

Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Beurteilung des Zustandes und des Sanierungserfolges nicht-begehbbarer Abwasserleitungen (Micro-MAC) - Abschlussbericht -

über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 38149/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt					
AZ	38149/01	Referat	23	Fördersumme	40.550 €
Antragstitel		Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Beurteilung des Zustandes und des Sanierungserfolges nicht-begehrbarer Abwasserleitungen			
Stichworte		Abwasser, Kanalisation, Schlauchliner, biegeeweiche Rohre, Qualitätssicherung, Bettungsqualität, Prüfeinrichtung			
Nennlaufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
9 Monate	14.12.2023	19.12.2024	1		
Zwischenberichte		keine			
Bewilligungsempfänger		IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH Exterbruch 1 45886 Gelsenkirchen		Tel	0209/17806-0
				Fax	0209/17806-88
				Projektleitung Martin Liebscher	
				Bearbeiter Frank Bersuck Dr. Mark Klameth Martin Liebscher Simon Torunski	
Kooperationspartner		Keine			
<p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p>Schadhafte Abwasserkanäle und -leitungen bergen ein hohes Risiko für die Umwelt, denn durch Undichtigkeiten können einerseits im Abwasser enthaltene Schadstoffe in die Umwelt gelangen und Boden und Grundwasser verunreinigen (Exfiltration). Andererseits kann es bei undichten Abwasserleitungen auch zu einer Infiltration von Grundwasser kommen, was wiederum den Fremdwasseranteil erhöht und somit zu einer hydraulischen Überlastung des Gesamtsystems Kanalisation/Kläranlage führt. Vor dem Hintergrund der alternden Kanalnetze und des wachsenden Investitionsbedarfes kommt der Zustandserfassung und der Sanierung schadhafter Kanäle daher eine hohe Bedeutung zu. Die derzeit gängige Methode der optischen Inspektion mit TV-Befahrung liefert allerdings nur unzureichende Informationen über den tatsächlichen Zustand oder die Qualität ausgeführter Erneuerungs- bzw. Renovierungsmaßnahmen, da lediglich die unmittelbare Oberfläche des Kanalinneren in Augenschein genommen werden kann.</p> <p>Ziel dieses Projektes war aufbauend auf das bereits etablierte MAC-Verfahren für Nennweiten größer als DN 1000 die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens, welches die Beurteilung des Bettungszustandes beim Neubau und des Sanierungserfolges bei der Renovierung nicht-begehrbarer Abwasserleitungen ermöglicht, das Mikro-MAC.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst wurde der Stand der Technik bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren und bei der Qualitätssicherung von Schlauchlinersanierungen analysiert. Mit Netzbetreibern wurden die möglichen Einsatzgebiete des Micro-MAC diskutiert und Randbedingungen festgelegt. Im Rahmen der Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung wurde auf den Einsatz von jenen Techniken, die einen unbemannten Betrieb ermöglichen, besonderen Wert gelegt. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 800 wurde bei Praxiseinsätzen im IKT und in situ überprüft. Basierend auf den Testeinsätzen wurde eine fachliche Einordnung der Prüfergebnisse aus bautechnischer Sicht vorgenommen. Hier wurden insbesondere Möglichkeiten zur Auswertung der gewonnenen Messwerte für den jeweiligen Anwendungsfall zusammengestellt. Schließlich wurden Auswertekonzepte zur Qualitätssicherung von neuverlegten biegeweichen Rohren und von Schlauchlinersanierungen mithilfe der Prüfergebnisse des Micro-MAC-Verfahrens erarbeitet.

Ergebnisse und Diskussion

Im Ergebnis wurde eine Prüfeinrichtung entwickelt, welche die Möglichkeiten der Qualitätssicherung bei Neubau und Sanierung für den Nennweitenbereich DN 300 bis DN 800 um folgende Prüf Aspekte erweitert:

- Überprüfung der Bettung bei neuverlegten biegeweichen Kanalrohren (Standardbettung / Flüssigböden).
- Überprüfung der Qualität von Schlauchlinersanierungen (E-Modul / Ringraum).

Die Vorgehensweise bei der Qualitätskontrolle von Neubau- und Renovierungsverfahren mit dem Micro-MAC-Verfahren kann in folgende Schritte unterteilt werden:

1. Vorberechnungen

Sichtung der Rohr- bzw. Linnerstatiken. Sollwanddicke, Sollringraum, Soll-Emodul. Festlegen der Kraft- und Weggrenzen für die Prüfung.

2. Prüfungsdurchführung

Durchführen von Kraft- Verformungsmessungen mit dem Prüfsystem in einem zuvor festzulegenden Prüfindintervall.

3. Sicherung der Qualität von Sanierungsmaßnahmen

Im Ergebnis kann die Qualität der Ausführung einer Neubau- bzw. Renovierungsmaßnahme mithilfe einer Micro-MAC-Prüfung überwacht werden.

Künftig müssen nun die entwickelte Gerätetechnik und zugehörigen Auswertekonzepte im Labor und in situ bei unterschiedlichen Nennweiten, Rohrwerkstoffen, Bettungseigenschaften und Schlauchlinerwerkstoffen angewendet werden, um gegebenenfalls Modifikationen vornehmen zu können und die Datenbasis zu erweitern.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Micro-MAC System wurde auf der HRW-Karriere-Messe der Hochschule Ruhr West präsentiert. Demonstriert wurde die hochauflösende Prüf- und Messtechnik an einem Glasrohr, welches minimal verformt wurde und die hieraus resultierenden Kräfte konnten messtechnisch erfasst werden. Des Weiteren sind Veröffentlichungen der Ergebnisse im Rahmen des IKT-eNewsletters und in Fachzeitschriften geplant. Auch soll das Prüfsystem im Rahmen eines Projektes eingesetzt werden, welches die Qualität von Schlauchlinersanierungen in Hauptkanälen zum Thema hat. An diesem Projekt sind auch Netzbetreiber aus Belgien, den Niederlanden, Großbritannien, Neuseeland und Australien beteiligt. Hierdurch ist auch eine internationale Verbreitung der Ergebnisse gewährleistet.

Fazit

Das Micro-MAC-Prüfgerät bietet die Möglichkeit, weit mehr Informationen über die Qualität von Neuverlegungen und Renovierungen zu gewinnen. In einer Haltung können zahlreiche Einzelprüfungen in konstanten Abständen durchgeführt werden, womit qualitätsrelevante Eigenschaften über die gesamte Haltungs-länge sichtbar gemacht werden können. Durch die Messungen besteht damit erstmals die Möglichkeit, Bettungsqualitäten bei Neuverlegungen und Ringraumgröße und E-Modul bei Schlauchlinersanierungen quantitativ zu erfassen. Die dann nicht allein auf einer optischen Inspektion von Innen und punktuellen Materialprüfungen beruhenden Beurteilungen erhalten so eine deutlich höhere Aussagekraft und tragen so wesentlich zum Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen durch Abwasserexfiltrationen bei.

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt:

Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Beurteilung des Zustandes und des Sanierungserfolges nicht-begehrbarer Abwasserleitungen
AZ: 38149/01

Auftraggeber:



Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Auftragnehmer:



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Bearbeitung:

Wissenschaftliche Leitung: Prof Dr.-Ing. habil. B. Bosseler
Projektleitung und -bearbeitung: Dipl.-Ing. M. Liebscher
Dr.-Ing. M. Klameth
Dipl.-Ing. F. Bersuck
Simon Torunski, B.Sc.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
BILDERVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	7
ZUSAMMENFASSUNG	8
1 VERANLASSUNG	10
2 ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE	11
3 STAND DER TECHNIK	12
3.1 EINLEITUNG	12
3.2 MAC-VERFAHREN	12
3.2.1 <i>Vorbemerkung</i>	12
3.2.2 <i>Die klassische Vorgehensweise</i>	12
3.2.3 <i>Das MAC-Verfahren</i>	13
3.2.4 <i>Vorteile des MAC-Verfahrens</i>	14
3.2.5 <i>Fazit</i>	17
3.3 QUALITÄTSSICHERUNG SCHLAUCHLINER	18
4 ENTWICKLUNG UND BAU DER MICRO-MAC-PRÜFEINRICHTUNG	21
4.1 VORÜBERLEGUNGEN	21
4.2 ENTWICKLUNGSGRUNDLAGEN	22
4.3 KONSTRUKTION UND BAU DER PRÜFEINRICHTUNG	26
4.4 GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG	27
4.4.1 <i>Grundlagen</i>	27
4.4.2 <i>Gefährdungsbeurteilung Micro-MAC-Prüfeinrichtung</i>	31
4.5 BEDIENUNG UND MANUAL	33
5 INBETRIEBNAHME, PRAXISEINSÄTZE UND AUSWERTEKONZEPT	35
5.1 ÜBERBLICK	35
5.2 VERSUCHSSTRECKE IKT	35
5.3 SCHLAUCHLINERSANIERUNG DN 600	36
5.4 SCHLAUCHLINERSANIERUNG DN 300	38
5.5 AUSWERTEKONZEPTE	39
5.5.1 <i>Messwertanalyse Kunststoffrohr (Neubau)</i>	39
5.5.2 <i>Messwertanalyse Schlauchliner (Renovierung)</i>	43
5.6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	51
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	53
7 LITERATUR	55

Bilderverzeichnis

Bild 1	Funktionsweise des MAC-Verfahrens (aus [], verändert).....	14
Bild 2	Messgrößen einer MAC-Prüfung (aus [6], verändert).....	14
Bild 3	Praxiseinsatz: Herablassen der Einzelkomponenten durch den Kanaldeckel (links); Einsatz des Gerätes in einem Eiprofil DN 800/1200 (rechts)	15
Bild 4	Ergebnis einer MAC-Prüfung.....	16
Bild 5	Qualitätssicherung von Sanierungsmaßnahmen mit dem MAC-System (Quelle: Thépot, verändert)	17
Bild 6	Typische Liner-Wandkonstruktion [9].....	18
Bild 7	Schemazeichnung der Pressenanordnung im Rohr (orange) mit Liner (blau)	23
Bild 8	3D-Modell eines DN 300 mit 10 mm Wanddicke (blau) und Lasteinleitung im Kämpfer (Pfeile).....	24
Bild 9	Kalibrierung des Kraftmesssystems in einer Präzisionsprüfmaschine des IKT (links) und Erste Testläufe in einem Kunststoffrohr (rechts).....	27
Bild 10	MAC-Prüfeinrichtung - Komponenten.....	27
Bild 11	Ablaufschema zur Beurteilung der Explosionsgefährdung und Festlegung von Schutzmaßnahmen [17].....	29
Bild 12	Bezeichnungen der Bedienmaske – Teil 1	34
Bild 13	Bezeichnungen der Bedienmaske – Teil 2.....	34
Bild 14	Bezeichnungen der Bedienmaske – Teil 3.....	34
Bild 15	Einsatz des Micro-MAC in der IKT-Versuchsstrecke DN 300: Positionieren des Micro-MAC (links) und Anfahren der Prüfstellen (rechts)	35
Bild 16	Einsatz des Micro-MAC in der IKT-Versuchsstrecke DN 300: Prüfposition im Rohr (links) und Anfahren der Prüfstellen mit Schiebestangen (rechts)	35
Bild 17	Untersuchte Sonderzustände: Schraubzwinge (links), elastische Überschiebkupplung (Mitte) und normale Rohrverbindung (rechts)	36
Bild 18	Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 600: Schachteinstieg (links) und Blick in das Schachtbauwerk (rechts).....	37
Bild 19	Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 600: Micro-MAC am Haltungsanfang mit Linerendmanschette (links) und Blick in die sanierte Haltung mit Micro-MAC und Schiebestangen (rechts).....	37
Bild 20	Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 300: Schachteinstieg (links) und beengte Verhältnisse im Schachtbauwerk (rechts)	38

Bild 21	Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 300: Probleme bei der Einfahrt in den sanierten Kanal (links) und Vermessung der verbliebenen Zugangsöffnung (rechts)38
Bild 22	Grafische Darstellung der Messwerte aus Tabelle 1 (blau), Plausibilitätsbandbreite aus FE-Ergebnis zum Vergleich (hellgrün)41
Bild 23	3D-Modell eines Liners DN 600 mit 9,2 mm Wanddicke (links) und Deformation im Kämpfer (rechts)45
Bild 24	Mikro-MAC, Einbau in der Haltung vom Schacht aus.....47
Bild 25	Schematische Darstellung des erwarteten Idealverlaufs der Kraft-Verformungs-Linie47
Bild 26	Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 1 mit Regressionsfunktionen für die Gesamtfunktion (links) mit dem linearen Anteil in Bereich 2 (rechts, orange)48
Bild 27	Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 1 mit Regressionsfunktion für den linearen Anteil in Bereich 149
Bild 28	Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 2 mit Regressionsfunktionen für die Gesamtfunktion (links) mit dem linearen Anteil in Bereich 2 (rechts, orange)50
Bild 29	Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 2 mit Regressionsfunktion für den linearen Anteil in Bereich 150
Bild 30	Simon Torunski (IKT) demonstriert, dass mit der Messtechnik der Micro-MAC-Prüfeinrichtung sogar in Glasrohren Verformungen und Steifigkeiten direkt messbar sind.....52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Berechnete Deformationen Δd in [mm] und Ringspalt w_s in [%].....24
Tabelle 2	Sicherheitstechnische Kennwerte relevanter Stoffe [17]31
Tabelle 3	Gegenmaßnahmen zur Gefährdung im Umgang mit dem MAC-Prüfsystem32
Tabelle 4	Messwerte der Versuche entlang der Teststrecke (links), Variante mit Schraubzwingen (rechts).....41
Tabelle 5	Kombinierte Rohr-Bodensteifigkeiten für verschiedene E-Moduln des Bodens42
Tabelle 6	Kennwerte des FE-Systems: Eingabewerte (rot), berechnete Werte (blau)46

Zusammenfassung

Schadhafte Abwasserkanäle und -leitungen bergen ein hohes Risiko für die Umwelt, denn durch Undichtigkeiten können einerseits im Abwasser enthaltene Schadstoffe in die Umwelt gelangen und Boden und Grundwasser verunreinigen (Exfiltration). Andererseits kann es bei undichten Abwasserleitungen auch zu einer Infiltration von Grundwasser kommen, was wiederum den Fremdwasseranteil erhöht und somit zu einer hydraulischen Überlastung des Gesamtsystems Kanalisation/Kläranlage führt.

Vor dem Hintergrund der alternden Kanalnetze und des wachsenden Investitionsbedarfes kommt der Zustandserfassung und der Sanierung schadhafter Kanäle daher eine hohe Bedeutung zu. Die derzeit gängige Methode der optischen Inspektion mit TV-Befahrung liefert allerdings nur unzureichende Informationen über den tatsächlichen Zustand oder die Qualität ausgeführter Erneuerungs- bzw. Renovierungsmaßnahmen, da lediglich die unmittelbare Oberfläche des Kanalinneren in Augenschein genommen werden kann.

Ziel dieses Projektes war aufbauend auf das bereits etablierte MAC-Verfahren für Nennweiten größer als DN 1000 die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens, welches die Beurteilung des Bettungszustandes beim Neubau und des Sanierungserfolges bei der Renovierung nicht-begehrbarer Abwasserleitungen ermöglicht, das Mikro-MAC.

Zunächst wurde der Stand der Technik bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren und bei der derzeit üblichen Qualitätssicherung von Schlauchlinersanierungen analysiert. Mit Netzbetreibern wurden die möglichen Einsatzgebiete des Micro-MAC diskutiert und Randbedingungen für die Geräteentwicklung festgelegt. Im Rahmen der Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung wurde auf den Einsatz von jenen Techniken, die einen unbemannten Betrieb ermöglichen, besonderen Wert gelegt. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 800 wurde bei Praxiseinsätzen im IKT und in situ überprüft. Basierend auf den Testeinsätzen wurde eine fachliche Einordnung der Prüfergebnisse aus bautechnischer Sicht vorgenommen. Hier wurden insbesondere Möglichkeiten zur Auswertung der gewonnenen Messwerte für den jeweiligen Anwendungsfall zusammengestellt. Schließlich wurden Auswertekonzepte zur Qualitätssicherung von neuverlegten biegeweichen Rohren und von Schlauchlinersanierungen mithilfe der Prüfergebnisse des Micro-MAC-Verfahrens erarbeitet.

Im Ergebnis wurde eine Prüfeinrichtung entwickelt, welche die Möglichkeiten der Qualitätssicherung bei Neubau und Sanierung für den Nennweitenbereich DN 300 bis DN 800 um folgende Prüfaspekte erweitert:

- Überprüfung der Bettung bei neuverlegten biegeweichen Kanalrohren (Standardbettung / Flüssigböden).
- Überprüfung der Qualität von Schlauchlinersanierungen (E-Modul / Ringraum).

Künftig müssen nun die entwickelte Gerätetechnik und zugehörigen Auswertekonzepte im Labor und in situ bei unterschiedlichen Nennweiten, Rohrwerkstoffen, Bettungseigenschaften und Schlauchlinerwerkstoffen angewendet werden, um gegebenenfalls Modifikationen vornehmen zu können und die Datenbasis zu erweitern.

