrens ebenfalls gezielt entwickelten Rohrverlegehilfen, die sowohl die exakte Lagefixierung der Rohre in der Einbauposition im Graben ermöglichen als auch die Messung des Auftriebsverlaufes während des Einbaus der Rohre. Neben der vorgenannten Bestimmung technologisch relevanter Momente des Rückverfestigungsprozesses des Flüssigbodens, ermöglicht diese Technik es den Baufirmen auch, rechtzeitig das Erreichen der maximal zulässigen Auftriebskraft durch die Auftriebsmessung festzustellen und deren Überschreitung sicher zu vermeiden. Dabei sind die Abstände, in denen diese Rohrverlegehilfen (RVH) gesetzt werden und die sich aus der statischen Berechnung für den Lastfall „Auftrieb im Flüssigboden“ ergeben, das Ergebnis der für die höchstzulässige Verformung bzw. Spannung des jeweiligen Rohres maximal zulässigen Kräfte.

Rohrhersteller, die in der Lage sind, die Rohrlängen an die vom jeweiligen Einbaufall und die damit verbundenen maximal zulässigen Abstände der RVH'n flexibel anzupassen, verschaffen den Baufirmen einen wichtigen Vorteil für die Verbesserung der Bauleistung. Denn der Aufwand beim Einbau eines Rohres ist mit Ausnahme der jeweiligen Aushubmassen und der dann wieder zu verfüllenden Menge an Flüssigboden

gleich, egal ob das jeweilige Rohr 3 m lang ist oder beispielsweise 4,75 m. Kann eine Baufirma aber in der fast gleichen Zeit das Rohr der beispielhaften Länge 4,75 m einbauen, statt nur Standardlängen von z. B. 3 m einbauen zu können, liegt die jeweilige Tagesleistung entsprechend höher. Im vorliegenden Fall entspräche das einer Leistungssteigerung auf 158 %. Können nur Standardlängen eingesetzt werden, ist die Nutzung der statischen Reserven des eingesetzten Rohres zur Steigerung der Bauleistung leider nicht möglich. Eine höhere Leistung hat aber zur Folge, dass geringere Kosten pro Meter eingebauten Rohres entstehen.

Es lohnt sich daher, mit Rohren zu arbeiten, die in den gewünschten und von der Auftriebsstatik abhängigen Längen geliefert werden können, selbst wenn als Folge der individuellen Längen ein etwas höherer Aufwand für die Rohrhersteller entsteht, der auf den Preis der Rohre umgelegt werden muss. Dies bestätigen zahlreiche, bereits realisierte und nachkalkulierte Projekte.

Problemstellung

Die Unterschiede zwischen den auf Grundlage der bisher verfügbaren Materialkennwerte berechneten und den tatsächlich gemessenen Rohrverformungen machen zusätzliche Sicherheiten für die statischen Berechnungen im Lastfall „Auftrieb im Flüssigboden“ erforderlich. Diese derzeit noch erforderlichen, zusätzlichen Sicherheiten, stellen eine weitere Möglichkeit dar, die Bauleistung zu steigern, wenn sie bekannt sind, exakt quantifiziert und so gezielt als Leistungsreserven genutzt werden können.

Ergänzend gehören dazu, die Vorgehensweise beim Einbau des Flüssigbodens klar beschreibende, technologische Vorgaben. Diese sind erforderlich, um die kinetischen Energieeinträge in den noch fließfähigen Flüssigboden zu steuern und nicht im unpassenden Moment zu maximieren.

Aufgabenstellung

Es galt, im Rahmen der geplanten Großversuche, das Verhalten der Rohre unter Auftrieb im frisch eingebauten Flüssigboden und die Veränderungen des Auftriebs über den Verlauf der Rückverfestigung zu prüfen und zu dokumentieren. Dabei sollten die Durchbiegung der Rohre und die Auftriebskräfte an den – die Lage der Rohre fixierenden Punkten – gemessen und über den zeitlichen Versuchsablauf dokumentiert werden.

Für die statischen Berechnungen ist es sehr wichtig, die Abhängigkeiten des Auftriebs und damit der statischen Belastungen des Rohres von der, zeitlich und technologisch bedingt, veränderlichen Viskosität des Flüssigbodens, exakt für den geprüften Rohrtyp in die Berechnungen einfließen lassen zu können. Dafür mussten die Großversuche bei unterschiedlichen Viskositäten wiederholt werden. Um die Baustellentauglichkeit der Messungen abzusichern wurde auch das jeweilige Ausbreitmaß ermittelt und für die Bewertung des Verhaltens der Rohre unter Auftrieb herangezogen. Das Ausbreitmaß ist, zusammen mit der Kenntnis der Art des Ausgangsbodens, ein gutes Kriterium, um die technologisch wichtige Eigenschaft des Auftriebs, mittels der Rezeptur des Flüssigbodens, gezielt beeinflussen zu können. Die Messungen im Versuchsstand erfolgten für mehrere unterschiedliche Rohrdurchmesser, so dass der Einfluss sich ändernder Rohrquerschnitte, die in die Berechnung des für die Rohrstatik erforderlichen Flächenträgheitsmomentes eingehen, ebenfalls gut verglichen werden konnten.

Durch den Vergleich der versuchstechnisch gemessenen Kräfte und Verformungen der biegeweichen Rohre mit den rechnerisch auf dem bisherigen Weg über die Nutzung der Materialkenngrößen ermittelten Verformungen, sollte primär festgestellt werden, ob es relevante Unterschiede zwischen den bisher verfügbaren und für die statischen Berechnungen genutzten Materialkenngrößen und den in den Versuchen gemessenen gibt. Da infolge der schon bekannten Messungen auf Baustellen mit signifikanten Unterschieden gerechnet wurde, sollten die Versuche auch dafür genutzt werden, um die bekannten Ursachen besser quantifizieren zu können. Wenn dies im Ergebnis der Versuche gelingt, kann auf die derzeit noch erforderlichen, zusätzlichen Sicherheiten bei den geprüften Rohren künftig verzichtet werden.

