

Kurzbericht

Thema: Erfassung, Analyse und Vermeidung
von geometrischen Imperfektionen
bei Vortriebsrohren

Ausführende Stelle: RWTH Aachen

Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement
ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf

Aachen, im September 2008

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold

INHALT

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Qualitätssicherung und Stand der Technik.....	1
3	Messtechniken zur Untersuchung geometrischer Imperfektionen	2
4	Untersuchungen in-situ	2
5	Entwicklung einer eigenen Messtechnik.....	4
6	Optimierter „Rohrverlegeplan“	6
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	7
	Literaturverzeichnis	8

1 Einleitung

Die Verlegung von Abwasserkanälen ist auch in Zukunft eine wesentliche Aufgabe der Netzbetreiber. Abwasserkanäle werden schon heute statt in offener Bauweise immer häufiger unterirdisch verlegt.

Wegen der hohen Beanspruchung der Vortriebsrohre beim Einpressen in den Boden ist die Fertigungsgenauigkeit und Maßhaltigkeit der Stirnflächen der Rohre, über die die Kräfte von Rohr zu Rohr übertragen werden, besonders wichtig. Geometrische Imperfektionen im Bereich der Rohrspiegel können vor allem in Kombination mit Verwinkelungen der Rohre bei Kurvenfahrten oder aus Korrektursteuerungen trotz normenkonformer Bemessung zu einer Überlastung der Rohre führen.

Da die Gebühren der Abwasserbeseitigung zum großen Teil aus den Kosten für die Abwasserableitung, d.h. der Abschreibung und Verzinsung des Kanalnetzes, resultieren, kommt einer langen Lebensdauer der Kanalrohre eine hohe Bedeutung zu. Es ist daher wichtig, die Qualität der Vortriebsrohre bei der Herstellung und beim Einbau sicherzustellen.

2 Grundlagen der Qualitätssicherung und Stand der Technik

Beim Rohrvortrieb werden zwischen den einzelnen Rohren Druckübertragungsringe, die meistens aus Holz bestehen, eingelegt. Sie sollen u. a. geringfügige Maßtoleranzen ausgleichen und die Kraftübertragung von Rohr zu Rohr sicherstellen. Im Arbeitsblatt ATV-A 125 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA, vormals ATV bzw. ATV-DVWK) werden die Imperfektionen als Abweichung von der Rechtwinkligkeit bezeichnet, die „als Summe aus der Abweichung des gesamten Spitzendes von der Rechtwinkligkeit (gegenüberliegende Mantellinien) und der Abweichung von der Rechtwinkligkeit innerhalb der Wanddicke s “^{1, 2} definiert ist. Dabei wird gemäß Abbildung 1 die Abweichung von der Rechtwinkligkeit der Stirnflächen an jedem Rohrende definiert als $\Delta a = \max a - \min a$. Als Referenzebene für die Messung ist eine feste Wand zu wählen, die im rechten Winkel zur Rohrachse steht.

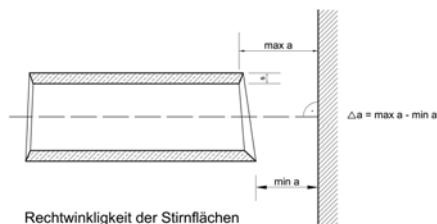


Abbildung 1: Rechtwinkligkeit der Stirnflächen³

Für den Fall, dass keine eindeutig rechtwinklig zur Rohrachse stehende Referenzebene zur Verfügung steht, ist auch ein anderes Verfahren zur Bestimmung von Δa erlaubt. So kann Δa durch eine zweifache Messung des um 180° zu drehenden Rohres gegen eine beliebig geneigte Fläche ermittelt werden. Weiterhin werden in Anlage 2 des Arbeitsblattes zwei für die Baustelle geeignete Messverfahren zur Bestimmung der Abweichung von der Rechtwinkligkeit beschrieben, das Messverfahren nach DIN EN 295-7⁴ und das Mess-

¹ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-A 125, 1999, S. 12.

² Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V., FBS-Qualitätsrichtlinie – Teil 1, 2000, S 5.

³ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-A 125, 1996, S. 12.