Das Micro-MAC-Prüfgerät bietet die Möglichkeit, weit mehr Informationen über die Qualität von Neuverlegungen und Renovierungen zu gewinnen. In einer Haltung können zahlreiche Einzelprüfungen in konstanten Abständen durchgeführt werden, womit qualitätsrelevante Eigenschaften über die gesamte Haltungslänge sichtbar gemacht werden können. Durch die Messungen besteht damit erstmals die Möglichkeit, Bettungsqualitäten bei Neuverlegungen und Ringraumgröße und E-Modul bei Schlauchlinersanierungen quantitativ zu erfassen. Die dann nicht allein auf einer optischen Inspektion von Innen und punktuellen Materialprüfungen beruhenden Beurteilungen erhalten so eine deutlich höhere Aussagekraft und tragen so wesentlich zum Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen durch Abwasserexfiltrationen bei.

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), AZ: 38149/01

1 Veranlassung

Schadhafte Abwasserkanäle und -leitungen bergen ein hohes Risiko für die Umwelt, denn durch Undichtigkeiten können einerseits im Abwasser enthaltene Schadstoffe in die Umwelt gelangen und Boden und Grundwasser verunreinigen (Exfiltration). Andererseits kann es bei undichten Abwasserleitungen auch zu einer Infiltration von Grundwasser kommen, was wiederum den Fremdwasseranteil erhöht und somit zu einer hydraulischen Überlastung des Gesamtsystems Kanalisation/Kläranlage führt. In der Folge kann es dann zu einer nicht unerheblichen Beeinträchtigung der Reinigungsleistung der Kläranlagen kommen. Des Weiteren kann es im Mischsystem durch den erhöhten Fremdwasseranteil zu vermehrten Abschlüssen an den Entlastungsbauwerken kommen und damit zur zusätzlichen Belastung der Gewässer.

Vor dem Hintergrund der alternden Kanalnetze und des wachsenden Investitionsbedarfes kommt der Zustandserfassung und der Sanierung schadhafter Kanäle daher eine hohe Bedeutung zu. Die derzeit gängige Methode der optischen Inspektion mit TV-Befahrung liefert allerdings nur unzureichende Informationen über den tatsächlichen Zustand oder die Qualität ausgeführter Erneuerungs- bzw. Renovierungsmaßnahmen, da lediglich die unmittelbare Oberfläche des Kanalinneren in Augenschein genommen werden kann.

Insbesondere auch mit Blick auf die eigentliche Sanierung schadhafter Abwasserleitungen können nur bedingt Aussagen über die Qualität der ausgeführten Arbeiten gemacht werden. So ist beispielsweise beim Schlauchliningverfahren – das am häufigsten verwendet wird – mit Hilfe der optischen Inspektion keine Aussage über die geometrischen und mechanischen Kennwerte des Liners in der Kanalhaltung und der Interaktion Liner-Altrohr möglich. Auch die gängige Praxis der Entnahme und Prüfung von Liner-Proben im Schacht kann keine hinreichenden Informationen über die tatsächliche Qualität des Sanierungsproduktes innerhalb der gesamten Haltung liefern.

Darüber hinaus stellt auch die Verwendung neuartiger Verfüllmaterialien für den Leitungsraben erhöhte Anforderungen an die Bauüberwachung und Gewährleistungsabnahme gerade bei biegeweichen Rohrwerkstoffen. So ist beispielsweise bei der Verwendung von Flüssigböden die Überprüfung der Materialeigenschaften bezüglich der Bettungseigenschaften über die gesamte Länge einer Kanalhaltung derzeit nicht ohne erheblichen Aufwand möglich (vgl. [1]).

Die eigentlichen Leistungsanforderungen an Abwasserkanäle und -leitungen, nämlich „Dichtheit“, „Standicherheit“ und „Betriebssicherheit“, welche eng mit den Aspekten der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes verknüpft sind, lassen sich jedoch dauerhaft nur über geeignete und aussagekräftige Instrumente der Qualitätsüberwachung sicherstellen und verbessern. Einbrüche oder Leckagen an Abwasserkanälen und -leitungen mit weitreichenden negativen Auswirkungen auf die Schutzgüter Grundwasser und Boden werden hierdurch dauerhaft vermieden. Hier setzt das Vorhaben an.

2 Zielstellung und Vorgehensweise

Ziel dieses Projektes war es, ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zu entwickeln, welches die Beurteilung des Bettungszustandes beim Neubau und des Sanierungserfolges bei der Renovierung nicht-begehbare Abwasserleitungen ermöglicht (Micro-MAC). In einem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben von 2013, welches von der DBU gefördert wurde (AZ 29939-23 [2]), wurde das MAC-Prüfverfahren zur Standsicherheitsbeurteilung von begehbaren Kanälen der Nennweiten von DN 800 bis DN 1.500 entwickelt und anschließend auch bereits mehrmals erfolgreich eingesetzt. Aufbauend auf diesen Erfahrungen und unter Einbeziehung eines bereits vorhandenen Prototyps von Eau de Paris (Pariser Wasserwirtschaftsbetriebe), der nur bei einer festen Nennweite von DN 300 eingesetzt werden kann, soll nun ein Prüfgerät entwickelt werden, dass zerstörungsfreie Prüfungen in einem Nennweitenbereich zwischen ca. DN 300 und DN 800 ermöglicht. Die Herausforderung besteht – ausgehend vom Prototypen - insbesondere auch darin, die bereits vorhandenen Auswerte-Routinen des MAC auf das Micro-MAC abzustimmen, zu verbessern, dabei auch neue Aspekte aufzugreifen und einen autonomeren Betrieb des Prüfgerätes zu ermöglichen.

Im Einzelnen wurde folgende Vorgehensweise zur Erreichung dieser Zielstellung gewählt:

Zunächst wurde der Stand der Technik bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren und bei der derzeit üblichen Qualitätssicherung von Schlauchlinermaßnahmen analysiert (vgl. Kapitel 3).

Sodann wurden die Randbedingungen und Einsatzgebiete für das zu entwickelnde Prüfsystem zusammengestellt, analysiert und mit Netzbetreibern diskutiert. Auf Basis dieser Analyse wurde das Micro-MAC detailliert geplant und bautechnisch umgesetzt (vgl. Kapitel 4).

Schließlich wurde das Gerät in Betrieb genommen und in Praxiseinsätzen erprobt und weiterentwickelt. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 800 wurde durch Prüfungen an einem Testrohr auf dem Versuchsgelände des IKT und an schlauchlinersanierten Rohren bei einem Kanalnetzbetreiber für die Qualitätskontrolle bei Neubau- und Renovierungsmaßnahmen überprüft. Die im Rahmen dieser Praxiseinsätze gewonnenen Messdaten und Erkenntnisse wurden dann in verfahrensspezifische Auswertekonzepte für Neubau und Renovierung überführt (vgl. Kapitel 5).

3 Stand der Technik

3.1 Einleitung

In Abschnitt 3.2 wird die Arbeitsweise des MAC-Verfahrens und die Möglichkeiten der Nutzung der Mess- und Berechnungsergebnisse erläutert.

Anschließend werden in Abschnitt 3.3 die derzeitigen Möglichkeiten der Qualitätssicherung beim Einbau von Schlauchlinern erläutert.

3.2 MAC-Verfahren

3.2.1 Vorbemerkung

Im folgendem wird auszugsweise ein Artikel des IKT aus der Zeitschrift bbr wiedergegeben, in welchem die Vorgehensweise beim Einsatz des MAC-Verfahrens beschrieben wird [3].

Das IKT und Eau de Paris, der Wasserbetrieb der französischen Hauptstadt, haben gemeinsam ein Gerät zur experimentellen Beurteilung der Standsicherheit von begehbaren Sammlern entwickelt. Mit Hilfe dieses Systems können ökologisch und ökonomisch sinnvolle Kanalsanierungsstrategien beschritten werden. Die Vorteile beim Einsatz dieses Verfahrens für die Standsicherheitsbeurteilung von Großprofilen und die Qualitätskontrolle von durchgeführten Sanierungsarbeiten werden aufgezeigt.

3.2.2 Die klassische Vorgehensweise

Die Instandhaltung von Großprofilen ist in der Regel arbeitsaufwändig, kostenintensiv und mit hohen Erfolgsrisiken verbunden.

Schwerpunkt optische Inspektion

Die Ergebnisse aus der Zustandserfassung (z.B. optische Inspektion durch Begehung) sind für die anschließende Auswahl des Sanierungsverfahrens von großer Bedeutung. Die optische Inspektion oder Inaugenscheinnahme liefert hier allerdings nur unzureichende Informationen über den Zustand der inspizierten Haltung, denn lediglich die unmittelbare Kanalinnenoberfläche kann beurteilt werden.

Bohrkernentnahme nach dem Zufallsprinzip

Eine für die Beurteilung der Standsicherheit notwendige Begutachtung der Bereiche hinter oder in der Kanalwand sowie dem darüber liegenden Bodenkörper und dem Straßenoberbau ist mit den optischen Inspektionsverfahren allein nicht möglich. Daher wird die optische Inspektion in der Regel durch die Entnahme von Bohrkernen an den Stellen unterstützt, welche auf Basis der vorhandenen Pläne und der Ergebnisse der optischen Inspektion problematisch erscheinen. Sollten hierdurch keine auffälligen Bereiche festgelegt werden können, so werden die Prüfquerschnitte auch nach dem Zufallsprinzip festgelegt. Zumeist werden für die Bohrkernentnahme nicht mehr als zwei oder drei Querschnitte auf einer Länge von etwa 100 m ausgewählt. Hierdurch können stichprobenartig Wanddicken und Materialfestigkeiten ermittelt werden.

Unzureichende Bodenerkundung

Die Erkundung des umliegenden Bodens erfolgt zumeist durch Erkundungsbohrungen von der Oberfläche aus. Da diese jedoch zum einen recht teuer sind und zum anderen einen von querenden Leitungen freien Querschnitt erfordern, werden diese nur sehr sporadisch durchgeführt. Diese Vorgehensweise kann daher zu erheblichen Fehleinschätzungen hinsichtlich des baulichen Zustands und des aktuellen Sanierungsbedarfs führen.

Viele offene Fragen

Eine zuverlässige Beurteilung der Standsicherheit und die Auswahl des Sanierungsverfahrens ist auf Basis derartiger Informationen kaum möglich. Muss beispielsweise die Rohrsubstanz verstärkt werden oder liegt der Schwachpunkt des Tragsystems im umgebenden Boden? Reicht demnach eine Innenauskleidung oder sind Bodeninjektionen erforderlich? Nach einer erfolgten Sanierung kommt darüber hinaus immer wieder die Frage auf, ob das Sanierungsverfahren geeignet war oder ob das Sanierungsziel der statischen Ertüchtigung auch erreicht wurde. Eine direkte Kontrolle des Reparaturergebnisses ist derzeit nicht möglich. Das größte Problem bei der klassischen Vorgehensweise besteht im Auffinden der potenziellen statischen Schwachstellen und den fehlenden Möglichkeiten zur Überprüfung des reparierten Rohr-Boden-Systems.

Wunschziele einer Zustandsbeurteilung

Somit lassen sich die Ziele einer Zustandsbeurteilung mit anschließender Reparatur von Großprofilen folgendermaßen definieren:

1. Schwachstelle finden
2. Reparatursystem identifizieren
3. Schwachstelle beseitigen
4. Reparaturergebnis überprüfen
5. Langzeitwirkung nachweisen

Hier kann das MAC-Verfahren einen wichtigen Beitrag leisten.

3.2.3 Das MAC-Verfahren

Das MAC-Prüfsystem (Mechanical Assessment of Conduits) wird in Frankreich bereits seit dem Jahr 1989 in Großprofilen ab DN 1500 angewendet [4]. Das IKT passte dieses System für den Einsatz in kleineren Durchmessern als DN 1500 an und entwickelte die eingesetzte Mess- und Regeltechnik weiter. Dies geschah in enger Kooperation mit Eau de Paris, dem Entwickler dieses Systems, im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes [5].

Mit einem starken **Druckzylinder** wird bei den Prüfungen so viel Kraft auf die Wände des Kanals aufgebracht, dass diese sich kontrolliert um wenige zehntel Millimeter auseinander bewegen (Bild 1). Feine **Sensoren** messen die entstehende Verformung im Bereich der Druckstempel und in jeweils etwa einem Meter Entfernung davor und dahinter (Bild 2). Die sehr geringe Verformung reicht aus, um unter Einbeziehung des Verformungsbilds und der eingesetzten Kraft den Zustand von Rohr und Boden zu

errechnen. Um die an den Durchmesser des Kanals angepasste Verformung zu erreichen, kann durchaus eine Kraft von 10 Tonnen oder mehr erforderlich sein. Durch die minimale Verformung wird der Kanal trotz der hohen Kräfte in keiner Weise beschädigt.

Ist die Geometrie des Sammlers (Form und Wanddicke) bekannt, so kann der Elastizitätsmodul des Bauwerks und der Verformungsmodul des Bodens in dreidimensionalen Berechnungen mit der Finite-Element-Methode ermittelt werden.

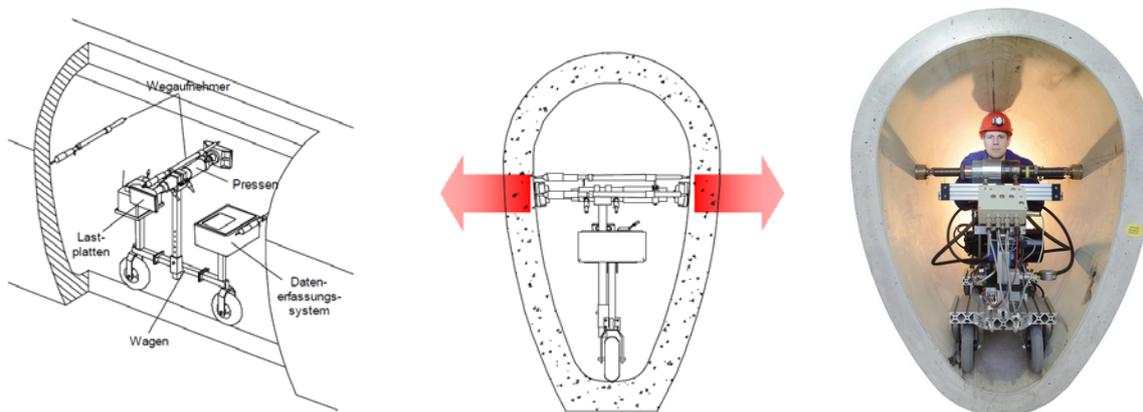


Bild 1 Funktionsweise des MAC-Verfahrens (aus [6], verändert)

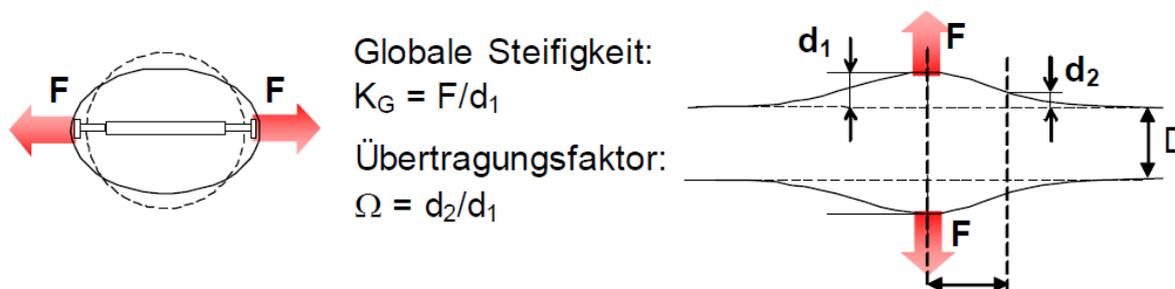


Bild 2 Messgrößen einer MAC-Prüfung (aus [6], verändert)

3.2.4 Vorteile des MAC-Verfahrens

Das beschriebene MAC-Verfahren bietet im Vergleich zur klassischen Vorgehensweise die Möglichkeit weit mehr Informationen über das Rohr-Boden-System zu gewinnen, ohne die Anzahl der Kernbohrungen im Kanal oder der Aufschlussbohrungen im umgebenden Boden zu erhöhen. In einer Haltung können zahlreiche zerstörungsfreie Systemprüfungen durchgeführt werden, welche eine Aussage über die Gleichförmigkeit des Rohr-Boden-Systems über die gesamte Haltungslänge zulassen.

Die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme von der Zustandserfassung bis zur langfristigen Qualitätsüberprüfung lässt sich folgendermaßen beschreiben:

Vorarbeiten

Zunächst muss der Kanal einer optischen Inspektion unterzogen werden. Im Rahmen dieser Inspektion sind zusätzlich die für das MAC-System relevanten Parameter mit

zu erfassen. Hier sind beispielsweise wechselnde Profilweiten- und -höhen sowie aussteifende Bauteile zu nennen. Auch sind dann bereits das Messraster und die Lage der Messpunkte für die MAC-Prüfung festzulegen.