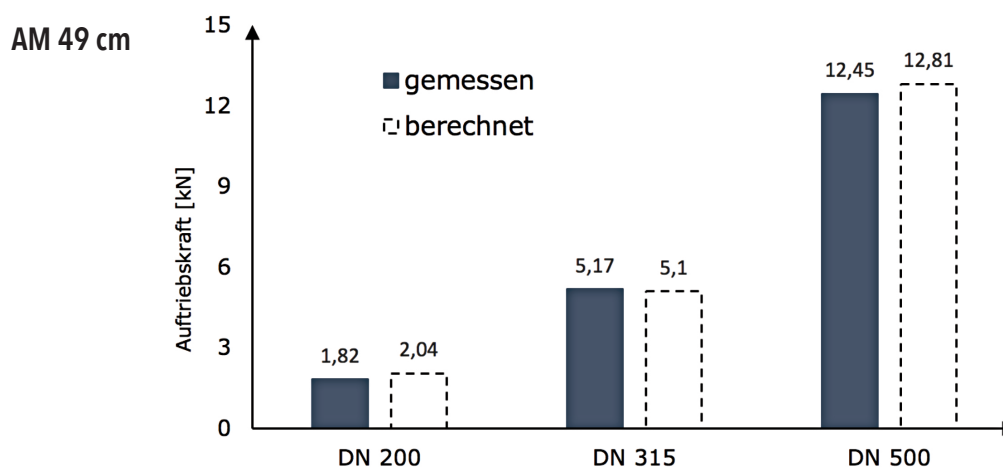


Versuchsstand der Hochschule Münster

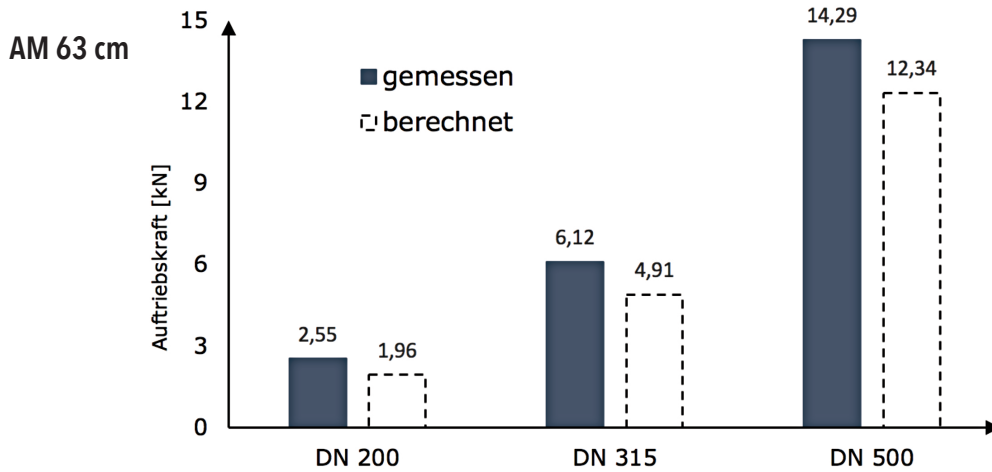
Somit bestand die wirtschaftlich wichtige Hauptaufgabe dieser Versuche darin, mögliche Leistungsreserven besser und exakter quantifizieren zu können. Denn die mögliche Steigerung der Bauleistung hängt von der planbaren Ausnutzung der max. zulässigen Verformung der Rohre und damit der max. zulässigen Einbaulänge der Rohre ab.

Ergebnisse der Großversuche und Widersprüche zu bisherigen Berechnungen

1. Auftriebskräfte



Auftriebskräfte für AM 49 cm bei Ringsteifigkeit SN10



Auftriebskräfte für AM 63 cm bei Ringsteifigkeit SN10

Auftriebskraft für AM 49 cm [kN]					
Durchmesser	Ringsteifigkeit	berechneter Wert	gemessener Wert	Δ	%
DN 200	SN10	2,04	1,82	0,22	12%
	SN16	2,01	1,36	0,65	48%
DN 315	SN10	5,10	5,17	-0,07	-1%
	SN16	5,00	4,89	0,11	2%
DN 500	SN10	12,81	12,45	0,36	3%
	SN16	12,61	12,15	0,46	4%

Tabelle 1: Auftriebskräfte für AM 49 cm

Auftriebskraft für AM 63 cm [kN]					
Durchmesser	Ringsteifigkeit	berechneter Wert	gemessener Wert	Δ	%
DN 200	SN10	1,96	2,55	-0,59	-23%
	SN16	1,93	2,51	-0,58	-23%
DN 315	SN10	4,91	6,12	-1,21	-20%
	SN16	4,81	5,93	-1,12	-19%
DN 500	SN10	12,34	14,29	-1,73	-12%
	SN16	12,13	14,18	-1,58	-11%

Tabelle 2: Auftriebskräfte für AM 63 cm

Auftriebsmessungen bei einer Viskosität, AM 49 cm entsprechend

- Die Messungen der Auftriebsversuche in Form der dokumentierten Stützkkräfte zeigen für das Ausbreitmaß von 50 cm +/- 1 cm (hier exakt 49 cm) eine hohe Übereinstimmung der gemessenen Stützkkräfte mit den berechneten mit Abweichungen, die bei DN 315 unter 3 % lagen, wobei die berechneten Stützkkräfte bis auf eine Ausnahme immer über den tatsächlichen Stützkkräften lagen.
- Dabei waren die Abweichungen bei DN 200 die größten (12% bei SN 10 und 48 % bei SN 16). Insofern spielte der kleine Durchmesser mit DN 200 eine Sonderrolle, da einzig bei dieser Nennweite die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Stützkkräften auffielen. Doch möglicherweise