⁴ Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 295-7, 1995.

verfahren nach prEN 1916¹. Die beiden aufgeführten „baustellengeeigneten“ Verfahren sind jedoch nicht geeignet, die Qualität von Vortriebsrohren zu beurteilen, da beide Verfahren nur einzelne Punkte berücksichtigen. Zudem kann nicht sichergestellt werden kann, dass das ermittelte Δa auch tatsächlich die maximale Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt auf dem Rohrspiegel – rechtwinklig zur Rohrachse – wiedergibt. Ferner bleibt bei allen Messverfahren unberücksichtigt, wie die Extrema zueinander liegen. Für den Rohrvortrieb sind aber dicht beieinander liegende Extrema deutlich kritischer zu beurteilen, da hier lokale Spannungsspitzen auftreten können. Insbesondere gilt dies, wenn durch eine Verwinkelung der Vortriebsrohre zueinander, die druckübertragende Fläche reduziert wird und sich die Extrema innerhalb dieser Fläche befinden. In solchen Fällen können selbst die nach ATV-A 125 zulässigen Abweichungen von der Rechtwinkligkeit zu einer Überlastung der Rohre führen.

3 Messtechniken zur Untersuchung geometrischer Imperfektionen

Neuere Messtechniken, mit denen sich geometrische Imperfektionen von Vortriebsrohren untersuchen lassen, sind 3D-Laser-Scanner und Laser-Tracker.

Es wurde eine Markt-Recherche durchgeführt, um die unterschiedlichen Produkte, ihre Leistungsdaten aber auch die mit ihnen verbundenen Investitionskosten zu ermitteln.

Die 3D-Laser-Scanner der Firmen Faro sowie Zoller+Fröhlich wurden als besonders aussichtsreich identifiziert. Das kleinste Gerät von Faro liegt bei ca. 80.000,- €. Der angegebene, systematische Distanzmessfehler von 3 mm wird jedoch als problematisch angesehen. Er besagt, dass der wahre Messwert eines gescannten Punktes innerhalb einer Kugel mit einem Radius von 3 mm liegt. Das heißt, dass Aussagen zu Imperfektionen nur mit einer Toleranz von ± 3 mm möglich sind.² Die Messgenauigkeit des Scanners von Zoller+Fröhlich wird mit ca. ± 1 mm angegeben.³ Die Kosten für den „Imager 5006“ betragen 87.500,- €.

Ein Laser-Tracker ist ein Messgerät, das durch eine Kombination aus Winkelmessung und interferometrischer Laser-Distanzmessung die 3D-Punktkoordinaten eines Objektes erfasst. Alternativ können moderne Laser-Tracker auch absolute Distanzen messen. Es gibt zur Zeit drei Hersteller von Laser-Trackern: API, Faro und Leica Geosystems. Die Messgenauigkeiten der Laser-Tracker sind alle sehr hoch und damit für die Vermessung von Rohrspiegeln geeignet. Die Investitionskosten liegen zwischen 100.000 € und 200.000 €.

4 Untersuchungen in-situ

Im Rahmen von Untersuchungen in-situ wurden an ausgewählten Stahlbetonvortriebsrohren DN 3400 Vermessungen durchgeführt. Hierbei kamen die 3D-Laser-Scanner der Firmen Faro sowie Zoller+Fröhlich und ein Laser-Tracker von Leica zum Einsatz.

Bei der Vermessung mit einem Scanner werden in der Umgebung mehrere Referenzkugeln so um die zu vermessenden Rohre angeordnet, dass durch Anpeilen und Einmessen der Kugeln ein übergeordnetes Koordinaten-System aufgebaut wird. Dieser Arbeitsschritt ist erforderlich, da zur vollständigen Erfassung eines Rohres „Scans“ von mehreren Positionen aus durchgeführt werden müssen. Für die Aufnahme beider Spiegelflächen reichen zwei

¹ Deutsches Institut für Normung e.V., prEN 1916, 1995.

² vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Faro zu 3D-Laser-Scannern, 2007.

³ vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Zoller + Fröhlich, 2007.