Beurteilung des Rohr-Boden-Systems

Im Anschluss an die optische Inspektion wird die erste MAC-Prüfung durchgeführt. Der Wasserstand im Kanal darf hierbei etwa 30-40 cm nicht überschreiten und zudem muss der zu untersuchende Abschnitt ausreichend belüftet werden. Das MAC-Gerät kann so zerlegt werden, dass es durch einen normalen Schachtdeckel in den Kanal abgelassen werden kann (Bild 3, links). Unten wird es für die Prüfung wieder zusammengebaut (Bild 3, rechts).



Bild 3 Praxiseinsatz: Herablassen der Einzelkomponenten durch den Kanaldeckel (links); Einsatz des Gerätes in einem Eiprofil DN 800/1200 (rechts)

Nach den Messungen liegen für den betreffenden Kanal-Abschnitt die entsprechenden Steifigkeiten des Gesamtsystems im vorher festgelegten Messraster vor (Bild 4).

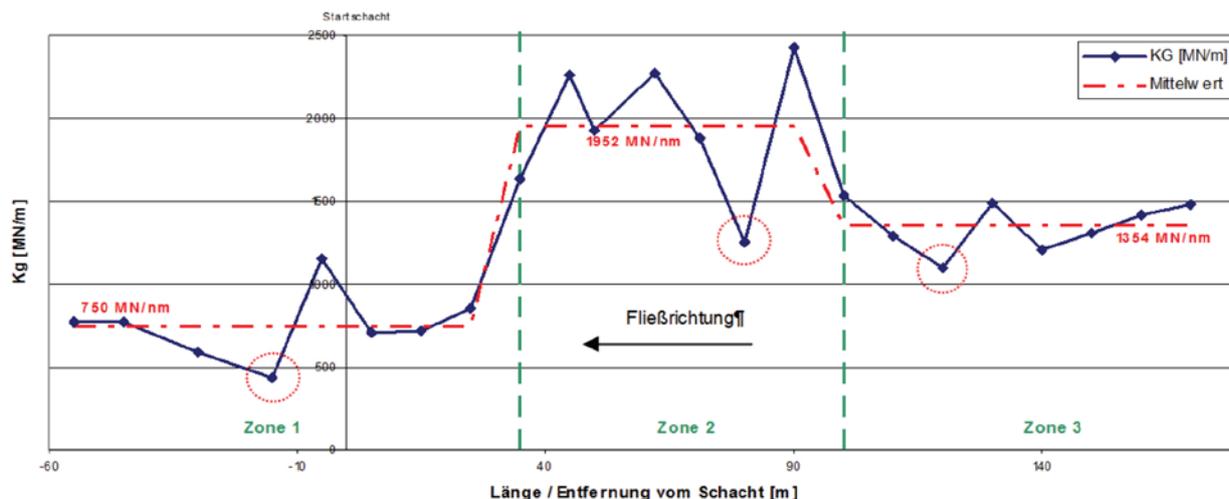


Bild 4 Ergebnis einer MAC-Prüfung

Durch diese Messungen besteht also die Möglichkeit eine komplette Haltung in Zonen gleicher Rohr-Boden-Steifigkeit einzuordnen. Man kann also direkt potenzielle Schwachstellen finden. Anschließend können zielgerichtet die Stellen für nähere Untersuchungen zur Qualität und Geometrie des Sammlers in Form von Bohrkernuntersuchungen festgelegt werden.

Quantifizierung von Standsicherheitsrisiken

Nachdem Wanddicken und Festigkeiten durch Bohrkern ermittelt wurden, kann ein statischer Nachweis nach DWA A 143-2 [7] geführt werden. Sollte dieser Nachweis keine ausreichenden Sicherheiten ergeben, so können dreidimensionale Berechnungen nach der Finite-Element-Methode durchgeführt werden, welche Rückschlüsse auf die Rohr- und Bettungsqualität zulassen. Auf Basis dieser Berechnungen besteht die Möglichkeit Schwachstellen in der Rohrwand und Auflockerungszonen oder Hohlstellen in der Bettung zu orten.

Sanierungsanalyse und Verfahrensauswahl

Anhand der Ergebnisse der optischen Inspektion und der ersten MAC-Prüfung kann dann festgelegt werden, welche Ziele im Rahmen einer Sanierung verfolgt werden müssen. Hierbei kann die gesamte Haltung in Sanierungszonen eingeteilt werden, in welchen beispielsweise die Dichtheit, die Hydraulik, aber auch der Substanzerhalt bzw. die Substanzverbesserung in den Vordergrund gestellt werden.

Im Rahmen der Substanzverbesserung können Sanierungsmaßnahmen zielgerichtet auf die jeweilige Schwachstelle ausgerichtet werden, z.B. als Spritzbetonauskleidungen zur statischen Ertüchtigung des Sammlers oder Bodeninjektionen zur Verbesserung der Bettung. Diese dann nicht allein auf einer optischen Beurteilung von Innen beruhende Verfahrensauswahl erhält so eine deutlich erhöhte Aussagekraft und die auf dieser Basis durchgeführten Standsicherheitsbeurteilungen eine erheblich größere Zuverlässigkeit.

Qualitätssicherung der Sanierung / Langzeitbetrachtung

Des Weiteren kann das MAC-Verfahren auch zur Qualitätssicherung ausgeführter Sanierungsarbeiten oder zur wiederkehrenden Kontrolle statisch kritischer Bereiche

herangezogen werden. Es können direkte Vorher-Nachher-Vergleiche oder auch zeitliche Entwicklungen messtechnisch erfasst werden. So kann die Wirkung von Sanierungsmaßnahmen, wie Bodeninjektionen oder Spritzbetonauskleidungen, direkt ermittelt werden.

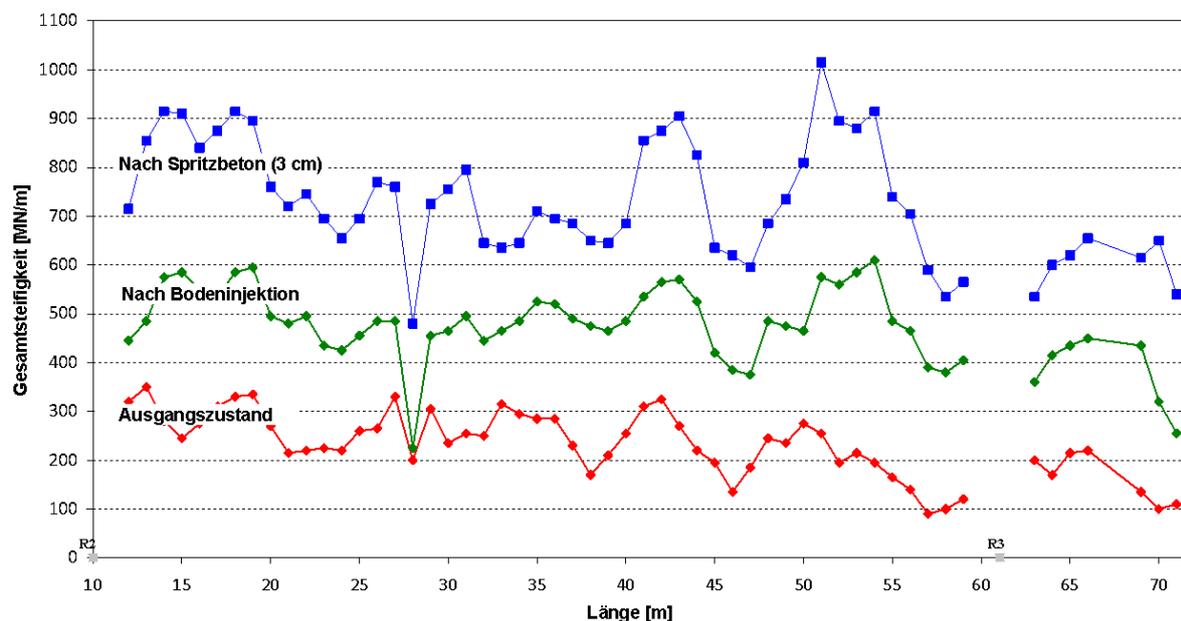


Bild 5 Qualitätssicherung von Sanierungsmaßnahmen mit dem MAC-System
(Quelle: Thépot, verändert)

Auch die Kontrolle der Einbau- und Bettungsverhältnisse im Rahmen einer Neubau- maßnahme sind mit diesem Verfahren möglich. Dies insbesondere weil die geplanten Randbedingungen bekannt sind und somit „Sollwerte“ auch für die spätere Prüfung im Betrieb festgelegt werden können. Schließlich erscheint auch der Einsatz des Verfah- rens zur Qualitätssicherung der verwendeten Neurohre durchaus denkbar. Hier könn- ten erhebliche Kosten für die Prüfung der Großrohre eingespart werden, wenn die Prüfung der Rohre von Innen zuverlässige Aussagen zur Betonqualität und zur Be- wehrung ermöglicht.

3.2.5 Fazit

Das beschriebene MAC-Verfahren bietet im Vergleich zur klassischen Vorgehenswei- se die Möglichkeit weit mehr Informationen über das Rohr-Boden-System zu gewin- nen, ohne die Anzahl der Kernbohrungen im Kanal oder der Aufschlussbohrungen im umgebenden Boden zu erhöhen. Soweit erforderlich können anschließend zielgerich- tet nähere Untersuchungen zur Qualität und Geometrie des Sammlers durchgeführt werden. Zudem können anhand der Prüfung in Verbindung mit den Ergebnissen von Bohrkernentnahmen statische Berechnungen durchgeführt werden, welche auch Rückschlüsse auf die Lastverteilung zwischen Boden und Rohr zulassen. So können Sanierungsmaßnahmen zielgerichtet auf die jeweilige Schwachstelle ausgerichtet werden, z.B. als Spritzbetonauskleidungen zur statischen Ertüchtigung des Sammlers oder Bodeninjektionen zur Verbesserung der Bettung. Diese dann nicht allein auf ei- ner optischen Beurteilung von Innen beruhende Verfahrensauswahl erhält so eine

deutlich erhöhte Aussagekraft und die auf dieser Basis durchgeführten Standsicherheitsbeurteilungen eine erheblich größere Zuverlässigkeit.

Des Weiteren kann das MAC-Verfahren auch zur Qualitätssicherung ausgeführter Sanierungsarbeiten oder zur wiederkehrenden Kontrolle statisch kritischer Bereiche als direkte Vorher-Nachher-Vergleiche herangezogen werden. Auch die Kontrolle der Einbau- und Bettungsverhältnisse im Rahmen einer Neubaumaßnahme sind mit diesem Verfahren im Nennweitenbereich ab DN 1000 möglich.

Derzeit ist es nicht möglich Kanäle mit einer Nennweite kleiner als DN 1000 mit diesem System zu untersuchen, da immer Mitarbeiter im Kanal die Prüfeinrichtung positionieren und bedienen müssen. Insbesondere die Beurteilung von neuverlegten biegeweichen Rohren oder von schlauchlinersanierten Altkanälen im kleineren Nennweitenbereich ist derzeit nicht möglich.

3.3 Qualitätssicherung Schlauchliner

Rohre aus erhärtenden Schlauchlinern werden laut [8] vor Ort, d. h. auf der Baustelle nach Einbringen in das Altrohr, hergestellt. Im Rahmen des Herstellungsprozesses wird der Liner als konfektioniertes, kunstharzgetränktes Trägermaterial (Verbundwerkstoff) in Schlauchform in die zu sanierende Haltung eingebracht und unter Druck an die Innenwand angepresst. Nach DIN EN 11296-4 [9] ist ein Liner ein „flexibler Schlauch, bestehend aus Trägermaterial, Harzsystem, und allen Folien/Beschichtungen und/oder Verstärkungen, die vor dem Einbringen in das zu renovierende Rohr zusammengebracht werden. Es entsteht ein muffenloses Rohr, das mit Folien beschichtet sein kann (innen und außen). Diese Folien dienen u. a. als Einbauhilfe oder werden systemabhängig auch als integraler Bestandteil des Liners betrachtet. In Bild 6 ist ein Beispiel einer Liner-Wandkonstruktion dargestellt [9].

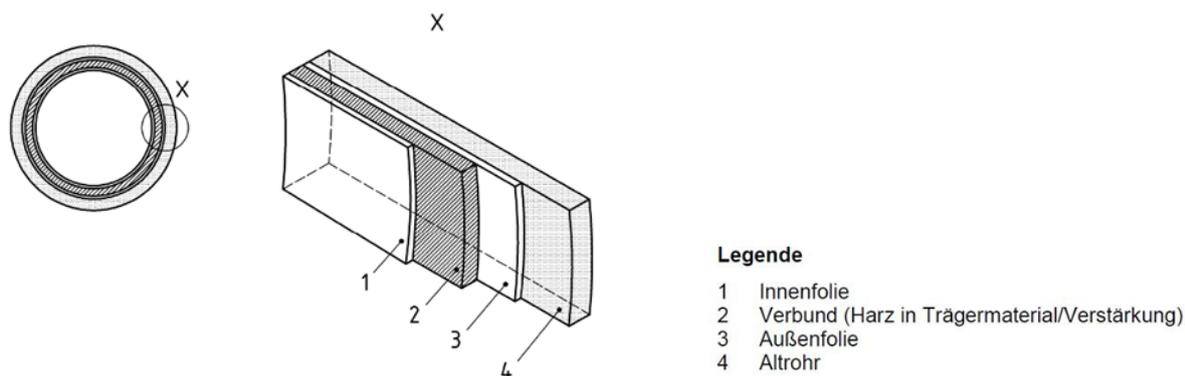


Bild 6 Typische Liner-Wandkonstruktion [9]

Die Qualitätssicherung ist beim vor Ort härtenden Schlauchlining-Verfahren besonders wichtig, denn der Liner entsteht erst vor Ort auf der Baustelle unter schwer kontrollierbaren Bedingungen. Viele Faktoren beeinflussen die Qualität des Sanierungsergebnisses. In der Regel werden im Schachtbereich Probestücke aus dem Liner ent-

nommen und einem umfangreichen Prüfprogramm unterzogen. Nachfolgend werden mögliche Prüfungen kurz beschrieben [10]:

E-Modul (Kurzzeit-Biegemodul)

- Schlauchliner müssen tragfähig sein gegen Lasten wie Grundwasser, Straßenverkehr, Erddruck.
- Elastizitätsmodul ist ein Kennwert für Tragfähigkeit.
- Ist er zu gering, kann Standsicherheit gefährdet sein.
- Prüfmethode: Drei-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 11296-4

Biegefestigkeit (Biegespannung beim Bruch)

- kennzeichnet den Punkt, an dem Liner wegen zu hoher Spannung versagt
- wenn Biegefestigkeit zu gering, kann Liner brechen, noch bevor die maximale Verformung erreicht ist
- Prüfmethode: Laststeigerung im Drei-Punkt-Biegeversuch bis zum Versagen
- nach DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 11296-4 (Kurzzeit-Biegefestigkeit)

Wanddicke (mittlere Verbunddicke)

- Mindestwert wird in der statischen Berechnung festgelegt
- Wanddicke und E-Modul bestimmen gemeinsam die Steifigkeit des Liners
- zu geringe Wanddicke kann Standsicherheit gefährden
- Prüfmethode: mit Präzisionsschieblehre wird mittlere Verbunddicke nach DIN EN ISO 11296-4 gemessen

Wasserdichtheit nach APS

- Innenfolie einschneiden, sofern nicht integraler Bestandteil des Liners
- Außenfolie entfernen, sofern vorhanden
- rot gefärbtes Wasser innen auftragen
- außen 0,5 bar Unterdruck aufbringen
- Liner ist undicht, wenn Wasser durchdringt
- Prüfdauer: 30 Minuten

Glasübergangstemperatur (DSC-Analyse)

- kennzeichnet die Aushärtung von Epoxidharzen
- ist die Glasübergangstemperatur zu gering, so ist das Harz nicht vollständig ausgehärtet
- kann an kleinen Proben mit 20 mm Durchmesser bestimmt werden
- wird ermittelt, wenn keine Probe für die mechanische Prüfung entnommen werden kann

Mindestprüfumfang für jeden eingebauten Schlauchliner sind der Dreipunkt-Biegeversuch zur Bestimmung von E-Modul und Biegespannung sowie die Dichtheitsprüfung des Laminates im Labor. In der ZTV Materialprüfung Schlauchliner sind weitere Prüfungen definiert. Mit ihnen kann die Qualität von Schlauchlinern noch präziser bestimmt werden. Dazu gehören unter anderem:

- Spektralanalyse,

- Bestimmung des Reststyrolgehalts,
- Bestimmung des Füllstoff- und Glasgehalts,
- 24-Stunden-Kriechneigung,
- Spezifisches Gewicht (Dichte).

Die Laborprüfungen an den auf Baustellen im Schachtbauwerk entnommenen Probestücken können aber auch grundsätzlich nur einen Teil der tatsächlichen Situation des im Altrohr eingebauten Schlauchliner-Systems abbilden. Abgeschlossene Forschungsprojekte des IKT zeigen (vgl. [11], [12], [8], [13] und [14]), dass auch andere Aspekte wie z. B. Widerstand des Gesamtsystems gegen Außenwasserdruck, Ringspaltmaß, Vorverformung und Bogengängigkeit für die Qualität des Liners von Bedeutung sind, die aber im Labor nicht überprüft werden können. Darüber hinaus wird auch in [8] deutlich, dass die Eigenschaften (Wanddicke, E-Modul, Biegezugfestigkeit und Wasserdichtheit) der im Schachtbauwerk entnommenen Probestücke stark von denen der innerhalb einer Haltung entnommenen Probestücke abweichen können. Auch die im Rahmen einer Beprobung durchgeführte TV-Inspektion nach DIN EN 13508 und Dichtheitsprüfung nach DWA-M 149-6 kann nur bedingt Aussagen über die Qualität des Liners im Bereich der Haltung liefern.