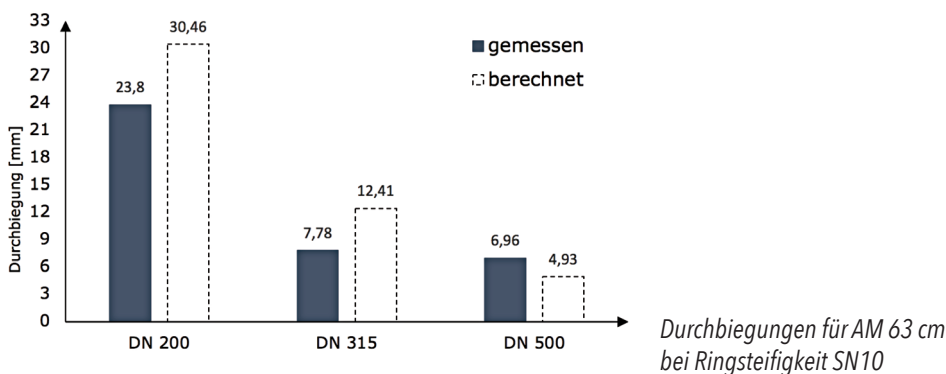
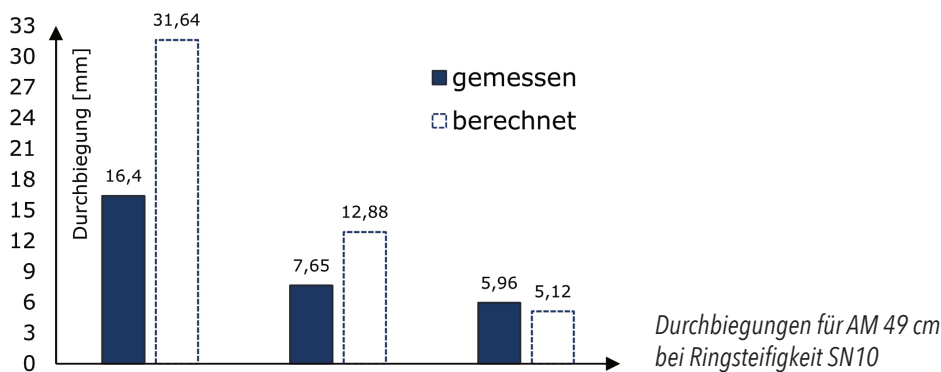
wirkt sich die Einbausituation mit der künstlich bis zum Start der Messungen in der Einbauphase mittels des Einsatzes einer Rüttelflasche gleich gehaltener Viskosität bei den kleinen Nennweiten am stärksten aus und man muss davon ausgehen, dass beim echten Nullpunkt der Messung die Stützkkräfte ebenfalls noch näher an den berechneten liegen.

- Die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Werten lagen bei DN 315 für SN 10 bei 1,4 % und für SN 16 bei 2,2 % und somit im Bereich möglicher Messungsgenauigkeiten.
- Bei DN 500 betragen diese Abweichungen bei SN 10, 2,9 % und bei SN 16, 3,8 %, wobei in beiden Fällen der berechnete über dem gemessenen Auftriebswert lag, was das für DN 200 zu möglichen Messfehlern Gesagte bestätigt.

Auftriebsmessungen bei einer Viskosität, AM 63 entsprechend

- Bei einer Viskosität, die dem Ausbreitmaß 63 cm entsprach, war die Übereinstimmung der Stützkkräfte auch noch ausreichend genau, doch kam es hier schon zu Abweichungen zwischen 11 bis 23 %, wobei hierbei kritisch anzumerken ist, dass die tatsächlichen Auftriebskräfte durchgehend größer als die berechneten Werte waren.
- Hier müssen demzufolge in Zukunft die dazugehörigen Korrekturen im Rechenmodell vorgenommen werden.
- Auch hier war zu erkennen, dass die Abweichungen für DN 200 die größten Beträge, die für DN 500 die kleinsten aufwiesen.

2. Durchbiegungen



Durchbiegung für AM 49 cm [mm]					
Durchmesser	Ringsteifigkeit	berechneter Wert	gemessener Wert	Δ	%
DN 200	SN10	31,64	16,40	15,24	93%
	SN16	26,93	7,79	19,14	246%
DN 315	SN10	12,88	7,65	5,23	68%
	SN16	10,84	6,06	4,78	79%
DN 500	SN10	5,12	5,96	-0,84	-14%
	SN16	4,32	4,81	-0,49	-10%

Tabelle 3: Durchbiegungen für AM 49 cm

Durchbiegung für AM 63 cm [mm]					
Durchmesser	Ringsteifigkeit	berechneter Wert	gemessener Wert	Δ	%
DN 200	SN10	30,46	23,80	6,66	28%
	SN16	25,91	13,73	12,18	89%
DN 315	SN10	12,41	7,78	4,63	60%
	SN16	10,43	7,95	2,48	31%
DN 500	SN10	4,93	6,96	-2,03	-29%
	SN16	4,16	5,93	-1,77	-30%

Tabelle 4: Durchbiegungen für AM 63 cm

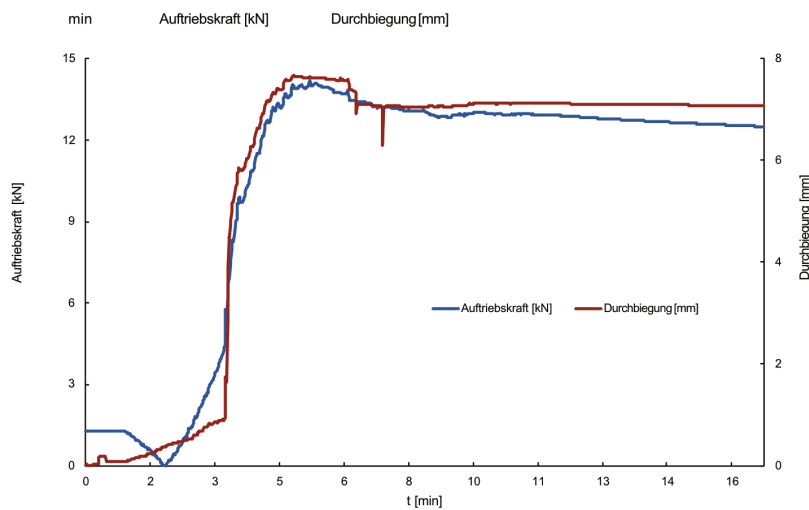
Ergebnisse (Tabellen 3+4):