Standorte aus. Soll hingegen das gesamte Rohr einschließlich der Mantelflächen erfasst werden, sind mindestens vier Aufstellungspunkte erforderlich. Liegen die Rohre nebeneinander, können von einer Position aus zwei bis drei Spiegelflächen benachbarter Rohre gescannt werden. Der Zeitbedarf für die Vermessung von zwei bis drei Rohren (Stirnflächen ohne Mantel) beträgt etwa einen halben Tag. An einem Messtag können damit vier bis sechs Rohre gescannt werden. Nach dem Scannen liegen die Vermessungsergebnisse in Form einer Punktwolke mit mehreren Millionen Datenpunkten vor. Im Zuge der Nachbearbeitung werden die Messpunkte der Umgebung eliminiert und darüber hinaus Reflektionen zum Beispiel durch den Stahlführungsring der Muffenseite entfernt. Im nächsten Schritt müssen die Mittelpunkte der Rohrenden berechnet werden. Durch die beiden Mittelpunkte wird danach die ideale Rohrachse gelegt. Bei eingearbeitetem Handlungsablauf sind zwei komplette Rohr pro Tag auswertbar.

Die Vermessungsergebnisse mit dem 3D-Laser-Scanner der Firma Faro ließen sich nicht eindeutig interpretieren. Ob die Ursache in der vorhandenen Messgenauigkeit oder der Vorgehensweise bei der Auswertung bzw. Nachbearbeitung der Messdaten begründet ist, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Wie auch beim Scanner von Faro wird bei Zoller+Fröhlich ein übergeordnetes Koordinatensystem erzeugt. Hierzu werden in der Umgebung so genannte „Zielmarken“ geklebt und diese dann angepeilt und vermessen. Der Zeitbedarf entspricht näherungsweise dem des Systems Faro. In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind die Imperfektionen der beiden Stirnflächen eines Rohres gegenüber den Ausgleichsebenen dargestellt, die mit dem „Imager 5006“ aufgenommen wurden.

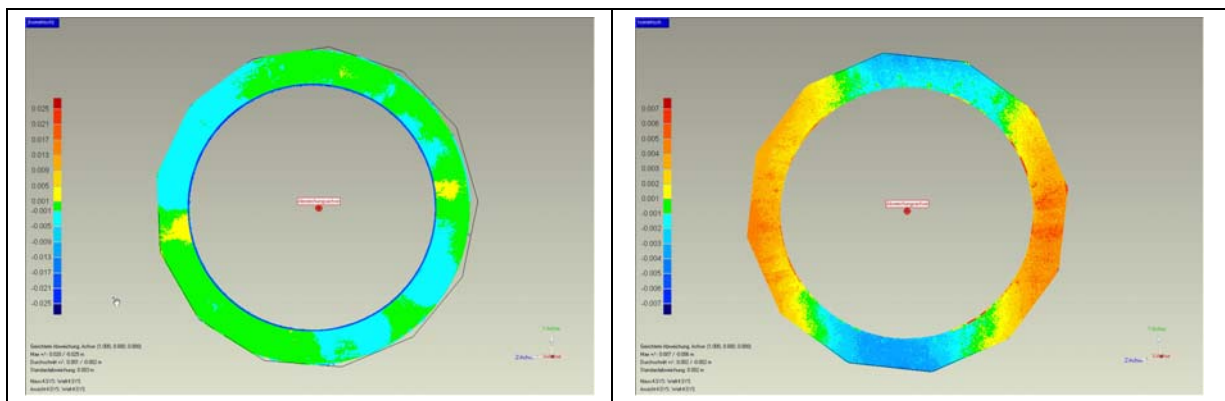


Abbildung 2: Imperfektionen der händisch abgezogenen Seite (links) und der auf der Stahlschalung stehend hergestellten Seite (rechts)

Es fällt auf, dass die händisch abgezogene Seite nur geringe Unebenheiten aufweist, während die auf der Stahlschalung stehend hergestellte Seite in Umfangsrichtung einem „sinusförmigen“ Verlauf folgt. Dieses Phänomen ist auf Imperfektionen der Stahlschalung zurückzuführen, die dem Rohrspiegel der Muffenseite ihren Abdruck verleihen.

Beim Laser-Tracking wird von der Mess-Station ein Laserstrahl zu einer frei beweglichen, handgeführten Reflektor-Kugel ausgesandt. Über das Prinzip der Laufzeitmessung wird die Entfernung zwischen Sender und Empfänger bestimmt (Laser-Interferometer).