Laut [12] wird die Tragfähigkeit des Gesamtsystems darüber hinaus durch eine formschlüssige Anpassung des Liners an das Altrohr erheblich verbessert. Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass bereits unmittelbar nach dem Einbau ein Ringspalt vorhanden sein kann. Gemäß [15] kann auch bei einem planmässig formschlüssigen Einbau ein Ringspalt entstehen. Die Spaltbildung zwischen Liner und Altrohr ist demnach abhängig von der Altrohrgeometrie, der Verfahrenstechnik und den Werkstoffeigenschaften des Liners. In [16] wurden an fünf Jahre alten sanierten Kanälen Spaltweiten zwischen Altrohr und Liner von über 2 mm gemessen. In der statischen Berechnung der Linersysteme wird daher immer ein theoretischer Ringspalt angenommen. Obwohl eine Vergrößerung dieses Ringspalt es erhebliche Auswirkungen auf die Standsicherheit haben kann, ist eine Kontrolle desselben allerdings nach dem Einbau nicht möglich.

Grundsätzlich besteht also derzeit nicht die Möglichkeit den nach dem Linereinbau vorhandenen Ringspalt zwischen Altrohr und Liner bzw. den E-Modul des Liners über die Haltungslänge zerstörungsfrei zu ermitteln. Gerade dies ist jedoch bei einem vor Ort hergestellten Kanalrohr anzustreben, da dieses unter ständig variierenden Randbedingungen eingebaut wird.

4 Entwicklung und Bau der Micro-MAC-Prüfeinrichtung

4.1 Vorüberlegungen

Wie bereits in Abschnitt 3 dargestellt gibt es derzeit 3 Szenarien, bei welchen das MAC-Verfahren derzeit an seine Grenzen stößt:

1. Einsatz im Nennweitenbereich kleiner als DN 1000.
2. Bettungskontrolle bei biegeweichen Kanalrohren in diesem Nennweitenbereich.
3. Ringraum- und E-Modulkontrolle bei linersanierten Haltungen in diesem Nennweitenbereich.

Die drei Aspekte wurden auch mit Netzbetreibern diskutiert, um die Ausrichtung des neu zu entwickelnden Micro-MAC praxisorientiert zu wählen. Es zeigte sich, dass die Standsicherheitsbetrachtung von Altrohren im kleineren Nennweitenbereich (1) nicht vorrangiges Ziel der Entwicklung sein muss. In der Regel können die für die Linerbestimmung erforderlichen Altrohrzustände I und II anhand von Videoinspektionen festgelegt werden. Lediglich im Altrohrzustand III wäre eine Prüfung wünschenswert, jedoch treten hier bei einem unbemannten Einsatz im nichtbegehbaren Nennweitenbereich erhebliche Schwierigkeiten beim Ansetzen und Positionieren von Wegaufnehmern und Krafeinleitungen auf.

Deutlich positiver wurde die Möglichkeit bewertet, neuverlegte Kunststoffrohre bezüglich ihrer vorhandenen Bettungssituation (2) zu untersuchen. Dies insbesondere wegen immer häufiger zur Anwendung kommenden innovativer Bettungsmaterialien wie z.B. Flüssigböden, bei welchen Qualitätssicherungsmaßnahmen im eingebauten Zustand derzeit noch fehlen.

Die größte Resonanz bei den Netzbetreibern fand jedoch die Qualitätskontrolle bei mit Schlauchlinern sanierten Rohren (3). Gerade die Vermessung des Ringraumes und die Ermittlung des E-Moduls wurden hier als vorrangiges Ziel benannt.

Daher wurde die Entwicklung des Micro-MAC auf folgende Ziele ausgerichtet:

- Überprüfung der Bettung bei neuverlegten biegeweichen Kanalrohren (Standardbettung / Flüssigböden).
- Überprüfung der Qualität von Schlauchlinersanierungen (E-Modul / Ringraum).
- Einsatz im Nennweitenbereich von DN 300 bis DN 800.

Maßgeblich für die Entwicklung des Prüfsystems ist hierbei die Überprüfung der Qualität von Schlauchlinern im eingebauten Zustand. Das liegt daran, dass für die Bestimmung von Ringraum und E-Modul sehr genaue und präzise steuerbare Mess- und Prüfmittel eingesetzt werden müssen. Daher wurden zunächst die Randbedingungen für den Einsatz im Schlauchliner näher betrachtet.

4.2 Entwicklungsgrundlagen

Auf Basis der in den Diskussionen mit den Betreibern festgelegten Anwendungsgebiete wurden die Grundlagen für die Entwicklung des Micro-MAC zusammengestellt. Der Schwerpunkt lag hier aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen bei den Vorgaben zur Konstruktion des Gerätes für den Einsatz in schlauchlinersanierten Kanälen. Bezogen auf das endgültige Design können dann auf dieser Basis die maschinentechnischen Anforderungen bezüglich Baugröße, Krafterleitung und Deformationsmessung abgeleitet werden.

Ringraum

Bei der Berechnung von Schlauchlinern wird i.d.R. mit einem Ringspalt zwischen Liner und Altrohr gerechnet, der entstehen kann, wenn der Liner nach dem Aushärtungsprozess abkühlt und kontrahiert. Auch ein gewisses Schrumpfen aufgrund der chemischen Prozesse beim Aushärtungsprozess im verwendeten Harz sind möglich. Da dieser Prozess der Kontraktion und Ablösung von der Wand des Altrohrs eine Abweichung zum idealen System der Altrohr-Liner-Bettung (Rohr-im-Rohr-System nach Glock) darstellt, wird bei der Berechnung eines Liners nach DWA-A 143-2 auf der sicheren Seite liegend für die Beulsteifigkeit mit einem Ringspalt von 0,5 % rL gerechnet, der sich zusammensetzt aus einem thermischen und chemischen Anteil. Ob dieses Kriterium zutrifft bzw. eingehalten wird, ließ sich bislang lediglich durch eine zerstörende Prüfung am eingebauten Liner in der Haltung selbst ermitteln. Pauschal und ohne weitere Anhaltspunkte, ließ sich bislang nur vermuten, ob diese wichtige statische Anforderung wirklich eingehalten wird. Mit dem Mikro-MAC soll es nunmehr möglich sein, nach dem Einbau des Liners den Ringspalt durch ein Auseinanderdrücken des Liners zu schließen und somit festzustellen, ob die maximal zulässige Größe wirklich eingehalten wird.

Baugröße

Das Gerät ist in seiner Baugröße einerseits so zu konzipieren, dass es in Rohre DN 300 eingeführt werden und dort Messungen vornehmen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der eingebaute Liner und ggfs. Faltenbildung beim Einbau den Nenn-durchmesser weiter reduziert, sodass mit einem minimalen Innendurchmesser von ca. 270 mm zu rechnen ist.

Andererseits ist das Gerät so zu konzipieren, dass das Chassis auch bis auf DN 800 einstellbar bzw. erweiterbar ist. Dabei muss sichergestellt werden, dass sich die hydraulische Presse und Wegaufnehmer stets auf Kämpferhöhe des Rohres befinden und insbesondere das Gestänge für die Kraftübertragung eine ausreichend hohe Knicksteifigkeit aufweist, sodass die aufzubringenden Kräfte auch sicher eingeleitet werden können (Bild 7).

Hinsichtlich der Baulänge muss das Gerät kurz genug oder mit Gelenken versehen sein, sodass es vertikal durch einen Standardschacht eingeführt werden kann und sich am Schachtboden horizontal in die Haltung einführen lässt.

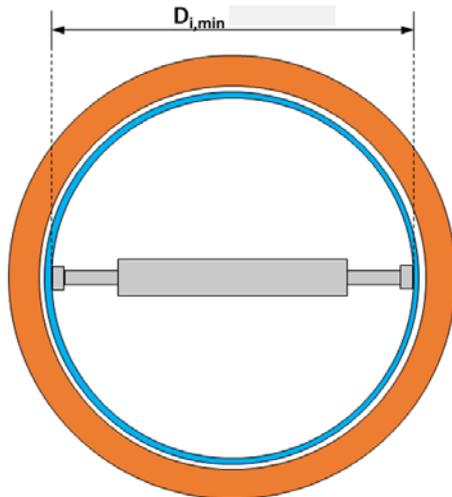


Bild 7 Schemazeichnung der Pressenanordnung im Rohr (orange) mit Liner (blau)

Krafteinleitung

Für die Wahl der hydraulischen Presse ist einerseits die maximal aufzubringende Kraft maßgeblich. Zusätzlich ist die horizontal zurückzulegende Wegstrecke zum Anfahren der Presse an die Wand und während der Messung zu berücksichtigen. Die Problematik der Dimensionierung besteht dabei in den teils konkurrierenden Anforderungen. Während z.B. einerseits eine möglichst große Krafteinleitung und große mögliche Wegstrecke gewünscht ist, um in der Anwendung entsprechende Reserven in der Handhabung zu haben, vergrößert sich damit die Presse und Abmessung und Gewicht. Gleichzeitig stellt sich die Frage nach der notwendigen Messgenauigkeit, da sich in der Praxis hohe Messgenauigkeit und große Wegstrecken i.d.R. gegenseitig ausschließen bzw. erhöhten Aufwand und Kosten erfordern. Die Presse und Messeinrichtung sind daher ausreichend groß bzw. genau zu bemessen, ohne dabei über das Ziel hinauszuschießen. Um die notwendigen Größen zu bestimmen, bieten sich entsprechende Vergleichsrechnungen mit der FE-Methode an.

Berechnungen nach der Finite-Element-Methode (FEM)

Beim Einbau des Liners ist nach den Ansätzen der Statik in DWA-A 143-2 mit einem Ringspalt von insgesamt max. 0,5 % rL zu rechnen. Dies bedeutet einen maximalen Ringspalt bei DN 800 von 4 mm. Die notwendige Kraft, um diesen Ringspalt zu überdrücken wird vorab mit Hilfe von vergleichenden FE-Berechnungen ermittelt. Sie ist maßgeblich von folgenden Faktoren abhängig:

- (Innen)-Durchmesser des Altrohrs
- Dicke des Liners
- E-Modul des Liners

Der E-Modul des Liners und die resultierende Verbunddicke sind dabei voneinander abhängig. Je höher der E-Modul (und die Biegezugfestigkeit) des Materials ist, desto geringer kann die Wanddicke ausgebildet werden. Sinnvolle Größenordnungen für die überschlägliche Wahl von Werten finden sich in Form von Kenngruppen im DWA-M 144-3.

Für eine auf der sicheren Seite liegenden und gleichzeitig sinnvollen Auslegung wurden daher mit Hilfe eines dreidimensionalen FE-Modells verschiedene Beispielberechnungen durchgeführt, die die Vorgehensweise der Messung beim Mikro-MAC simulieren sollten. Gerechnet wurde jeweils mit der kleinsten und einer größeren zu erwartenden Nennweite DN 300 und DN 600. Die Wanddicke t wurde zuvor in verschiedenen Beispielrechnungen nach A 143-2 berechnet und in Schritten von 2 mm zwischen 4 mm und 10 mm variiert. Der maximale E-Modul für den zu simulierenden Linner wurde zu $E = 20.000 \text{ N/mm}^2$ gesetzt, die Querdehnzahl auf $\mu = 0,35 [-]$. Im FE-Modell wurde dann auf einer 9-Uhr-Position im Kämpfer testweise eine Kraft von $F = 4.000 \text{ N}$ auf einer Fläche von $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ eingeleitet (siehe Abbildung 3). Die später auszuführende Lasteinleitungsfläche an der Presse wird jedoch kreisförmig und deutlich kleiner sein (z. Zt. $d = 22 \text{ mm}$). Somit kann dieser Ansatz als auf der sicheren Seite liegend angenommen werden.

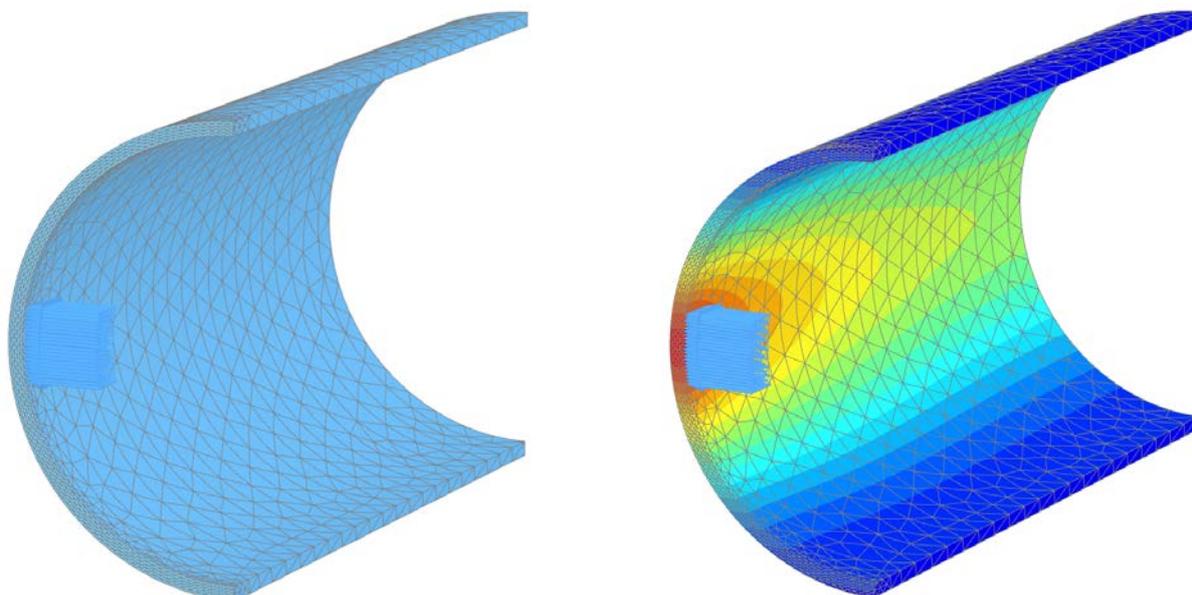


Bild 8 3D-Modell eines DN 300 mit 10 mm Wanddicke (blau) und Lasteinleitung im Kämpfer (Pfeile)

Tabelle 1 Berechnete Deformationen Δd in [mm] und Ringspalt w_s in [%]

DN 300			DN 600		
t	Δd	w_s	t	Δd	w_s
[mm]	[mm]	[%] von r	[mm]	[mm]	[%] von r
4	7,17	4,78	4	12,32	4,11
6	2,93	1,95	6	7,21	2,40
8	1,44	0,96	8	4,40	1,47
10	0,82	0,55	10	2,77	0,92

Die Ergebnisse der Berechnungen in Tabelle 1 zeigen, dass mit den gewählten Ansätzen und einer Kraft von $F = 4.000 \text{ N}$ die Aufweitung eines Rohres um $w_s = 0,5 \%$ möglich ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die effektive Lasteinleitung in der Realität auf einer viel kleineren Fläche stattfinden wird. Auch der Einbau des theoretisch angesetzten Liners für den ungünstigsten Fall bei DN 300 und $t = 10 \text{ mm}$ Wanddicke entspricht nicht der Realität und dürfte bei diesen Materialkennwerten eher im Bereich von ca. $t = 2 \text{ mm}$ liegen. Das Erreichen einer Überdrückung des Ringspalts für alle möglichen Linerkombinationen und Rohrdurchmesser sollte daher mit der verwendeten Kraft von $F = 4.000 \text{ N}$ gegeben sein. Hierin inbegriffen sind ggfs. Reserven, um auch größere Ringspalte überbrücken zu können, die 50 % größer sind als die ursprüngliche Annahme aus der Statik. Für die Untersuchung von neuerlegten Rohren ist nach Überschlagsberechnungen eine Kraft von maximal 10.000 N ausreichend.

Der minimal sicher zu erfassende Ringspalt beträgt 0,5 % des Rohrradius. Dies entspricht bei der Nennweite DN 300 einem Absolutmaß von 0,75 mm (750 μm). Für den vorliegenden Einsatzzweck ist demnach eine Genauigkeit der Wegmessung von $\pm 1 \mu\text{m}$ ausreichend.

Nach den Ansätzen der Statik für Klasse-B-Liner gemäß DIN EN ISO 11295 sollten diese Produkte grundsätzlich in der Lage sein unter Innendruck eine zulässige Dehnung aufzunehmen, die den Ringspalt überbrücken kann, um sich dann am Altrohr abzustützen. Daher sollten sämtliche mit dem Mikro-MAC getesteten Liner in der Lage sein, den Prozess der Aufweitung schadlos zu überstehen. Jedoch kann die lokale Krafteinleitung bei Mikro-MAC sowie ein möglicherweise vergrößerter Ringspalt zu Dehnungen jenseits der zulässigen Grenzen führen, die zudem bei jedem Material unterschiedlich sind. Daher wird grundsätzlich vor jedem Einsatz eine entsprechende dreidimensionale FE-Berechnung hinsichtlich der zu erwartenden Dehnungen des Materials durchgeführt, um sicherzustellen, dass sich diese ausschließlich im linear elastischen Bereich des Materials befindet. Um jegliche Beschädigung des zu testenden Liners im Vorfeld auszuschließen, werden zudem entsprechende Kraft und Weggrenzen bei der Prüfung eingeführt.