- Die zuvor berechneten Werte für die Durchbiegungen sind konsistenzunabhängig für DN 200 und DN 315 durchgehend größer.
- Für DN 500 wurden jedoch konstant geringere Werte berechnet, welche zwischen 14 bis 30% kleiner waren.
- Demzufolge beinhalten die Berechnungen bis DN 315 bisher große Sicherheiten, für DN 500 müssen im Gegenzug jedoch weitere Sicherheiten hinzugefügt werden, wenn mit dem aktuellen Berechnungsmodell weitergearbeitet werden soll. Alternativ ist eine Verbesserung des Modells möglich, die das Materialverhalten besser abbildet. Solch ein Modell kann dann mittels der erhaltenen Messwerte kalibriert werden.
- Die bisher vorgegebenen E-Moduli der Rohre scheinen ebenfalls leicht korrekturbedürftig zu sein, so dass eine Ungenauigkeit entsprechenden Einfluss auf die Berechnungen hat.
- Gestützt wird diese These dadurch, dass die Formeln und die einwirkende Kraft für alle drei Rohre identisch war, die einzig verbleibenden Stellschrauben im aktuellen Modell liegen somit in den Flächenträgheitsmomenten (ausgedrückt über die Ringsteifigkeit) und die jeweiligen E-Moduli.
- Doch daneben haben auch noch andere Faktoren einen Einfluss auf die festgestellten Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen für Stützkräfte und Verformungen. So haben neben den Eigenschaften des Rohres vor allem die Einbautechnologie und die über die jeweilige Rezeptur einstellbare Rheologie des einzubauenden Flüssigbodens, wie auch die der Flüssigbodenherstellung zugrunde liegende Bodenart, Einfluss auf die Ergebnisse des aktuellen Rechenmodells der Auftriebsstatik.

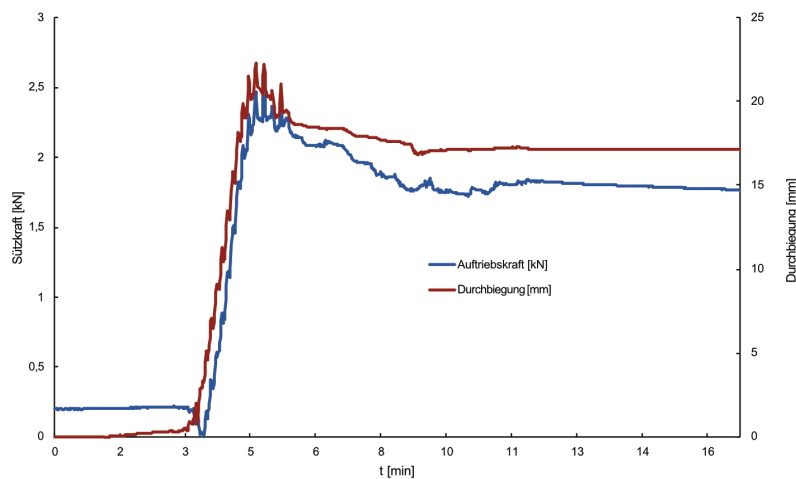
- Die genauere Quantifizierung dieser Einflüsse war vorerst nicht Gegenstand der Auswertung der Versuchsergebnisse, wird aber in die Veränderung des Berechnungsmodells einfließen. Die Priorität lag daher für die durchgeführten Versuche darin, die Materialkennwerte zu überprüfen und ihre Tauglichkeit oder einen erforderlichen Korrekturbedarf zu erkennen, was in der beabsichtigten Form gelang und in das Berechnungsmodell einfluss. Damit verbundene Leistungsreserven für die praktisch umsetzbare Bauleistung konnten für die untersuchte Rohrart und die eingesetzten Nennweiten identifiziert und quantifiziert werden.

3. Zeitliche Verläufe von Stützkraft und Verformung

3.1 AM63cm

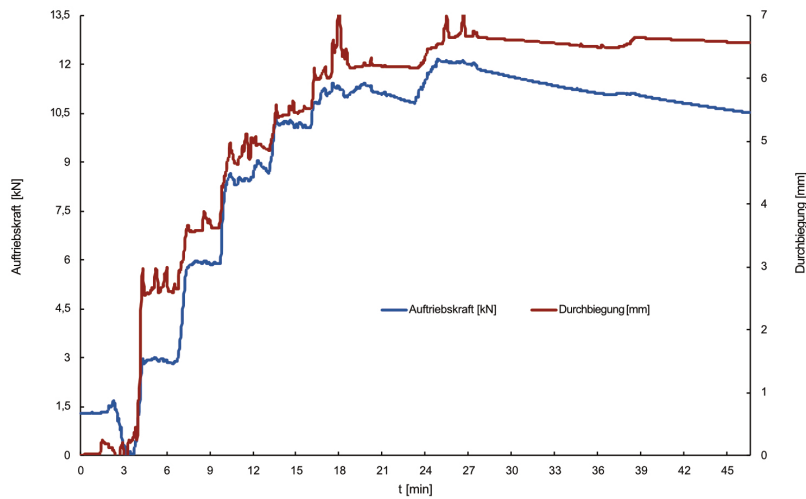


Zeitlicher Verlauf von Durchbiegung und Auftriebskraft bei DN 500 und einer Konsistenz von AM 63 cm