Die Ergebnisse des Laser-Trackings deckten sich mit denen des 3D-Laser-Scannings der Firma Zoller+Fröhlich. Da die Ergebnisse der Tracker-Vermessung aufgrund der sehr hohen Messgenauigkeit ($< 0,01 \text{ mm}$) als Referenzmaße anzusehen sind, lässt sich die Aussage

treffen, dass der 3D-Laser-Scanner von Zoller+Fröhlich die Oberfläche des gescannten Rohres qualitativ und quantitativ korrekt darstellt. Verantwortlich hierfür ist die im Rahmen der Recherche zu 3D-Laser-Scannern höchste gefundene Auflösung von ± 1 mm.

5 Entwicklung einer eigenen Messtechnik

Aufgrund der Erfahrungen, die im Rahmen der Baustelleneinsätze gesammelt wurden, wurde entschieden, am „ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb“ eine eigene Messtechnik zu entwickeln, die speziell für die Imperfektionsmessung von großen Vortriebsrohren konzipiert ist. Neben einer hohen Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse waren kurze Rüstzeiten, ein einfaches Handling, ein geringer Nachbearbeitungsaufwand und eine eindeutige Interpretierbarkeit der Ergebnisse die wesentlichen Entwicklungsziele.

Das Mess-System besteht aus einer mechanischen Grundkonstruktion sowie der Messtechnik und einer Steuerungs- und Auswertungssoftware.

Die Grundkonstruktion wird in zwei Ebenen über vier Arme im Rohr verspannt. An der starren Achse des Systems ist ein Ausleger spielfrei angebracht. Der Ausleger trägt in Summe sieben Laser-Wegaufnehmer, zwei zur Vermessung der Außenkontur des Rohres und fünf weitere Laser-Sensoren zur Erfassung von Unebenheiten der Rohrspiegel. Die Auflösung der Laser beträgt 0,06 mm. Der Messbereich liegt zwischen 30 und 130 mm. Angetrieben wird der Ausleger über einen getakteten Schrittmotor. Die zugehörigen Winkel werden über einen Inkremental-Drehwinkelgeber gemessen.

Die zentrische Einrichtung der Grundkonstruktion im Rohr erfolgt ebenfalls mittels Laser. Hierbei werden über einen Laserdistanzmesser die Entfernungen der Achse zu den inneren Mantelflächen gemessen und über die höhenverstellbaren Arme sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung exakt ausgerichtet. Zusätzlich werden die Neigung der Achse und die Neigung der Sohle des Rohres mit Hilfe einer elektronischen Wasserwaage auf Parallelität hin überprüft.

Mit der Vermessung wird ein Netz von Rasterpunkten über die Stirnfläche des Rohres gelegt. In jedem Rasterpunkt wird die gemessene Distanz angetragen, so dass sich ein dreidimensionales Profil der Stirnfläche ergibt. Mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung nach dem Gauß-Newton-Verfahren¹ wird eine Ebene in die gemessenen Distanzen zur Stirnfläche eingerechnet. Die Ebene selbst liefert das Maß der Rechtwinkligkeit zur Achse. Die Unebenheiten werden auf diese Ausgleichsebene bezogen.

Die entwickelte Messtechnik wurde bei zwei Herstellern von Vortriebsrohren erprobt. In Rohrwerk A wurden 15 Vortriebsrohre DN 2600 mit einer Wandstärke von 350 mm und einem Außendurchmesser von 3300 mm vermessen. Bei Hersteller B wurden 7 Vortriebsrohre DN 3000 mit einem Außendurchmesser von 3600 mm untersucht. Abbildung 3 zeigt die Messtechnik beim Einsatz in einem Rohrwerk.

¹ vgl. Benning, W., Statistik, 2002, S. 140 ff.



Abbildung 3: eingerichtetete Messtechnik in einem Vortriebsrohr DN 2600

Der Zeitbedarf für die Vermessung eines Rohres liegt bei ca. 2 Stunden. Ein Nachbearbeiten der Messdaten ist nicht erforderlich, da fertige Auswerteroutinen standardisierte Ausgabeprotokolle liefern.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Imperfektionen des Spitzend-Rohrspiegels von Rohr Nr. 7 (links und Mitte). Die Imperfektionen setzen sich aus der Abweichung von der Rechtwinkligkeit und überlagerten Unebenheiten zusammen. Die Abweichung von der Rechtwinkligkeit beträgt $\alpha_A = 0,16^\circ$.