Die aus diesen Überlegungen folgenden Randbedingungen für die Konstruktion des Micro-MAC können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Minimaler Rohrinne Durchmesser:	270 mm
Maximaler Rohrinne Durchmesser:	800 mm
Prüfkraftbereich:	0 – 10.000 N
Prüfwegbereich:	0 – 6 mm
Arbeitsweg:	> 40 mm
Genauigkeit Wegmessung:	< 1 %
Genauigkeit Kraftmessung:	< 1 %
Weggrenze:	1,5 x Ringraum laut Statik
Kraftgrenze:	1,5 x Rechenwert der Kraft zur Überwindung des Ringraums laut Statik

4.3 Konstruktion und Bau der Prüfeinrichtung

Auf Basis der in Abschnitt 4.2 erarbeiteten Konstruktionseckdaten wurde eine Prüfeinrichtung entwickelt, welche folgende Spezifikationen besitzt:

- Antriebsart:** Die Kraft wird mit einem Hydraulikzylinder auf die Rohrwand aufgebracht. Dieser Hydraulikzylinder wird durch ein Minihydraulikaggregat mit integrierten Automatikventilen angetrieben und kann sowohl im Zug- als auch im Druckbetrieb laufen.
- Stromversorgung:** Die Stromversorgung des Micro-MAC erfolgt über einen 12V/10Ah Lithiumakku.
- Datenübertragung:** Die Datenübertragung zum Bediengerät kann wahlweise drahtlos mit dem ESPNow-Protokoll (ein Protokoll von Espressif, ähnlich dem Zigbee-Protokoll) oder für Durchmesser < 400 mm drahtgebunden erfolgen. Physikalisch entspricht die drahtgebundene Übertragung dem RS485 Standard, logisch wird ein eigenes ASCII-Protokoll verwendet.
- Messgenauigkeiten:** Die Genauigkeit des Wegaufnehmers wurde im eingebauten Zustand mit einer Zweipunktkalibrierung überprüft. Die maximale Abweichung beträgt -0,64% vom Messwert.
Die Kraftmessung erfolgt mit 2 Drucksensoren (Genauigkeit 0,1%, jeweils ein Sensor oberer Kolbenraum und unterer Kolbenraum). Die Kalibrierung der Kraft erfolgte an einer Klasse 1 Prüfmaschine.
- Grenzwerte:** Es können im Micro-MAC Zylinder unterschiedlicher Hublänge und Kolbenfläche eingesetzt werden, welche den maximalen Weg und die maximale Kraft bestimmen. Standardmäßig wird ein Zylinder mit maximal 100 mm Weg und 12 kN Kraft eingesetzt.
- Bedienung:** Die Bedienung erfolgt mit einem Windows Industrie Tablet für raue Umgebung, mit einer Schutzklasse IP65. Auf diesem Tablet arbeitet ein Programm über das die Bedienung des µMac erfolgt.
- Positionierung:** Die Positionierung im Kanal erfolgt über zwei Schiebestangen, über welche sowohl die Längsposition als auch die Verrollung kontrolliert werden kann. Die Ausrichtung des Micro-MAC im Kanal wird über einen 3D-Lagesensor überwacht.

Bild 9 zeigt die Kalibrierung des Kraftsensors in einer Prüfmaschine des IKT und Bild 10 den ersten Einsatz in einem Kunststoffrohrabschnitt.

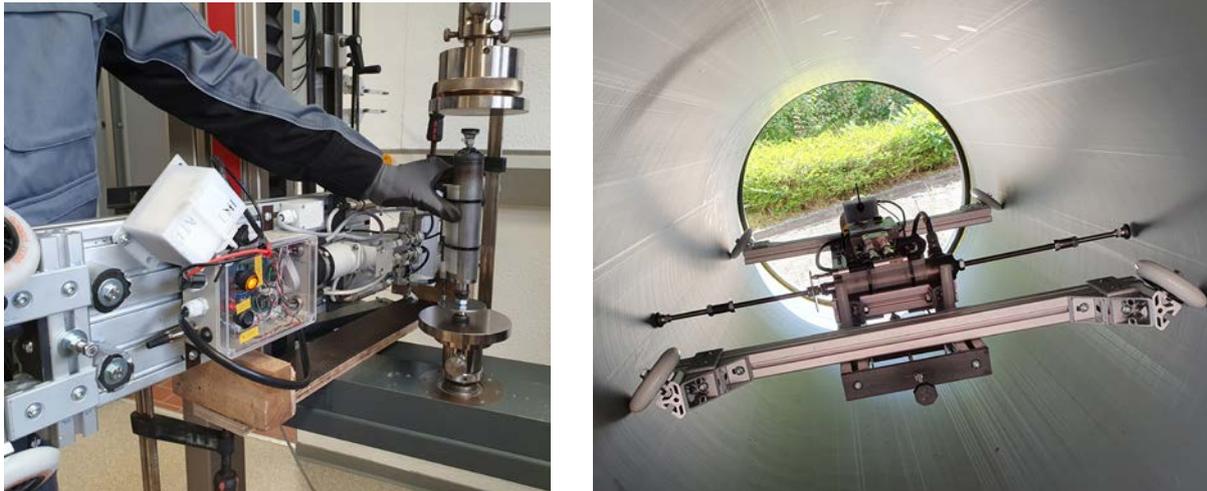


Bild 9 Kalibrierung des Kraftmesssystems in einer Präzisionsprüfmaschine des IKT (links) und Erste Testläufe in einem Kunststoffrohr (rechts)

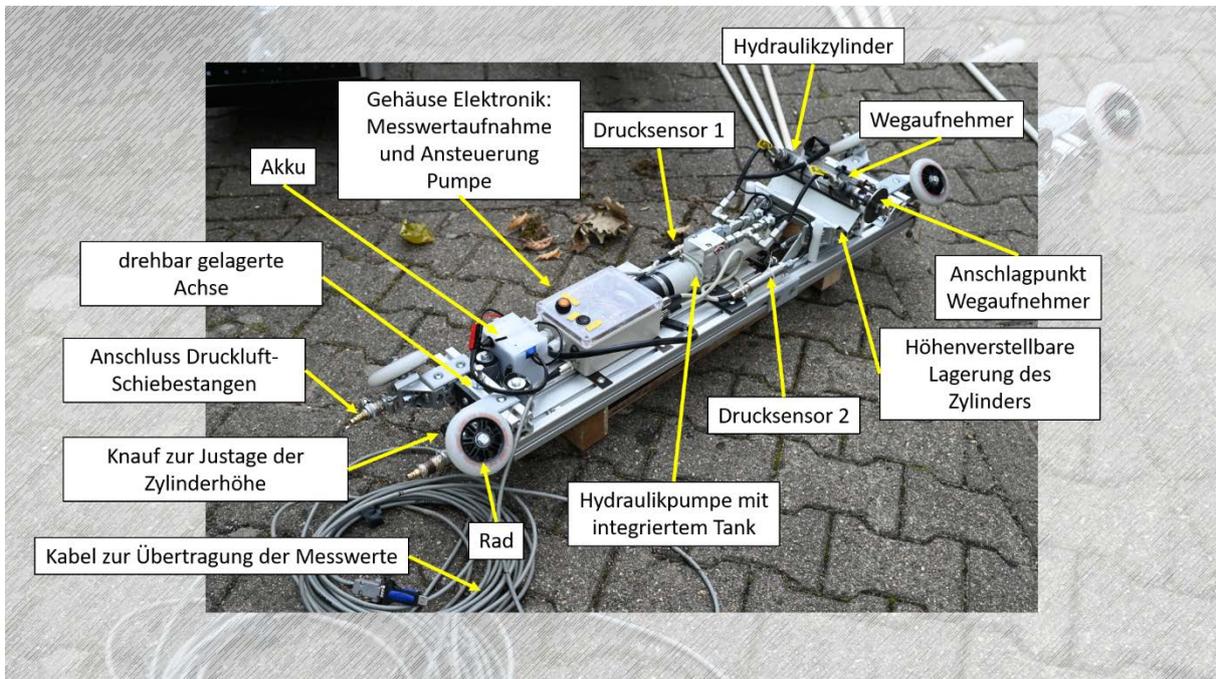


Bild 10 MAC-Prüfeinrichtung - Komponenten

4.4 Gefährdungsbeurteilung

4.4.1 Grundlagen

Eine Gefährdungsbeurteilung ist grundsätzlich vor Aufnahme von Tätigkeiten durchzuführen. Bei Änderungen der Arbeitsbedingungen sowie bei den weiteren in § 8 BioStoffV genannten Anlässen ist die Gefährdungsbeurteilung zu aktualisieren. Eine erneute Gefährdungsbeurteilung ist auch notwendig, wenn dem Arbeitgeber Erkrankungen bei Beschäftigten bekannt werden, die auf entsprechende Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen zurückzuführen sein können. Bei der Zusammenarbeit

mehrerer Unternehmen sind diese auch zur Zusammenarbeit bei der Gefährdungsbeurteilung verpflichtet (§ 8 ArbSchG).

Wartungs- und Reinigungsarbeiten sowie Überwachungstätigkeiten sind auch Gegenstand der Gefährdungsbeurteilung. Dazu sind die Häufigkeit der Arbeiten, die erforderlichen Tätigkeiten und die Expositionszeiten zu berücksichtigen.

Bei der Beschaffung von Informationen für die Gefährdungsbeurteilung sind neben den zu erwartenden biologischen Arbeitsstoffen sowie Ausmaß und Dauer der Exposition, weitere Sachverhalte zu ermitteln, z.B.

- die mit ihnen verbundenen Übertragungswege und Aufnahmewege (z.B. über Schmierinfektion oder das Einatmen),
- die Art der Tätigkeit (z.B. Bau-, Wartungs- oder Reinigungsarbeiten),
- die Dauer der Tätigkeit (z.B. kurzzeitige, wechselnde oder ganztägige Tätigkeiten),
- die Häufigkeit der Tätigkeit (z.B. nicht arbeitstäglich),
- anlagen-, maschinen- und fahrzeugspezifische Faktoren (z.B. Art der baulichen Gestaltung, Lüftungstechnische Maßnahmen),
- weitere spezifische Faktoren (z.B. spitze und scharfe Gegenstände).

Bei der Gefährdungsbeurteilung sind auch Informationen über bekannte tätigkeitsbezogene Erkrankungen von Beschäftigten bei vergleichbaren Tätigkeiten zu berücksichtigen. Dabei ist auch auf sensibilisierende und toxische Wirkungen zu achten.

Der Einsatz von mobilen Maschinen und Arbeitsgeräten ist in die Gefährdungsbeurteilung einzubeziehen. Es sind mögliche Gefährdungen für Beschäftigte zu berücksichtigen, die z.B. durch Verschleppung biologischer Arbeitsstoffe auch über die Kleidung entstehen können.

Hauptaugenmerk gebührt der oralen Aufnahme auf Grund von Hand-Mund-Kontakten (Schmierinfektion). Die inhalative Aufnahme von Aerosolen erfolgt vor allem bei Hochdruckspül- und Saugverfahren, über Belebungsbecken, durch Dunstbildung über Klärbecken und bei Arbeiten mit Hochdruckreinigern.

Eine besondere Gefährdung besteht beim Sturz ins Abwasser, da in diesem Fall eine Aufnahme biologischer Arbeitsstoffe sowohl oral, inhalativ als auch über die Haut, hier insbesondere über verletzte Hautpartien, erfolgt.

An besonderen Orten der Abwasserableitung und Aufbereitung wie z.B. Sinkkästen oder Rechen kann auch Verletzungsgefahr durch gebrauchte Kanülen auftreten.

Grundlagen der Gefährdungsbeurteilung sind der Abschnitt D der BGR 104 und die Beispielsammlung „Explosionsschutzmaßnahmen bei der Arbeit im Bereich von abwassertechnischen Anlagen“, GUV-I 8594 bzw. BGI 8594.

Die üblicherweise für den Explosionsschutz relevanten Bereiche abwassertechnischer Anlagen sind dort aufgeführt. Die Beispielsammlung ist nicht abschließend; ggf. müssen dort enthaltene Beispiele auf andere Anlagenteile übertragen werden, z.B. kön-

nen nicht abgedeckte Schneckenhebwerke je nach Bauform beispielsweise als Anlagenteile im Freien (Lfd.-Nr. 2.4 der Beispielsammlung) oder als tiefe offene Kanäle (Lfd.-Nr. 1.2 eingestuft werden.

Zur Bestimmung von Zonen explosionsgefährdeter Bereiche können auch die Nummern 1-3 der Beispielsammlung zur BGR 104 herangezogen, in denen brennbare Gase, Dämpfe und Stäube allgemein betrachtet werden.

Die grundsätzliche vorgehensweise bei der Gefährdungsbeurteilung zeigt das nachfolgende Bild 11.

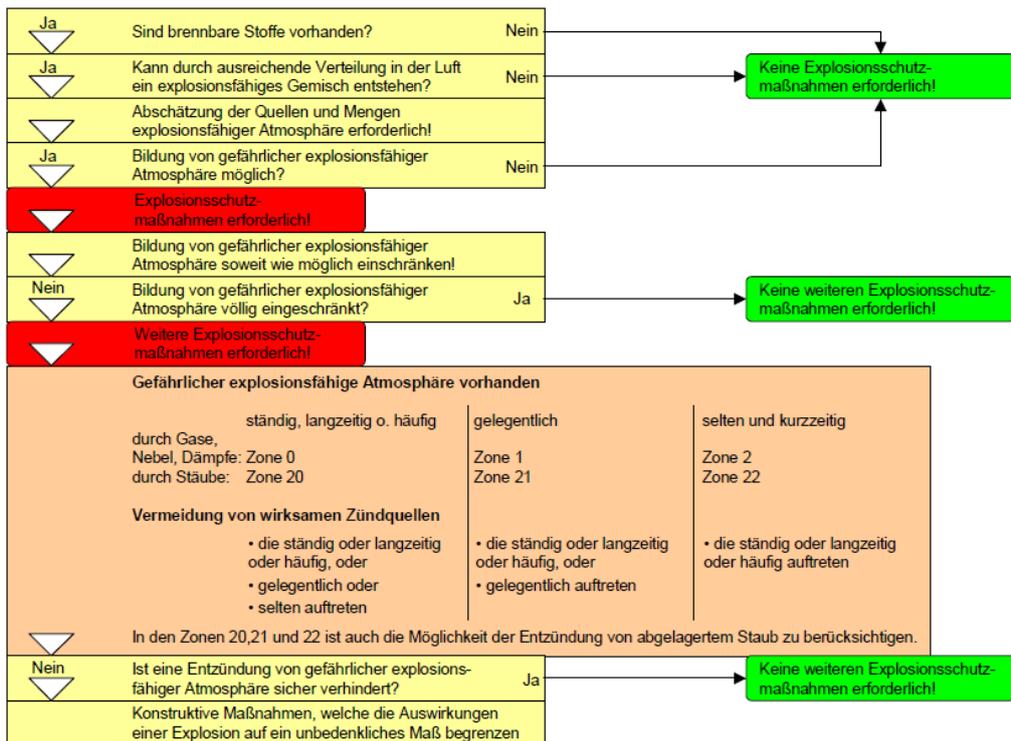


Bild 11 Ablaufschema zur Beurteilung der Explosionsgefährdung und Festlegung von Schutzmaßnahmen [17]

Grundsätzlich hat die Vermeidung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre (Primärer Explosionsschutz; Schutzmaßnahmen nach E 1) Vorrang vor der Vermeidung von Zündquellen (Sekundärer Explosionsschutz; Schutzmaßnahmen nach E 2) und ggf. ergänzendem konstruktivem Explosionsschutz (Schutzmaßnahmen nach E 3).

Die Frage, ob die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre möglich ist, kann nicht pauschal anhand der Beispielsammlung beantwortet werden. Hier ist immer der Einzelfall zu betrachten [17].

Normalbetrieb

Die Gefährdungsbeurteilung für den Normalbetrieb stellt die hauptsächliche Basisbeurteilung dar. Für die Gefährdungen im Normalbetrieb werden auch die Schutzmaßnahmen formuliert. Besondere Betriebszustände, z.B. Ausfall von lufttechnischen An-

lagen oder kurzzeitige Nutzungsänderung von Anlagenteilen (Zwischenlagerung von Klärschlamm etc.) erfordern eine einzelfallbezogene Beurteilung [17].