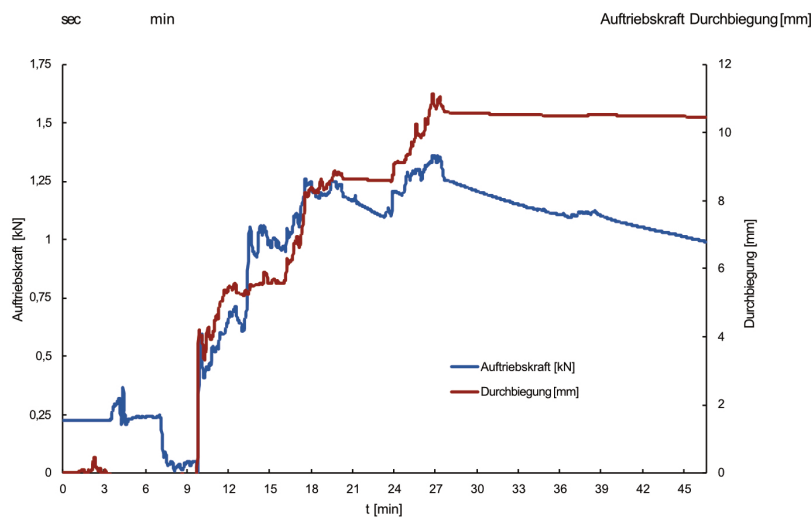


Zeitlicher Verlauf von Durchbiegung und Auftriebskraft bei DN 200 und einer Konsistenz von AM 63 cm

3.2 AM49cm



Zeitlicher Verlauf von Durchbiegung und Auftriebskraft bei DN 500 und einer Konsistenz von AM 49 cm



Zeitlicher Verlauf von Durchbiegung und Auftriebskraft bei DN 200 und einer Konsistenz von AM 49 cm

Erkenntnisse der Zeitlichen Verläufe:

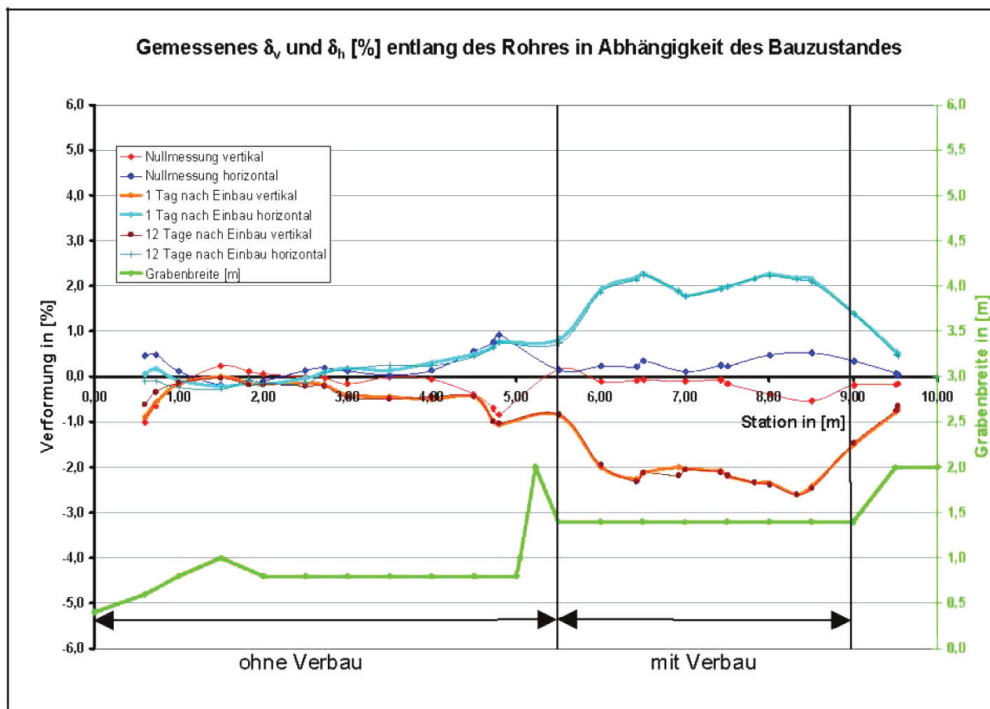
- Der Rückverfestigungsverlauf für AM 63 cm verläuft scheinbar schneller, doch liegt dieser Anschein an der langsameren Verfüllung als Folge der geringeren Fließfähigkeit beim Verfüllen und der Notwendigkeit, mit Hilfe einer Rüttelflasche für die gleichmäßige Verteilung des Flüssigbodens in der Schalung zu sorgen und einen künstlichen „Nullpunkt“ zu schaffen, von dem aus beginnend die Rückverfestigung gemessen werden konnte. Dieser Nullpunkt wurde zum Ausgangspunkt für den Beginn der Abnahme der Auftriebskraft.
- Die Auftriebskräfte und Durchbiegungen wiesen erwartungsgemäß bei den geringeren Viskositäten geringere Maxima auf.
- Der Verlauf der in den Versuchen gemessenen Auftriebskräfte und Durchbiegungen entsprach bei der fließfähigen Konsistenz besser den Baustellenbedingungen. Bei der höher viskosen Form des

Flüssigbodens waren diese Verläufe bis zum künstlichen Nullpunkt verfälscht und können erst ab diesem Moment in ihren Verläufen bewertet werden.

- Dafür zeigte es sich, dass der Abfall des Auftriebes bei höher viskosem Flüssigboden ab dem vorgenannten Nullpunkt erwartungsgemäß deutlicher und schneller verlief, als bei niedriger viskosem Flüssigboden. Optisch auffällig wird dies durch den steileren Abfall des den Druck- und damit Auftriebsverlauf darstellenden Funktionsgraphen (blaue Linie) bei dem Flüssigboden mit der höheren Viskosität (kleineres AM).
- Für die Baustellenpraxis bedeutet dies, dass durch die gute Kontrollierbarkeit der Auftriebskräfte und eine dadurch mögliche, bessere Kontrollierbarkeit der Summe der am Rohr wirkenden Kräfte, die RVH'n schneller gezogen werden können und somit technologische Reserven in Form von Zeitersparnis für den kompetenten Baubetrieb nutzbar werden.