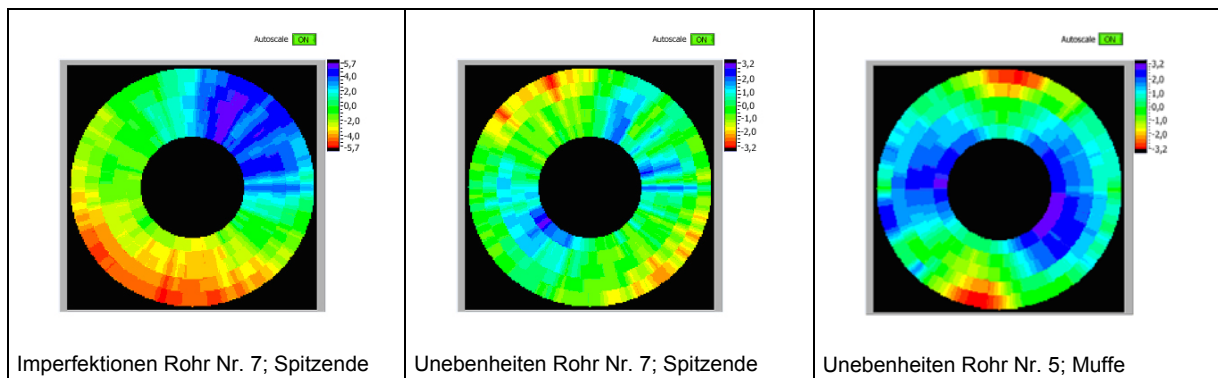


Abbildung 4: Imperfektionen

In Abbildung 4 sind zusätzlich die Unebenheiten der Muffenseite von Rohr Nr. 5 dargestellt. Aus der Darstellung lässt sich erkennen, dass 2 Hochpunkte (Scheitel und Sohle) und 2 Tiefpunkte (Kämpfer rechts und Kämpfer links) vorliegen. Darüber hinaus ist eine Trichterung des Rohrspiegels von außen nach innen erkennbar. Die maximale Unebenheit in Umfangsrichtung beträgt 5,61 mm. Über die Wanddicke ergibt sie sich zu 3,85 mm.

Um die entwickelte Messtechnik zu überprüfen, wurde eine Vergleichsmessung mittels Laser-Tracker an zwei ausgewählten Rohren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung.

Durch eine Vermessung bereits produzierter Rohre im Werk lassen sich systematische Maßabweichungen erkennen. Stahlschalungen, die zu systematischen Imperfektionen führen (z. B. makroskopischer sinusförmiger Verlauf), können identifiziert und korrigiert werden.

Des Weiteren wird vorgeschlagen, neue Schalungen mit hoch genauer Messtechnik zu vermessen, bevor diese in Betrieb genommen werden. Hierzu bieten sich vor allem die zuvor beschriebenen Laser-Tracker an. Imperfektionen auf der Muffenseite der Rohre können so künftig vermieden werden.

Eine Vermessung der produzierten Rohre liefert darüber hinaus die Informationen über lokale Imperfektionen auf der händisch abgezogenen Seite, so dass durch eine Nachbearbeitung der Rohre kritische Stellen (z. B. Hochpunkte) eliminiert werden können.

In der Zukunft sollten zudem Techniken entwickelt werden, die bislang händisch abgezogene Seite (Spitzende) maschinell abzuziehen. Die so abgezogene Oberfläche müsste anschließend mit einer geeigneten Methode auf verbliebene Imperfektionen überprüft werden.

6 Optimierter „Rohrverlegeplan“

Die Imperfektionen des vorlaufenden und des nachfolgenden Rohres bestimmen maßgeblich die Kraftübertragung im Rohrspiegelbereich. Beim Zusammenführen zweier Rohre entsteht aufgrund der Überlagerung der unterschiedlichen Abweichungen von der Rechtwinkligkeit und den lokalen Unebenheiten der Rohrspiegel in der Fuge ein so genanntes „Spaltmaß“, das sich über den Rohrumfang ändert. An den Stellen wo sich das Spaltmaß zu Null ergibt, stellt sich der erste Kontakt und damit eine direkte Kraftübertragung ein. Die weiteren Flächen im Spiegel werden erst nach einer entsprechenden Verformung der Fugenzwischenlage um die nächsten relativ kleinen Spaltmaße zur Kraftübertragung herangezogen.