Abweichungen vom Normalbetrieb

Änderungen der Betriebsweise, In- und Außerbetriebsnahmen oder Betriebsstörungen sind, wie sie sich aus der Planung und Anlagendokumentation für die Betriebs-, Mess-, Regel- und Steuerabläufe ergeben, gesondert zu betrachten. Die Vielzahl möglicher Szenarien macht eine Berücksichtigung im Rahmen des Explosionsschutzdokuments schwierig. Von besonderer Bedeutung sind organisatorische Schutzmaßnahmen mit klarer Zuweisung von Zuständigkeiten, um in derartigen Einzelfällen mit der erforderlichen Sachkompetenz reagieren zu können. Die organisatorischen Schutzmaßnahmen finden sich insbesondere in den „schriftlichen Anweisungen“ im Sinne des Anhangs 4 zur BetrSichV wieder. Sie werden i. d. R. in Form von Betriebs- oder Arbeitsanweisungen erteilt [17].

Sicherheitstechnische Kenngrößen

Eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung der Explosionsgefährdungen sind die stoffspezifischen sicherheitstechnischen Kennwerte. Obwohl jede Beurteilung eine Einzelfallbetrachtung erfordert, kann auf kommunalen abwassertechnischen Anlagen von den im Folgenden aufgeführten Stoffen ausgegangen werden. Das Vorkommen der Stoffe richtet sich nach der eingesetzten Verfahrenstechnik.

Industrielle Kläranlagen mit anderen für den Explosionsschutz relevanten Stoffen oder Abwässern erfordern eine besondere Betrachtung auf Basis der jeweils eingesetzten Stoffe und ihrer sicherheitstechnischen Kennwerte. Dies kann gleichermaßen für kommunale Kläranlagen mit hohem Anteil industrieller Einleitungen entsprechender Stoffe oder Abwässer gelten, sofern die enthaltenen Stoffe von Relevanz für den Explosionsschutz sind.

Die Stoffdaten wurden sorgfältig zusammengestellt. Dennoch kann keine Haftung, gleich aus welchem Rechtsgrund übernommen werden [17].

Tabelle 2 Sicherheitstechnische Kennwerte relevanter Stoffe [17]

	Explosionsgrenzen in Luft [Vol.-%]	Zündtemperatur [°C]	Relative Dichte (Luft=1)	Flammpunkt [°C]	Temperaturklasse	Explosionsgruppe	Max. Expl.-druck [bar]
Faulgas	70% CH ₄ 30% CO ₂	4,4 – 14,0	> 595	0,85		T 1	IIA
	60% CH ₄ 40% CO ₂	4,5 – 12,9	> 595	0,95		T 1	IIA
Methan		4,4 – 17,0	595	0,55		T 1	IIA
Methanol-Lösung	> 10%	6 – 50	> 440		42 – 54	T 1	IIA
	> 55%	6 – 50	> 440		9 – 21	T 1	IIA
Ethanol-Lösung	> 10%	3,1 – 27,7	> 400		21 – 45	T 2	IIB
	> 70%	3,1 – 27,7	> 400		< 21	T 2	IIB
Flüssiggase	Butan	1,4 – 9,4	365	2,11	-60	T 2	IIA
	Propan	1,7 – 10,9	450	1,55	-104	T 1	IIA
Otto-Kraftstoff		0,6 – 8	220 - 260	3,2 (Dampfphase)	< -20	T 3	IIA

4.4.2 Gefährdungsbeurteilung Micro-MAC-Prüfeinrichtung

Durch geeignete Maßnahmen müssen sowohl die Mitarbeiter vor Ort als auch Nachbargewerke geschützt werden. Grundsätzlich kommen bei Gefährdungen durch biologische Arbeitsstoffe der intensiven persönlichen Hygiene sowie der Arbeitsplatzhygiene eine große Bedeutung zu.

Die Arbeiten sind so zu gestalten, dass von den biologischen Arbeitsstoffen möglichst keine Gefährdungen ausgehen. Ggf. sind, z.B. beim Einsatz von Anreicherungskulturen, biologische Arbeitsstoffe mit geringerem Gefährdungspotenzial auszuwählen. Insbesondere ist dafür zu sorgen, dass Arbeitsverfahren sowie Maschinen und Geräte so ausgestattet und beschaffen sind, dass diese Forderung eingehalten wird.

Dies wird durch die Verwendung geeigneter Schutzmaßnahmen nach der Gefährdungsbeurteilung umgesetzt. Insbesondere sind geeignete technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen festzulegen und zu ergreifen.

Die Gegenmaßnahmen um Gefahrenquellen im Umgang mit der MAC-Prüfeinrichtung oder der MAC-Prüfeinrichtung selbst, sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 Gegenmaßnahmen zur Gefährdung im Umgang mit dem MAC-Prüfsystem

Ursache	Gefahrenquelle	Gegenmaßnahme
Elektrischer Motor der Hydraulikpumpe	Funken	Kapseln
Motor entwickelt bei zu dauerhafter Zylinderfahrt Oberflächentemperatur von ca. 50-60°C	Heiße Oberfläche	Kurze Prüfzyklen
Starter Relais des Motors öffnet und schließt häufig bei kurzen Prüfzyklen	Elektrische Anlagen	Kapseln
Sauerstoffmangel, Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid	-	Lüften / Freimessen
Explosionsgefährliche Umgebung	Gasbildung	Lüften / Freimessen
Herunterfallendes Werkzeug / enges Arbeitsumfeld	Quetschungen an Hand und Fuß	Persönliche Schutzausrüstung

Bei einer Untersuchung mit dem MAC-Verfahren müssen Personen Zugang zum Kanal haben. Diese Kanalbegehung besitzt eine Vielzahl von Gefahren für das Personal, die in den berufsgenossenschaftlichen Regeln 236: Rohrleitungsbau [18] zusammengefasst sind und gegen die das eingesetzte Personal geschützt werden muss. Unter anderem bestehen diese Gefahren bei der Kanalbegehung aus:

- Gase oder Dämpfe, durch die Brände oder Explosionen entstehen können.
- Sauerstoffmangel, der zum Erstickten führen kann.
- Giftige gesundheitsschädliche Stoffe, die berührt durch die Haut und den Mund aufgenommen oder eingeatmet werden können
- Ertrinken durch Einsetzen stärkerer Wasserführung, z. B. infolge starken Regens
- Infektionen durch Bakterien oder Lebewesen und deren Stoffwechselprodukte sowie Verschmutzungen
- Absturzgefahren durch z. B. offene Schächte oder fehlende Steigeisen

Aus diesem Grund sind bei der Prüfung mit der Micro-MAC-Prüfeinrichtung alle Arbeitsschutzmaßnahmen zu ergreifen, die auch bei einer routinemäßigen Kanalbegehung durch Personal erforderlich sind. Hierzu zählen vor allem die persönliche Schutzausrüstung (PSA), die oberirdische Sicherung des Kanaleinstieges und die unterirdische Sicherung des Personals [19].

Der Einsatz des Micro-MAC-Gerätes ist jedoch auf den Zeitraum direkt nach dem Neubau, der Sanierung und vor Wiederinbetriebnahme beschränkt. Hierdurch kann eine Gefährdung durch Gasbildung infolge Abwasserbelastung in der Regel ausgeschlossen werden. Grundsätzlich ist jedoch der Arbeitsraum im Schacht mit geprüften Gaswarngeräten freizumessen und im Einzelfall kann eine zusätzliche Belüftung in Betracht gezogen werden.

4.5 Bedienung und Manual

Vor dem Einsatz des Micro-MAC´s muss zunächst festgelegt werden, welcher Rohrquerschnitt durchfahren und geprüft werden soll. Dementsprechend werden dann die passenden Achsen und Zylinderaufsätze eingebaut. Für die Daten- und Befehlsübertragung kann zwischen drahtgebundener und drahtloser Kommunikation gewählt werden. Bei Nennweiten größer als DN 400 bietet sich die drahtlose Kommunikation an. Dann wird der Schalter am Micro-MAC auf „Drahtlos“ geschaltet und der Dongle am PC angeschlossen. Die Datenübertragung funktioniert dann über das ESP-NOW Protokoll. Für die drahtgebundene Kommunikation (\leq DN 400) wird der Schalter am Micro-MAC auf „Drahtgebunden“ umgelegt und das Kabel an das Micro-MAC und an den PC angeschlossen. Hier wird über eine RS 485 Schnittstelle kommuniziert. Um das Micro-MAC einzuschalten, wird zunächst der Akku angeschlossen und dann der Ein/Aus-Schalter auf „Ein“ geschaltet. Nun kann das LabView-Programm gestartet werden. Zunächst wird die Übertragungsart eingestellt, der entsprechende COM-Port ausgewählt und die Verbindung zum Gerät aufgebaut. Ist die Verbindung gelungen, blinkt die virtuelle LED „Ack“ alle 5 Sekunden. Soll mitgespeichert werden, kann nun ein Dateipfad ausgewählt und aktiviert werden.

Über die Anzeige des Lagesensors kann beurteilt werden, ob das Gerät waagrecht im Rohr steht. Ist dies nicht der Fall, so kann über die lenkbare Achse mithilfe von Schiebestangen solange rangiert werden, bis dies der Fall ist. Die Lage sollte vor jeder Prüfung kontrolliert werden. Über die Höhenverstellung des Zylinders kann dieser so eingestellt werden, dass die Kraft im Bereich der Kämpfer eingeleitet wird. Dies ist nur direkt am Gerät möglich und sollte vor der ersten Prüfung erfolgen. Wurde das Micro-MAC wie beschrieben positioniert, kann die Prüfung starten.

Dazu werden vorher Kraft- bzw. Weggrenzen definiert und eingetragen, die nicht überschritten werden sollen. Bei Erreichen dieser Werte wird die Prüfung beendet und der Zylinder nicht weiter ausgefahren. Zudem wird eine Vorkraft definiert, die anzeigt, dass der Zylinder an die Rohrwandung angefahren ist. Auch die Prüfungsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der der Zylinder ausfährt, wird festgelegt. Wird nun der Button „Prüfung Start“ betätigt, fährt der Zylinder bis zum Erreichen der Vorkraft aus. Nun wird automatisch das Speichern eingeschaltet und der Zylinderweg genullt. Der Zylinder drückt nun in die Rohrwandung, bis entweder Kraft- oder Weggrenze erreicht sind. Danach wird die Prüfung beendet und der Zylinder muss im Handbetrieb zurückgefahren werden. Es empfehlen sich etwa 3 Wiederholungsprüfungen pro zu prüfende Stelle. Mithilfe der Schiebestangen wird das μ MAC an die nächste Stelle geschoben und ausgerichtet. Da die Stangen je 1 m lang sind, kann die Position im Rohr durch abzählen der verbauten Stangen recht leicht ermittelt und bestimmt werden.

Bild 12, Bild 13 und Bild 14 zeigen die Bedienmaske der Gerätesteuerung mit Angaben zu den jeweiligen Bedienelementen und deren Funktion.

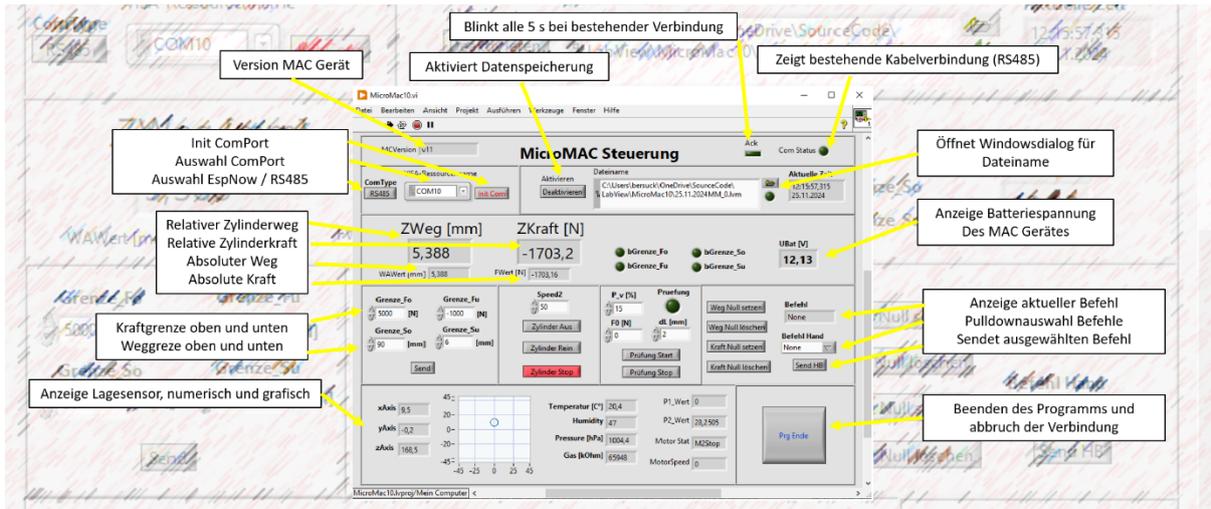


Bild 12 Bezeichnungen der Bedienmaske – Teil 1

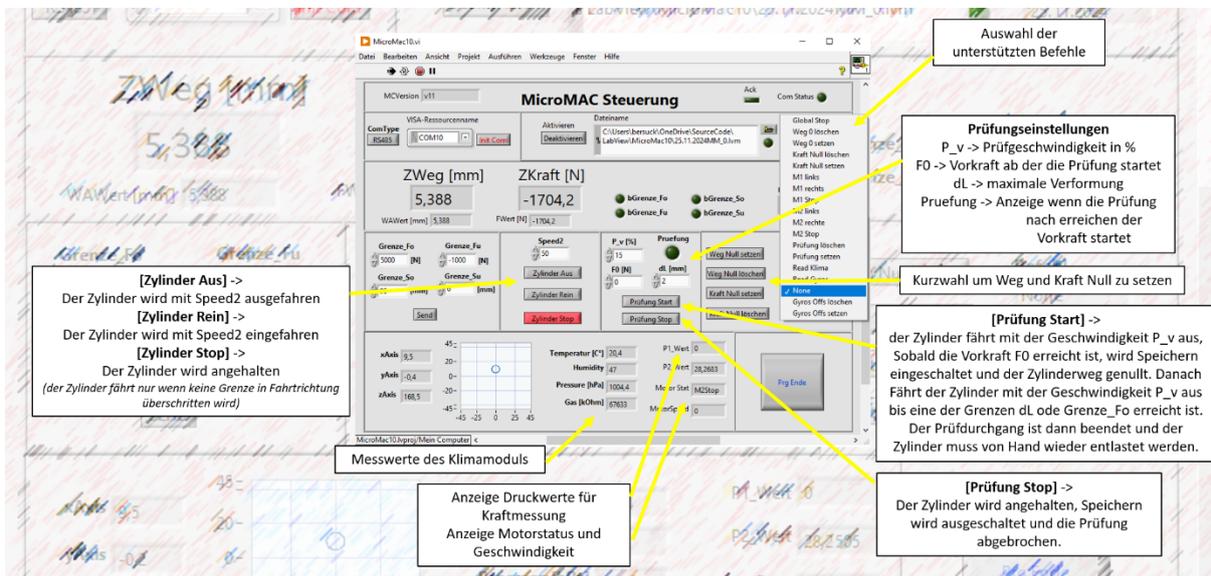


Bild 13 Bezeichnungen der Bedienmaske – Teil 2



Bild 14 Bezeichnungen der Bedienmaske – Teil 3

5 Inbetriebnahme, Praxiseinsätze und Auswertekonzept

5.1 Überblick

Das neu entwickelte Prüfsystem konnte in einem IKT-Testkanal und in situ in realen Kanalnetzen getestet werden. Es zeigte sich, dass diese Testeinsätze wichtige Erkenntnisse zu konstruktiven Details und zum Handling in der Praxis lieferten.

Darüber hinaus konnten mit den gewonnenen Messdaten Konzepte für die Auswertung mit wesentlichen Erkenntnissen bezüglich der Qualität der durchgeführten Baumaßnahmen bzw. Schlauchlinersanierungen entwickelt werden.

5.2 Versuchsstrecke IKT

Zunächst wurde der entwickelte Prototyp auf dem IKT-Versuchsgelände einem ersten Praxistest unterzogen (Bild 15, Bild 16). Ziel dieser ersten Untersuchungen war der Nachweis der Eignung der entwickelten Prüfeinrichtung zum Nachweis der Qualität von neuerlegten biegeweichen Kanalrohren.

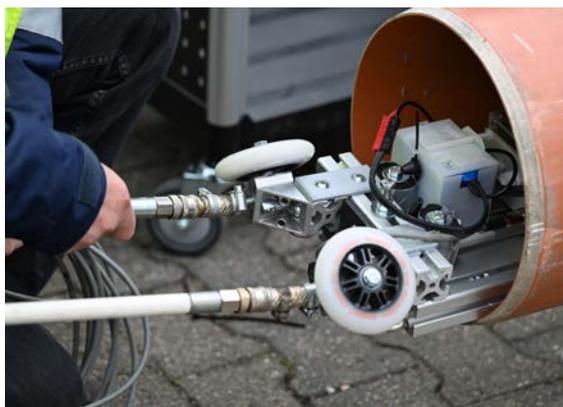


Bild 15 Einsatz des Micro-MAC in der IKT-Versuchsstrecke DN 300: Positionieren des Micro-MAC (links) und Anfahren der Prüfstellen (rechts)



Bild 16 Einsatz des Micro-MAC in der IKT-Versuchsstrecke DN 300: Prüfposition im Rohr (links) und Anfahren der Prüfstellen mit Schiebbestangen (rechts)

Zu diesem Zweck wurde eine Prüfstrecke aus PVC-Rohren der Nennweite DN 300 auf einer Länge von über 20 m aufgebaut und punktuell mit unterschiedlichen steifigkeitsverändernden Einbauten versehen.