Messung der Rohrdurchbiegung bei einer Viskosität, AM 49 entsprechend

- Die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Werten sind hier am größten, wobei dies besonders auf die kleine Nennweite DN 200 zutrifft mit zunehmender Nennweite geringer wird.
- Zwischen DN 315 und DN 500 schlägt die Abweichung um und es kommt bei DN 500 erstmals zu einer größeren gemessenen Verformung als durch die Berechnungen ausgewiesen.
- Mit Ausnahme von DN 200 erbringt eine erhöhte Ringsteifigkeit bei DN 315 und DN 500 keine relevante Verringerung der gemessenen Durchbiegungen.
- Mit zunehmender Nennweite nimmt die Bedeutung der Ringsteifigkeit zur Reduzierung der Durchbiegung ab. Spätestens ab DN 315 ist eine erhöhte Ringsteifigkeit nicht mehr von Vorteil.
- Für kleinere Nennweiten der geprüften Rohre ist das Gegenteil aus den Messungen herleitbar.
- Interessant ist es auch, dass es im Verlauf der Rückverfestigung des Flüssigbodens zu einer Rückstellung der maximalen Verformung kommt, so dass die Fixierung auf die berechnete maximale Verformung der Rohre noch zusätzliche Reserven für das Rechenmodell darstellt, die zukünftig in das Modell einfließen und genutzt werden können.
- Das gemessene Verhalten der Rohre entspricht den Ergebnissen eines anderen F&E Projektes, das zusammen mit der RWTH Aachen und dem dortigen Institut für Baubetrieb und Projektmanagement im Jahre 2006 abgeschlossen wurde und neben der Rohrverformung auch die Spitzenspannungen untersuchte, die technologisch bedingt auftraten. Insofern bestätigt dieses F&E Projekt die Plausibilität der in Münster erhaltenen Messergebnisse und damit ihre weitere Nutzung für den bereits beschriebenen Zweck dieses Projektes.



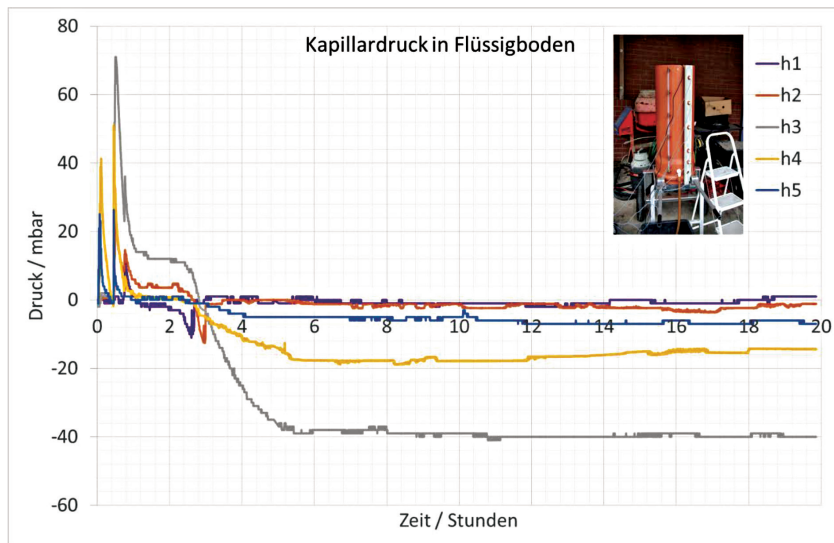
Längsprofil der Rohrverformung in Abhängigkeit von der Technologie [2]

- Dabei ebenfalls interessant ist die Tatsache, dass es bei geringeren Viskositäten des Flüssigbodens zu einer deutlicheren Rückstellung dieser maximalen Verformungen kommt, als bei geringer viskosem Flüssigboden. Dies ist für den Fachplaner und die ausführende Firma bei den technologischen Vorgaben für den Einbau wichtig und daher zu beachten.

Messung der Rohrdurchbiegung bei einer Viskosität, AM 63 entsprechend

- Auch hier waren relevante Abweichungen der berechneten von den gemessenen Werten in der Form festzustellen, dass die berechneten Verformungen bis DN 315 deutlich über den gemessenen lagen und diese Abweichungen mit zunehmenden Nennweiten der Rohre abnahmen.
- Ebenfalls für diese Viskosität konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Ringsteifigkeit ausschließlich bei der kleinen Nennweite von DN 200 eine relevante Verminderung der Rohrdurchbiegung zur Folge hatte, während bereits bei DN 315 die erhöhte Ringsteifigkeit keine relevante Verbesserung der Durchbiegung erbrachte, in einem Fall der Messungen die Durchbiegung bei SN 12 sogar mit einem geringeren Wert gemessen wurde, als bei SN 16.
- Der schon bei AM 49 festgestellte Effekt, dass es zwischen DN 315 und DN 500 zu einem Vorzeichenumschlag der Abweichungen kommt ist bei AM 63 noch deutlicher sichtbar. Bei DN 500 sind plötzlich die berechneten Durchbiegungen geringer, als die gemessenen. Mit Zunahme der Nennweiten nimmt das Verhältnis des Umfangs und damit der mit dem Flüssigboden im Kontakt stehenden und eine Reibkraft erzeugenden Fläche ab, so dass sich das Verhältnis der am Umfang wirkende Reibkraft zur volumenabhängigen Auftriebskraft ändert.
- Sinngemäß treffen die Aussagen der letzten 3 Anstriche des zu den Ergebnissen der Messungen beim AM 49 Gesagten auch hier zu. Das Ziehen der Rohrverlegehilfen zu dem, mittels der Auftriebsmessung an der Rohrverlegehilfe ermittelten, richtigen Zeitpunkt, führt zu einer Minimierung der Rohrverformung. Dies sind wichtige Reserven, wenn es um die Verwendung einer maximal zulässigen Rohrlänge im Sinne von erhöhten Bauleistungen geht, ohne dabei die maximal zulässige Rohrverformung zu überschreiten.
- Die Plausibilität der gemessenen Parameter konnte auch mit Hilfe der Ergebnisse eines anderen

F&E Projektes bestätigt werden, bei dem in Zusammenarbeit zwischen der Hochschule HTWL der Zusammenhang zwischen Auftrieb und dem hydrostatischen Druck im Flüssigboden (Kapillar- bzw. Poreninnendruck) gemessen wurde.