In Abbildung 5 ist das entstehende Spaltmaß in der Rohrfuge unter der Annahme, dass die Rohre gerade ohne zusätzliche Verwinkelung vorgetrieben werden, dargestellt.

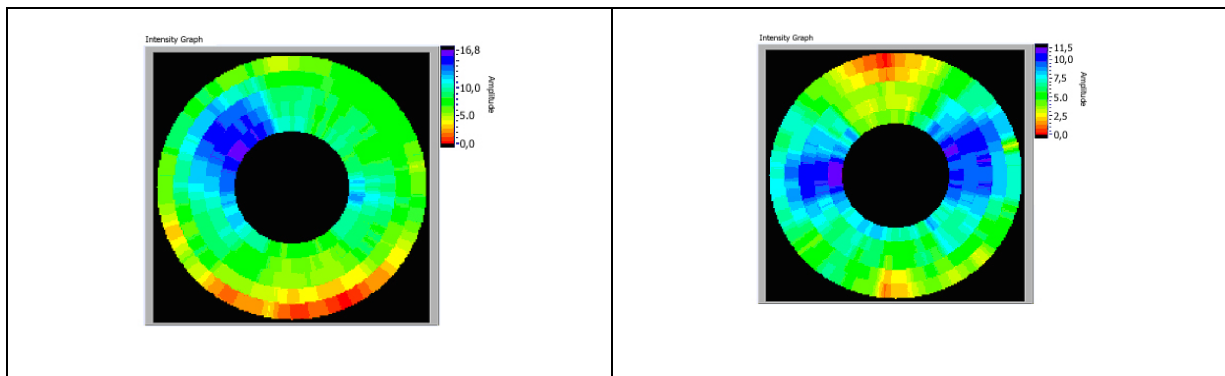


Abbildung 5: Spaltmaß in der Rohrfuge zwischen Rohr Nr. 1 und 2 (links) sowie 9 und 1 (rechts)

Die in Abbildung 5 (links) gezeigte Spaltmaß-Verteilung besagt, dass die rot eingefärbten Flächen unmittelbaren Kontakt besitzen. Nach einer Stauchung der Fugenzwischenlage um ca. 5 mm ist mit Ausnahme eines Sektors oberhalb des linken Kämpfers der gesamte Querschnitt belastet. Erst nach einer Verformung des Druckübertragungsringes von 16,8 mm wird die gesamte Spiegelfläche ausgenutzt. Abbildung 5 (rechts) stellt eine weitere Kontaktfläche dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Vortriebskräfte zunächst über den Rohrscheitel und die Rohrsohle übertragen werden. Solche Spannungskonzentrationen können zu Abplatzungen auf der Rohraußenseite führen.

Das Spaltmaß zwischen den Vortriebsrohren wird als Optimierungskriterium herangezogen. Als Optimierung sind drei Varianten vorgesehen:

- Drehung der Rohre um die Längsachse
- Änderung der Reihenfolge der Rohre
- Änderung der Reihenfolge und Drehung der Rohre um die Längsachse

Zur Lösung der Optimierungsaufgabe wurde eine separate Software entwickelt, die es erlaubt, zwischen den Varianten zu wählen und optimierte Rohrverlegepläne als einfache baustellengerechte Listen auszugeben.

Die bei Rohrhersteller A gemessenen 15 Rohre wurden exemplarisch den unterschiedlichen Optimierungsvarianten unterzogen. Es ergibt sich für einen nicht optimierten Rohrverlegeplan ein Gesamtpaltmaß (Summe der 360 gemessenen Spaltmaße je Kontaktfläche für alle Rohre) von 56927 mm (vorhandenes Spaltmaß = 100 %). Wird demgegenüber eine Änderung der Rohre zugelassen, so reduziert sich das Gesamtpaltmaß auf 50021 mm (Restspaltmaß = 87,9 %). Falls nur eine Drehung der Rohre um ihre Längsachse möglich ist, ergibt sich ein Gesamtpaltmaß von 45289 mm (Restspaltmaß = 79,6 %). Die besten Ergebnisse lassen sich bei kombinierter Änderung der Reihenfolge und Drehung der Rohre mit einem Gesamtpaltmaß von 43150 mm erzielen. Das entspricht einem Restspaltmaß von 75,8 %.