Hierbei handelte es sich um eine Schraubzwinge zur punktuellen Maximierung der Steifigkeit (Bild 17), eine Übergangsmanschette zur Schaffung eines flexiblen Übergangs (Bild 17, Mitte) und eine Standardrohrverbindung (Bild 17, rechts).

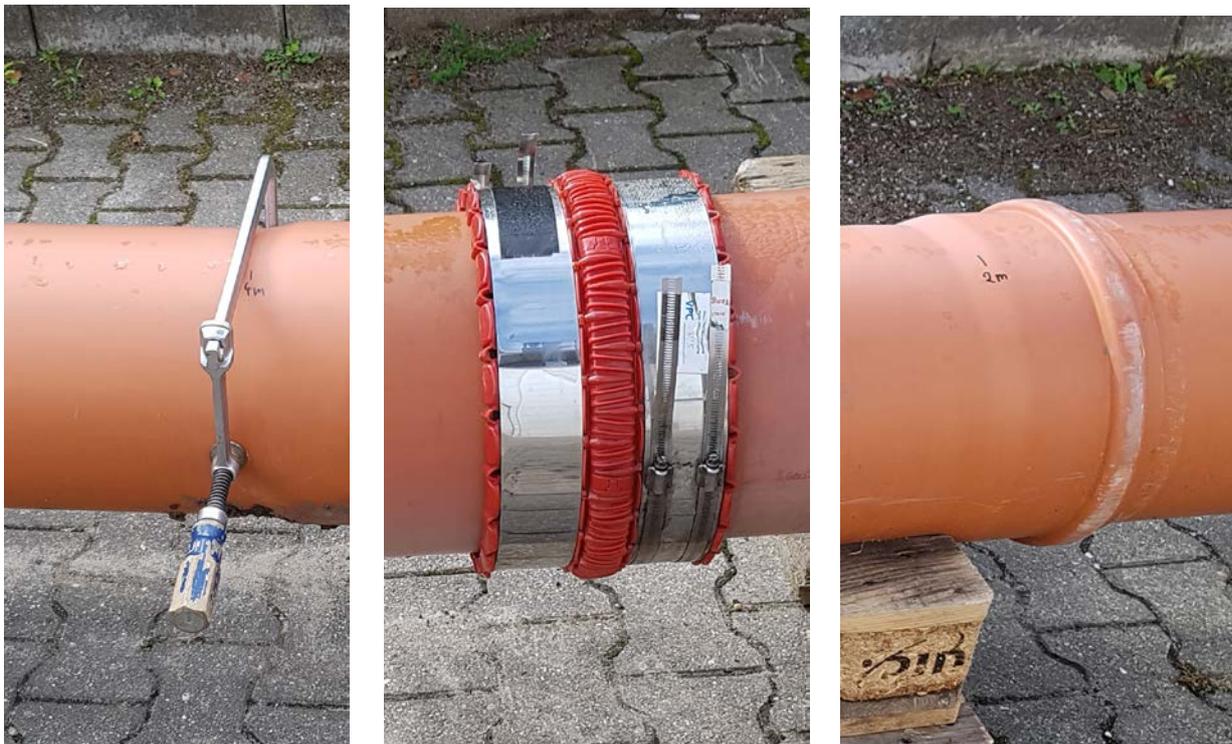


Bild 17 Untersuchte Sonderzustände: Schraubzwinge (links), elastische Überschiebkupplung (Mitte) und normale Rohrverbindung (rechts)

Die Auswertung der gewonnenen Messdaten und das dazugehörige Auswertekonzept werden in Abschnitt 5.5.1 erläutert.

5.3 Schlauchlinersanierung DN 600

Ein weiterer Testeinsatz wurde in einem linersanierten Betonkanal der Nennweite DN 600 durchgeführt (Bild 18). Für diesen Kanal lagen die Ergebnisse der durchgeführten Qualitätssicherungsprüfungen an Linerproben vor. Hieraus ging hervor, dass der Kanal mit einem NF-Liner saniert wurde, der eine Wanddicke von ca. 9 mm aufweist.



Bild 18 Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 600:
Schachteinstieg (links) und
Blick in das Schachtbauwerk (rechts)



Bild 19 Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 600:
Micro-MAC am Haltungsanfang mit Linerendmanschette (links) und
Blick in die sanierte Haltung mit Micro-MAC und Schiebestangen (rechts)

Das Micro-MAC konnte problemlos in den Schacht herabgelassen und im Rohr positioniert werden. Das Anfahren der Prüfpositionen wurde mit den zwei Schiebestangen realisiert (Bild 19). Problemlos konnte das Prüfgerät ca. 30 m in die Haltung geschoben werden. An verschiedenen Punkten wurden Messungen durchgeführt.

Die Auswertung der gewonnenen Messdaten und das dazugehörige Auswertekonzept werden in Abschnitt 5.5.2 erläutert.

5.4 Schlauchlinersanierung DN 300

Ein weiterer Testeinsatz wurde in einem linersanierten Betonkanal der Nennweite DN 300 durchgeführt (Bild 20). Für diesen Kanal lagen die Ergebnisse der durchgeführten Qualitätssicherungsprüfungen an Linerproben vor. Hieraus ging hervor, dass der Kanal mit einem GFK-Liner saniert wurde, der eine Wanddicke von ca. 5 mm aufweist. Unter Berücksichtigung der Altrohrdeformationen und Ringraumgrößen müsste der Restdurchmesser bei etwa 280 mm liegen und somit den Einsatz des Micro-MAC ermöglichen.



Bild 20 Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 300:
*Schachteinstieg (links) und
beengte Verhältnisse im Schachtbauwerk (rechts)*

Bei der Installation des Micro-MAC stellte sich jedoch heraus, dass die Zugangsöffnung mit gerade einmal 25 cm zu klein für den Einsatz des Systems war (Bild 21).



Bild 21 Einsatz des Micro-MAC im Kanal DN 300:
*Probleme bei der Einfahrt in den sanierten Kanal (links) und
Vermessung der verbliebenen Zugangsöffnung (rechts)*

Weitere Maßnahmen, wie zum Beispiel die Demontage der vorderen Räder oder die Kürzung der Laststempel reichten nicht für einen erfolgreichen Einsatz aus. Der Grund hierfür lag an der Schachteinbindung des Schlauchliners. Hier wurde keine Liner-Endmanschette eingesetzt, sondern es wurde ein Handlaminat appliziert. Leider erfolgte dies in einer sehr großen Dicke, wodurch lediglich 25 cm als Öffnung verblieben. Demzufolge musste der Einsatz des Micro-MAC hier leider abgebrochen werden.

Für künftige Einsätze bleibt die Erkenntnis, dass bei der unteren Grenznennweite (DN 300) für den Einsatz des Prüfsystems eine lichte Weite von ca. 280 mm zu Verfügung stehen muss. Entweder ist also die Schachtanbindung entsprechend auszubilden, oder die Prüfung des Schlauchliners ist vor der Schachtanbindung durchzuführen. Grundsätzlich ist der Einsatz in dieser Nennweite möglich.

5.5 Auswertekonzepte

5.5.1 Messwertanalyse Kunststoffrohr (Neubau)

Ein Einsatzgebiet für das Mikro-MAC ist die Überprüfung des korrekten Einbaus und der Bettung von Kunststoffrohren. Diese sind industriell gefertigt und könnten im Rahmen der FE-Vorbereitung und Kalibrierung des Systems aus der Messung isoliert werden, um somit mit den Berechnungsansätzen des „normalen“ MAC-Systems die Bettungssteifigkeit des umgebenen Bodens zu überprüfen.

Um die korrekte Funktion des Geräts unter quasi-realen Bedingungen testen zu können, bei denen jedoch die Randbedingungen (Geometrie und E-Modul) als bekannt vorausgesetzt werden konnten, wurden im IKT Messungen in einem Kunststoffrohr DN 300 (315 mm OD) mit einer nominalen Wanddicke von $t = 7,7$ mm aus PVC-U durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.2). Da die Nennwanddicke lediglich einen Mindestwert darstellt, der einzuhalten ist, wurde die reale Wanddicke durch Nachmessen jeweils am Spitzende eines jeden Rohres an mehreren Stellen mit einer elektronischen Schieblehre überprüft. Sie variierte zwischen ca. 8,0 mm und ca. 8,6 mm. Der Kurzzeit-E-Modul wurde aus Erfahrungswerten mit $E = 3.200$ N/mm² angesetzt.

Es wurden insgesamt 13 Messungen an verschiedenen Stellen der Leitung durchgeführt, die aus mehreren zusammengesteckten Einzelrohren mit Glocke-Muffe-System bestand. Die Messungen selbst hätten auch an einem Rohr durchgeführt werden können. Es sollte jedoch auch die Fähigkeit des Systems getestet werden, mehrere Meter weit in einer Haltung ohne direkten externen Zugriff zu navigieren. Das Steuern der Lage des Geräts war dabei nur über die Kopplungsstangen möglich. Ohne diesen externen Eingriff würde das Gerät aufgrund von kleinen Unregelmäßigkeiten im Kanal oder Ablagerungen bereits nach kurzer Strecke beginnen, die Wände an einer Seite hinauf zu fahren und zu kippen.

Messergebnisse

Die Messungen mit den ungeraden Nummern fanden jeweils in der Mitte eines Rohrsegmentes statt. Die Messungen mit den geraden Nummern fanden ca. 20 cm vor der Rohrverbindung an der Muffen-Glockenende statt. Im Bereich der Überschiebmuffe lag der Messpunkt 12 ca. 20 cm hinter der Verbindungsstelle. Die einzel-

nen Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Messwerte der Steifigkeit schwankten im Bereich zwischen 340,3 N/mm und 418,0 N/mm um einen Mittelwert von 385,6 N/mm. Die Schwankungsbandbreite betrug somit ca. 20 % (von -12 % bis +8 %). Vergleichende dreidimensionale FE-Berechnungen zeigten, dass die Variation der Rohrsteifigkeit aufgrund der Schwankungen der Wanddicke zwischen $t = 8,0$ mm und $t = 8,6$ mm zwischen ca. $K = 350$ N/mm und $K = 400$ N/mm und somit in der gleichen Größenordnung liegen. Ein Einfluss der Messposition innerhalb des Rohres auf die Ergebnisse ließ sich aus den Ergebnissen nicht erkennen, obwohl bei der Messung am Rand eines Rohrsegmentes analog zu den Ergebnissen bei biegesteifen Rohren zunächst kleinere Steifigkeiten erwartet wurden. Sollte eine Messung an diesen Stellen messtechnisch Auswirkungen haben, so ist diese deutlich kleiner als die natürliche Streuung der Steifigkeit aufgrund der Variation der Wanddicke und somit aus den Ergebnissen nicht erkennbar. Ein Rückschluss auf die konkrete Messposition innerhalb des Rohrsegmentes aus der Veränderung der Steifigkeit lässt sich somit nicht feststellen. Dies gilt auch für den Messpunkt in der Nähe der installierten Überschiebmuffe. Auch dieser Bereich lässt sich ebenso wenig in den Messergebnissen als veränderte Steifigkeit erkennen wie die normalen Rohrverbindungen. Die Rohrverbindungen und -kupplungen scheinen bei dieser verwendeten biegeweichen Rohrrart keine messbaren Auswirkungen auf die Steifigkeit zu haben. Diese Ergebnisse unterscheiden sich somit deutlich von den Ergebnissen entsprechender Prüfungen die seinerzeit mit dem regulären MAC-System für biegesteife Rohre und begehbare Kanalsammler ab DN 1000 durchgeführt wurden. Hierbei ist das Ende eines Rohrsegmentes in Form von reduzierter Steifigkeit i.d.R. deutlich erkennbar (sofern das Rohr selbst noch intakt ist).

Einen Unterschied hierzu stellen die an einigen Stellen des Rohres angebrachte Schraubzwingen dar, die eine Behinderung der Deformation des Rohres in Horizontalrichtung bewirkten. Messungen an diesen Stellen zeigten einen deutlichen Anstieg in der Steifigkeit während des Tests. Der Durchschnittswert der Steifigkeit von insgesamt drei durchgeführten Versuchen betrug dabei $K = 480,8$ N/mm. Diese war somit ca. 25 % höher als der Durchschnittswert ohne seitliche Behinderung. Eine Erhöhung war in diesem Fall auch erwartet worden. Eine Quantifizierung und Vergleich in einer entsprechenden FE-Simulation war jedoch nicht möglich, da die Schraubzwingen von Hand angezogen wurden und die Vorspannkraft sowie deren Eigensteifigkeit nicht bestimmbar war.

Tabelle 4 Messwerte der Versuche entlang der Teststrecke (links), Variante mit Schraubzwingen (rechts)

Messpunkt	K [N/mm]
1	340,3
2	350,0
3	391,0
4	386,0
5	376,0
6	362,0
7	406,8
8	405,5
9	418,0
10	403,7
11	376,0
12	404,0
13	390,8
Ø	385,4

Messpunkt	K [N/mm]
4Z	550,7
11Z	508,3
12Z	446,3
Ø	480,8

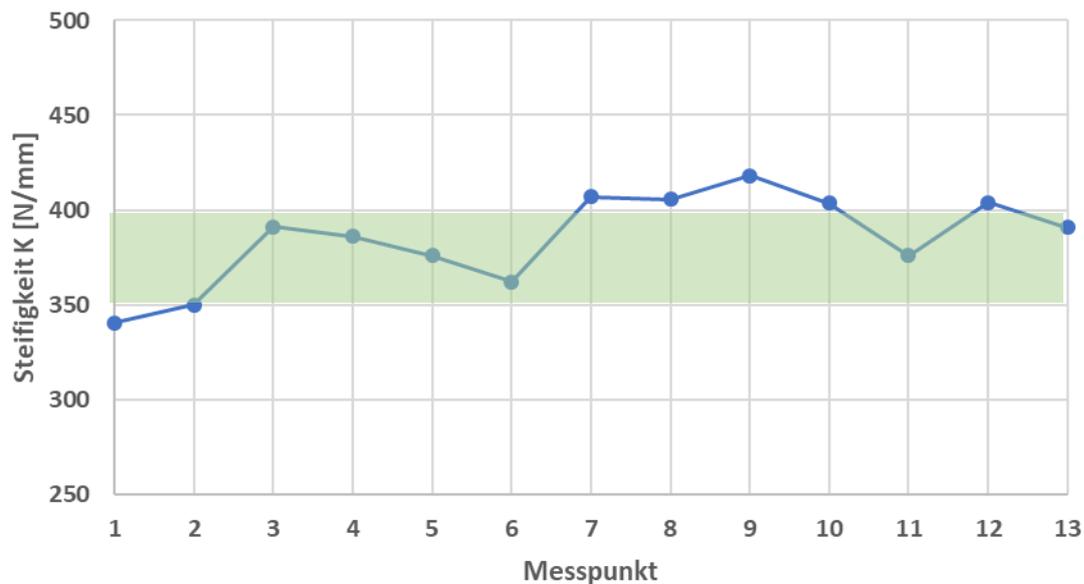


Bild 22 Grafische Darstellung der Messwerte aus Tabelle 1 (blau), Plausibilitätsbandbreite aus FE-Ergebnis zum Vergleich (hellgrün)

Im Bild 22 sind die Einzelergebnisse aus Tabelle 4 grafisch dargestellt (blau). Zum Vergleich ist ebenfalls die Plausibilitätsbandbreite der rechnerischen Steifigkeit der FE-Berechnung von $K = 350 \text{ N/mm}^2$ bis 394 N/mm für ein unendlich langes Rohr und einem E-Modul von 3.200 N/mm^2 angegeben (hellgrün). Es ist gut zu erkennen, dass die überwiegende Mehrzahl der Ergebnisse innerhalb dieser Plausibilitätsbandbreite (ca. 12,6 %) liegen. Für die übrigen Messwerte ist nicht auszuschließen, dass die relevanten Wanddicken an diesen Messstellen entsprechend höher bzw. geringer waren, da die Wanddicken aufgrund der Zugänglichkeit nur jeweils am **Beginn/Spitzende** eines Rohrsegmentes gemessen werden konnten.

Das Ergebnis der rechnerischen Steifigkeit der FE-Berechnung beträgt $K = 394 \text{ N/mm}^2$ für ein unendlich langes Rohr mit der entsprechenden Geometrie und einem E-Modul von 3.000 N/mm^2 . Der Unterschied zum gemessenen Mittelwert beträgt lediglich ca. +2,2 %. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte aus der FE-Analyse deutlich näher am gemessenen Mittelwert liegen, als die natürliche Schwankung in den Messergebnissen aus der Teststrecke.