Kapillarinnendruck in RSS Flüssigboden über die Zeit und in verschiedenen Verfüllhöhen [9]

Auch diese Ergebnisse flossen bereits in das bestehende Rechenmodell des Auftriebsverhaltens von Rohren während des Lastfalls „Auftrieb im RSS Flüssigboden“ ein, da die gemessenen Verläufe des Kapillardruckes das von Baustellen bekannte Verhalten des Flüssigbodens bestätigten.

Schlussfolgerungen

Aus den Stützkraftmessungen und gemessenen Durchbiegungen ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen und Verbesserungsmöglichkeiten für die, den statischen Nachweisen des Lastfalles „Auftrieb in RSS Flüssigboden“ zugrunde liegenden Berechnungsgrundlagen:

1. Die berechneten Auftriebskräfte lagen generell im Bereich der aktuell in der Praxis festgelegten Toleranzen von mind. 20-30 % der als Maximalkraft berechneten Auftriebs- hier Stützkraft.
2. Für die Viskosität im Bereich eines AM von ca. 50 cm +/- 2 cm, was einem baustellentypischen Fließverhalten als technologisch relevante Eigenschaft entspricht, ist die Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Auftrieb am größten und Abweichungen liegen in der Größenordnung unter 3 %.
3. Dies ist daraus erklärbar, dass in der Entwicklungsphase der Rechenmodelle Auftriebswerte für dieses Fließverhalten am häufigsten anfielen, da dieses AM am häufigsten als Zielausbreitmaß im Rahmen komplizierter Projekte genutzt und erst später durch das AM 60 cm +/- 2 cm als Vergleichswert ersetzt wurde. Es macht daher durchaus Sinn, dieses AM wieder zum technologischen Ziel-AM zu machen, von dem aus, entsprechend der gewünschten technologischen Zielgrößen, Abweichungen als technologische Zieleigenschaften festgelegt werden.
4. Die generell geringen Abweichungen der berechneten und der gemessenen Werte sind aus der Nutzung der über die RSS Rohrverlegehilfen beim Flüssigbodeneinbau ermittelten Ergebnisse für die Erarbeitung der Berechnungsgrundlagen der Statik für den Lastfall „Auftrieb im Flüssigboden“ zu erklären. Die dabei in der Vergangenheit ermittelten Auftriebskräfte und deren Verlauf über die Zeit sind Größen, die maßgeblich für die Kalibrierung der Berechnungsgrundlagen zur Verfügung

standen, um die sich aus den rheologischen Besonderheiten des RSS Flüssigbodens im Vergleich zu newtonschen Fluiden ergebenden Unterschiede ausreichend genau in den Berechnungen abbilden zu können.

5. Die Rolle einer abnehmenden Viskosität ist qualitativ zwar richtig abgebildet. Doch mittels der vorliegenden Messergebnisse kann die Berechnungsgrundlage jetzt noch genauer kalibriert werden.
6. Die in den aktuellen statischen Berechnungen verwendeten Reserven für die Biegesteifigkeit der geprüften Rohre können anwendungsbezogen bei einigen Nennweiten reduziert und damit die ohne Überschreitung der zulässigen Verformung/Durchbiegung einbaubaren Rohrlängen maximiert werden.
7. Durch die Nutzung der Versuchsergebnisse für eine Weiterentwicklung und bessere Kalibrierung der Berechnungsgrundlagen auf die tatsächlichen Materialkennwerte der geprüften Rohre, können für die Baufirmen Leistungsreserven durch die optimierten Rohrlängen mobilisiert werden.
8. Die Kosten für erhöhte Ringsteifigkeiten können ab Nennweiten von etwa DN 300 entfallen, da die Erhöhung der Ringsteifigkeit mit zunehmenden Nennweiten einen immer kleineren Effekt für die Reduzierung der Durchbiegung bewirkt.
9. Durch die Rolle der Viskosität und anderer, für das Kräftepaar Auftrieb und die Summe der dem Auftrieb entgegengerichteten Kräfte, relevanten Verhältnisse, können noch bessere, funktionale Zusammenhänge (z. B. Technologie, Bodenart, Rheologie usw.) erarbeitet werden und in die Berechnungsgrundlagen für die statischen Berechnungen des Lastfalls Auftrieb einfließen.
10. Bislang blieben in der Literatur die Einflüsse von innerpartikulären Kräften (in Form der Viskosität) auf die Auftriebswirkung vernachlässigt, dies sollte sich für zukünftige Berechnungen jedoch ändern. Die vom FIFB erarbeiteten Berechnungsmöglichkeiten stellen ein geeignetes Mittel dafür dar und stehen als Leistungen und Hilfsmittel für Planungen und Ausführungen zur Verfügung.
11. Das hier in seinen Ergebnissen beschriebene kleine Forschungsprojekt mit der Hochschule Münster und den Rohren der Firma REHAU hat einen wichtigen Impuls gesetzt, um Materialkennwerte genauer zu bestimmen und auch die vorgenannten Einflüsse auf den Auftriebsverlauf und damit die Rohrverformungen, in zukünftige Berechnungen verstärkt einfließen lassen zu können.
12. Das bereits bestehende Rechenmodell zur Berechnung von Auftrieb und Rohrverformungen bei Einsatz von RSS Flüssigboden kann nun für die Rohre der Firma REHAU mit Hilfe der hier dargestellten Versuchsergebnisse genauer kalibriert werden. Diese Konkretisierung dient dem Ziel, die nutzbaren Leistungsreserven für Baufirmen verfügbar zu machen, die derartige Rohre einsetzen.

Ausblick

Die hier gewählte Vorgehensweise ermöglicht es, das Materialverhalten der Rohre in ausreichender Genauigkeit für den Einbauzustand und damit den Lastfall „Einbau in Flüssigboden“ zu beschreiben und die maximal zulässigen Rohrverformungen im Rahmen der Rohrstatik ohne unnötige Reserven dafür zu nutzen, die Abstände der Rohrverlegehilfen zu maximieren. Rohrhersteller, wie die Firma REHAU, die in der Lage sind, ihren Kunden Rohre zu liefern, die individuell nach der von der Rohrstatik vorgegebenen Länge gefertigt werden, helfen damit ihren Kunden, die Bauleistung ohne Qualitätsprobleme zu verbessern und damit wirtschaftlicher zu bauen.