7 Zusammenfassung und Ausblick

3D-Laser-Scanner sowie Laser-Tracker sind in der Lage, die Imperfektionen der Rohrspiegel eindeutig zu erfassen. Nachteilig wirken sich jedoch die hohen Investitionskosten und der hohe Nachbearbeitungsaufwand der Messdaten aus. Daher wurde eine Messtechnik entwickelt, die speziell auf die Vermessung von großen Vortriebsrohren abgestimmt ist.

Es wurde festgestellt, dass entgegen den Erwartungen häufig die händisch abgezogene Seite die geringeren Unebenheiten im Rohrspiegel aufweist. Im Gegensatz dazu wurden vermehrt systematische Imperfektionen (makroskopischer, sinusförmiger Verlauf) bei den auf der Stahlschalung stehenden Rohrspiegeln gefunden (Muffenseite). Darüber hinaus besaß eine große Anzahl der untersuchten Rohre eine ausgeprägte Trichterung der Spiegelflächen (von außen nach innen).

Wesentliche Grundlage zur Herstellung maßhaltiger Rohre ist der Einsatz ebenso maßhaltiger Stahlschalungen. Es wird daher vorgeschlagen, die einzusetzende Schalung mit hochgenauer Messtechnik abzunehmen, bevor diese in Betrieb genommen wird. Hierzu bieten sich vor allem Laser-Tracker an. Darüber hinaus können die Stahlschalungen, die zu systematischen Maßabweichungen führen, über eine Vermessung der bereits produzierten Rohre im Werk identifiziert werden. Durch den Einsatz einwandfreier Stahlschalungen können künftig Imperfektionen auf der Muffenseite der Rohre vermieden werden.

Für die produzierten Vortriebsrohre, besteht die Möglichkeit, optimierte Rohrverlegepläne zu erstellen. Dies ist deshalb sinnvoll, weil die Spitzendseite immer unterschiedliche Imperfektionen aufweisen wird und sich Abweichungen von der Rechtwinkligkeit durch das Zusammensetzen der Schalung ergeben. Je nach Umsetzbarkeit auf der Baustelle ist eine reine Änderung der Reihenfolge als auch eine zusätzliche Drehung der Rohre um ihre Längsachse möglich. Zur Drehung der Rohre wäre ein an den Press-Schlitten angebrachter „Rollbock“ erforderlich.

Der Nachweis eingehaltener bzw. auch unterschrittener Herstelltoleranzen führt zu transparenter und konsequenter Qualitätssicherung. Imperfektionen als Summe aus einer Abweichung von der Rechtwinkligkeit und überlagerten Unebenheiten werden somit reduziert und daraus resultierende Spannungskonzentrationen künftig vermieden.

Literaturverzeichnis

Benning, W. [Statistik, 2002]:

Statistik in Geodäsie, Geoinformation und Bauwesen, Heidelberg: Wichmann, 2002

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [ATV-A 125, 1996]: ATV-A 125, Rohrvortrieb, September 1996

Deutsches Institut für Normung e.V. [DIN EN 295-7, 1995]:

DIN EN 295, Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle – Teil 7: Anforderungen an Steinzeugrohre und Verbindungen beim Rohrvortrieb, Dezember 1995

Deutsches Institut für Normung e.V. [prEN1916, 1995]:

prEN 1916, Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton, August 1995

Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V. [FBS-Qualitätsrichtlinie – Teil 1, 2000]: FBS-Qualitätsrichtlinie – Betonrohre, Stahlbetonrohre, Vortriebsrohre und Schachtbauteile in FBS-Qualität für erdverlegte Abwasserkanäle und Leitungen, Ausführungen, Anforderungen und Prüfungen, Teil 1, August 2000

o.V. [Produktinformation der Firma Faro zu 3D-Laser-Scannern, 2007]:

http://www.faro.com/FarolP/Files/File/Techsheets%20Download/de_LASER_SCANNER_LS.pdf.PDF (12.07.2007, 15:50 MEZ)

o.V. [Produktinformationen der Firma Zoller + Fröhlich, 2007]:

http://www.zf-laser.com/Z+F_IMAGER5006_D.pdf (22.07.2007, 09:24 MEZ)