Aber auch die, den statischen Nachweisen für den Einbau von Rohren in Flüssigboden zugrunde liegenden Berechnungsgrundlagen, werden eine Weiterentwicklung und noch genauere Kalibrierung auf die Einbaubedingungen unter den konkreten Baustellenverhältnissen erfahren, die dann für alle die Rohrarten anwendbar sind, für die das Verhalten unter praktischen Einbaubedingungen messtechnisch erfasst wurde und für die diese Werte zur besseren funktionalen Abbildung des realen Verhaltens der jeweiligen Rohre verfügbar sind.

Zukünftig ist es so möglich, bei Einsatz der Rohre der geprüften Typen, Leistungen zu maximieren und dies gezielt bereits zu planen. Dabei wird die Rohrstatik als Teil der Planung genutzt und ermöglicht es der ausführenden Firma gezielt, die wirtschaftlichen Vorteile der Flüssigbodenbauweise leichter zu nutzen, indem die Leistungen in der vorgenannten Form maximiert werden können.

Die gemessenen Abhängigkeiten der Rohrdurchbiegung von der Viskosität des Flüssigbodens, den Nennweiten der Rohre, aber auch den technologischen Einflussmöglichkeiten auf die Rheologie des eingebauten und noch nicht rückverfestigten Flüssigbodens werden zukünftig sicher stärker bereits in der Planung berücksichtigt werden. Oder sie werden von pfiffigen Baufirmen dafür genutzt, den Vorteil dieser Kenntnisse für die Verbesserung des eigenen Betriebsergebnisses einzusetzen. Mit den Leistungen der noch jungen Kategorie der Fachplaner für Flüssigbodenanwendungen steht die Möglichkeit am Markt zur Verfügung, die beschriebenen technologischen und wirtschaftlichen Reserven bei Einsatz des Flüssigbodenverfahrens zu verwenden, ohne dafür an der Qualität einen Abstrich machen zu müssen. Die Rohrstatik für den Lastfall „Auftrieb im Flüssigboden“ als fachplanerische Leistung liefert den ausführenden Firmen dafür die nötigen Angaben. Somit kann bereits in der Planungsphase mit Hilfe der Rohrstatik die Voraussetzung dafür geschaffen werden, dass kompetente und technisch mit den passenden Hilfsmitteln agierende Baufirmen, die maximale Bauleistung erzielen und so die Wirtschaftlichkeit der Flüssigbodenbauweise weiter verbessern. Jedoch ist dieser Vorteil an den Einsatz von Rohren gebunden, für die sowohl die für die statischen Berechnungen erforderlichen Materialkennwerte verfügbar sind als auch eine Herstellung erfolgt, die in der Lage ist, die statisch bedingt, maximal zulässigen Rohrlängen individuell, baustellenabhängig zu fertigen.

Die Autoren:

Olaf Stolzenburg, Jürgen Detjens (Forschungsinstitut für Flüssigboden [FiFB], Leipzig)

Jan Zimmer (Logistic Engineering GmbH [LOGIC], Leipzig)

Kontakt:

Ingenieurbüro LOGIC Logistic Engineering GmbH

Wurzner Straße 139 • 04318 Leipzig

Tel: +49(0)341-244 69-0

Fax: +49(0)341-244 69-32

info@logic-engineering.de

Quellen:

1. Versuchsergebnisse Uni Leipzig/MFPA und IB LOGIC/FIFB aus dem Jahre 2000 zum zeitlichen Verlauf des Auftriebsverhaltens an Abwasserrohren, gebettet in RSS Flüssigboden [1]
2. Versuchsergebnisse zu Rohverformungen und der Wirkung von Lastspitzen auf Kunststoffrohre und Ergebnisbericht der RWTH Aachen, ibb in Zusammenarbeit mit IB LOGIC/FIFB, „Verbesserung der Verlegequalität von Abwasserkanälen aus Kunststoff – insbesondere unter den Aspekten Langzeitverhalten und Wirtschaftlichkeit – Versuche mit RSS Flüssigboden“ [2]
3. Ergebnisse der Entwicklung der Berechnungsmodelle für die Bettung von Rohren in RSS Flüssigboden und dabei speziell zur Quantifizierung der Wirkungen des Lastfalls „Auftrieb im Flüssigboden“ auf Rohrverformungen und am Rohr wirksamen Kräften, IB LOGIC [3]
4. Dokumentation der Untersuchungsergebnisse der HS Münster und des FIFB mit Ergebnisbericht des FiFB, „Auftriebsmessungen in RSSR Flüssigboden an der FH Münster“ [4]
5. Messergebnisse des Auftriebsverhaltens an Großrohren an Kunststoff DN 2500 im Rahmen der Diplomarbeit der Frau Arduc, HS Bochum, Projekt Bergheim [5]
6. Messungen und Auswertungen des Auftriebsverhaltens von Baustellen des Ing. Büros LOGIC GmbH, z.B. Potsdam – Rudolf-Breitscheid-Straße, Polen – Sosnowiec, Schweiz – Lachen u.a. [6]
7. Datenbank des Forschungsinstituts für Flüssigboden mit den bisher gemessenen Auftriebskräften aus Messwerten der eingesetzten RSS Rohrverlegehilfen [7]
8. Auszug aus dem technologischen Konzept der Fachplanung für das Projekt Neustadt/Holstein, des IB LOGIC in Zusammenarbeit mit IB Höger & Partner
9. Bericht zu Versuchen der HTWK Leipzig in Zusammenarbeit mit dem FIFB – „Testmessungen an einem Versuchsaufbau zur Messung des Auftriebs und des hydrostatischen Druckes in Flüssigboden“ – Versuche mit RSS Flüssigboden [9]