Zur Einordnung, ob die natürliche Schwankung der Messwerte aufgrund von Änderungen der Rohrdicke einen hindernden Einfluss auf die Messung und Interpretation der kombinierten Rohr-Bodensteifigkeit haben, wurde hierfür ebenfalls in einem dreidimensionalen FE-Modell Boden mit verschiedenen E-Moduln (als Maß für die Lagerungsdichte) um das Rohr herum simuliert und entsprechende Versuche mit dem Mikro-MAC darin simuliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Man erkennt deutlich, dass sich bereits bei normal verdichtetem Boden mit einem E-Modul von 10 N/mm^2 bis 20 N/mm^2 die Gesamtsteifigkeit des Rohr-Boden-Systems ca. um den Faktor 2,8 bis 3,8 erhöht. Im Vergleich zur natürlichen Streubreite der Versuchsergebnisse des reinen Rohres überwiegen die Steifigkeiten der kombinierten Rohr-Bodensteifigkeit somit deutlich.

Tabelle 5 Kombinierte Rohr-Bodensteifigkeiten für verschiedene E-Moduln des Bodens

FE-Simulation für $t = 8,3 \text{ mm}$ und $E = 3.200 \text{ N/mm}^2$				
E-Modul	d	K	ΔK	Faktor
[N/mm ²]	[mm]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
1	1,434	371,9	0,0	0
2	1,149	464,2	92,3	1,5
5	0,822	648,5	276,6	2,1
10	0,623	856,6	484,7	2,8
20	0,459	1161,2	789,3	3,8
50	0,291	1831,6	1459,6	5,9
100	0,197	2711,5	2339,6	8,8

Zusammenfassung

Zur Überprüfung der korrekten Funktion des neuen Mikro-MAC-Geräts wurde im IKT eine Teststrecke aus PVC-U-Rohren der Nennweite DN 300 (315 mm OD) zusammengebaut und befahren und die Rohrsteifigkeit an insgesamt 13 verschiedenen Stellen gemessen, um die Genauigkeit und natürliche Schwankungsbreite der Messergebnisse festzustellen. Gleichzeitig wurde die Teststrecke in einem dreidimensionalen FE-Modell nachgebildet und berechnet.

Die Ergebnisse der Testbefahrung zeigten relativ einheitliche Ergebnisse mit einer Schwankungsbreite von insgesamt lediglich 20 % (von -12 % bis +8 %) aufgrund der Variation der Wanddicke des Rohres. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Einfluss von Rohrkupplungen oder -verbindungen bei biegeweichen Rohren nicht erkennbar ist, da die Steifigkeitsänderungen innerhalb der normalen Schwankungsbreite liegen. Versteifungen aufgrund von außen angebrachten Schraubzwingen

sind jedoch deutlich messbar. Auch die vergleichenden FE-Berechnungen zur kombinierten Steifigkeit des Rohr-Boden-Systems zeigten bereits für normal verdichtete Böden Erhöhungen der Gesamtsteifigkeit um den Faktor 2,8 bis 3,8 und sollten in der Praxis gut feststellbar sein.

Die Ergebnisse zeigen somit, dass eine Überprüfung der Rohrsteifigkeit bzw. der Rohrbettungsqualität mit dem Mikro-MAC-Gerät möglich ist und sich im Rahmen einer FE-Berechnung auch nachvollziehen lässt.

5.5.2 Messwertanalyse Schlauchliner (Renovierung)

Im Folgenden werden die während des Praxiseinsatzes in einem Kanal DN 600 (vgl. Abschnitt 5.3) gewonnenen Messwerte ausgewertet und analysiert. Ziel ist ein Auswertekonzept, mit dem künftig bei linersanierten Kanälen der tatsächliche Ringraum und der zugehörige E-Modul ermittelt werden kann.

Entsprechende Proben aus dem sanierten Kanalbereich wurden dem IKT zur Überprüfung der Einhaltung der statischen Mindestanforderungen hinsichtlich Dichtheit, E-Modul, Biegespannung und Verbunddicke übergeben und getestet. Die Prüfergebnisse bilden dabei die Grundlage für die Vorbereitungen zum Einsatz des Mikro-MAC in dem sanierten Mischwasserkanal.

Neben der Überprüfung der korrekten Funktionsweise des Systems in diesem ersten Praxiseinsatz, bestand die Hauptaufgabe darin, die korrekte Installation des Liners zu überprüfen. Während die Einhaltung der Materialqualität durch Probenentnahme am Anfang und Ende der Haltung innerhalb des Schachtbauwerks überprüft werden kann, ist die Überprüfung der Materialqualität innerhalb der Haltung nicht direkt möglich ohne den Liner dort aufzuschneiden. Die Überprüfung des Einbaus erfolgt hier regelmäßig durch eine Kamerabefahrung im Anschluss an den Einbau. Dabei lassen sich jedoch weder die Materialqualität bzw. -eigenschaften noch die Größe des entstandenen Ringspalts des Liners testen. Allenfalls das Aufspüren von Falten im Liner ist möglich.

Mit dem Mikro-MAC soll es jedoch auch möglich sein die Größe des bei der Sanierung entstandenen Ringspalts zwischen Altrohr und Liners zu testen. Hierbei wird auf den Liner, analog zur Vorgehensweise beim MAC-System für begehbare Kanalsammler, mit Hilfe einer hydraulischen Presse im Liner auf 3- und 9-Uhr-Position eine Kraft aufgebracht und der Liner damit aufgedrückt bis er an der Wand des Altrohres anliegt.

Vorberechnungen

Um für den Einsatz sinnvolle Bereiche für die Mindest- und Maximalwerte für Kraft und Deformation zu ermitteln, wird zum Vergleich ein dreidimensionales FE-System am Computer erstellt und die geplante Prüfung hieran simuliert. Die Mindestwerte sind einzuhalten, damit die zu erwartenden Aussagen im Rahmen von Messungen überhaupt getätigt werden können. Die Maximalwerte hingegen dienen zur Deformations- und Lastbegrenzung (je nachdem, welcher Grenzwert zuerst eintritt) bzw. zum Schutz des Liner-Rohr-Systems vor Überbelastung. Zur Bestimmung werden die folgenden Randbedingungen benötigt:

Altrohr:

- Geometrieform
- Material
- Durchmesser

Liner:

- E-Modul
- Biegefestigkeit
- Wanddicke

Beim Einbau des Liners ist nach den Ansätzen der Statik in DWA-A 143-2 mit einem Ringspalt von max. 0,5 % r_L zu rechnen. Dieser Ringspalt berücksichtigt die thermisch-physikalische und chemische Kontraktion des Liners beim Aushärten und anschließendem Abkühlen. Er verringert zudem die Beulsteifigkeit des im Altrohr gebetteten Liners. Der Wert sollte im Regelfall rechnerisch auf der sicheren Seite liegen. Die Anwendung des Mikro-MAC soll zeigen, dass dieser Wert eingehalten ist bzw. der tatsächlich gemessene Wert darunter liegt. Die notwendige Kraft, um diesen Ringspalt sicher überdrücken zu können, wird daher vorab am FE-Modell ermittelt. Dieser Wert stellt die untere Grenze dar.

Für den Fall, dass der Ringspalt aufgrund von Fehlern beim Einbau doch größer sein sollte, kann es auch sinnvoll sein, die aufzubringende Kraft über dieses Maß hinaus erhöhen zu können. Da hierfür bislang Erfahrungswerte aus der täglichen Praxis fehlen, wird für die Obergrenze der Kraft ein Wert abgeschätzt, der ca. 50 % über dem Mindestwert liegt. Dies soll später bei der anschließenden Auswertung der Kraft-Verformungskurven und der Zuordnung der einzelnen Steifigkeitsbereiche helfen. Um das Altrohr-Liner-System zu schützen, sind jedoch auch die maximal zulässigen Spannungen und Deformation sowohl für den Liner als auch das Altrohr zu berücksichtigen. Diese sind in jedem Fall so einzuhalten, dass Schäden am Liner-Altrohr-System vermieden werden.

Für den vorliegenden Altrohrzustand (AZ) I gemäß DWA-A 143-2 wird angenommen, dass das Altrohr lediglich Undichtigkeiten aufweist. Erfahrungsgemäß kann erwartet werden, dass die Festigkeit des Altrohres wesentlich größer ist als die des Liners. Somit kann ein gesonderter Nachweis für die zulässigen Kräfte am Altrohr i.d.R. entfallen. Die Nachweise für die maximalen Kräfte am Liner wären dann ausreichend. Für gerissene jedoch noch standsichere Rohre im AZ II kann es jedoch notwendig sein, gesonderte Betrachtungen zur maximal zulässigen Kraft und Deformation durchzuführen.

Der ideelle Ringspalt, der im Falle des vorliegenden DN 600 zu überbrücken wäre beträgt für 0,5 % r_L = 1,5 mm auf jeder Seite und somit insgesamt 3,0 mm. Das FE-Modell wird aus Symmetriegründen lediglich als halbes Modell berechnet, sodass sich die aufgebrachte Kraft nur zu einer Seite entfaltet. An der anderen Seite ist die Presse am Modellrand gelagert (Bild 23). Da in der Realität die Presse des MAC jedoch bei Aufbringung der Kraft den Liner an beiden Enden verformt und dieser Wert über den Wegaufnehmer gemessen wird, beträgt die dort gemessene Last-Verformungs-Verhältnis (Steifigkeit) natürlich auch nur 50 % des Wertes aus der FE-Berechnung.

Die Werte der FE-Berechnung sind daher entsprechend anzupassen und durch den Faktor 2 zu teilen.

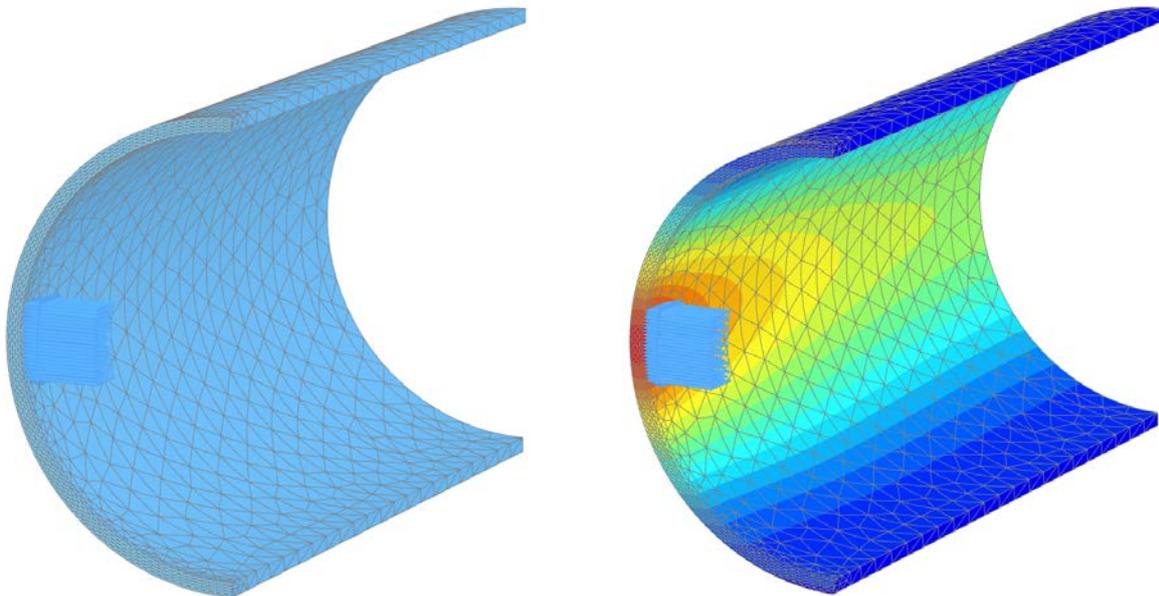


Bild 23 3D-Modell eines Liners DN 600 mit 9,2 mm Wanddicke (links) und Deformation im Kämpfer (rechts)

Die FE-Berechnungsergebnisse für das vorliegende Profil DN 600 sind Tabelle 6 zu entnehmen:

Tabelle 6 Kennwerte des FE-Systems: Eingabewerte (rot), berechnete Werte (blau)

Symbol	Wert	Einheit	Beschreibung
DN	600	[mm]	Nenndurchmesser Altrohr
r_i	300	[mm]	Innenradius Altrohr
w_{RS}	0,5	[%]	Ringspalt Liner, prozentual
w_{RS}	1,5	[mm]	Ringspalt Liner, absolut
t	9,2	[mm]	Wanddicke Liner aus Laborprobe
E	3.923	[N/mm ²]	E-Modul Liner aus Laborprobe
r_a	298,5	[mm]	Außenradius Liner, FE-Modell
r_m	293,9	[mm]	mittl. Radius Liner, FE-Modell
r_i	289,3	[mm]	Innenradius Liner, FE-Modell
F	1000	[N]	Kraft im FE-Modell
d_{LE}	22	[mm]	Durchmesser Lasteinleitung
Sigma	2,63	[N/mm ²]	Spannung im FE-Modell
Weg	3,43	[mm]	resultierender Weg
σ_1	17,8	[N/mm ²]	maximale Druckspannung
σ_3	20,7	[N/mm ²]	maximale Zugspannung
$F_{k,min}$	437	[N]	Kraft für Überdrückung des Ringspalts
Δ_h	3,00	[mm]	Weg für Überdrückung des Ringspalts
$F_{k,max}$	655	[N]	1,5-fache Kraft für Überdrückung des Ringspalts
K	145,6	[N/mm]	rechnerische Linersteifigkeit ohne Altrohr

Praxiseinsatz

Im Rahmen des Praxiseinsatzes wurden mehrere Messpunkte angefahren und pro Messpunkt jeweils mehrere (ca. 4-6) Prüfungen durchgeführt, um die korrekte Funktionsweise des Mikro-MAC zu testen. Zur initialen Fixierung des Geräts am Messpunkt wurde vor Beginn der Prüfung eine Haltekraft von $F_0 = 100 \text{ N}$ aufgebracht.

Bild 24 zeigt das Mikro-MAC bei der Einführung in die Haltung. Das Tragegeschirr wird anschließend entfernt und die modularen Schiebestangen jeweils an den Rädern befestigt, um das Lenken des Mikro-MAC innerhalb der Haltung zu ermöglichen. Die Stangenelemente sind jeweils ca. 1 m lang. Sie können über eine Modulkupplung beliebig verlängert werden. Somit lässt sich die Position des Gerätes im Kanal genau protokollieren.

Die Messungen erfolgten an den vorbestimmten Messpunkten mit den eingestellten Weg- und Kraftgrenzen. Die Auswertung erfolgte anschließend im IKT.



Bild 24 Mikro-MAC, Einbau in der Haltung vom Schacht aus

Versuchsauswertung

Im Rahmen der Versuchsauswertung ist prinzipiell der in Bild 25 dargestellte Kraft-Verformungs-Verlauf zu erwarten. Ausgehend von der aufgebrachten Anfangskraft F_0 wird die Kraft kontinuierlich gesteigert und der Liner dabei aufgedrückt. In diesem Bereich verhält sich das System näherungsweise linear. Die Steigung der Funktion in diesem *Bereich 1* entspricht der Federsteifigkeit des reinen Liners. Ab einer bestimmten Deformation tritt ein erster Kontakt mit der Wand auf und die Steifigkeit erhöht sich. Dies geschieht in der Praxis nicht völlig spontan, sondern erstreckt sich aufgrund von Unregelmäßigkeiten an der Innenwand des Altrohres über einen *Bereich 2* von einigen Zehntelmillimetern. Bei vollständigem Kontakt von Liner und Altrohr ergibt sich dann *Bereich 3*, der ebenfalls eine konstante Steigung aufweist. Diese stellt nun die kombinierte Steifigkeit von Liner, Altrohr (und Boden) dar.

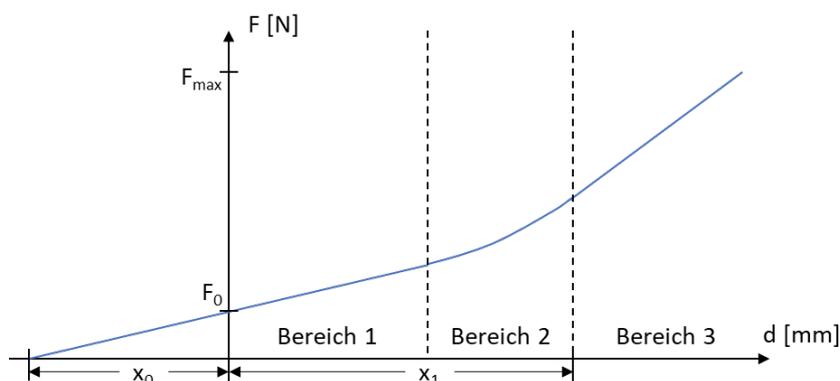


Bild 25 Schematische Darstellung des erwarteten Idealverlaufs der Kraft-Verformungs-Linie

Zur Auswertung der Last-Verformungskurven aus dem Mikro-MAC werden diese zunächst in Excel eingelesen. Es wird eine lineare Regressionsfunktion in den Bereich 1 (Federsteifigkeit des reinen Liners) und Bereich 2 (Federsteifigkeit des Liner-Rohr-Boden-Systems) gelegt. Dazwischen liegt der nicht-lineare Übergangsbereich, der mit einem Polynom 2. Grades approximiert wird. Die Größe des Gesamtringspalts ergibt sich dann durch die Summe der Deformationsanteile von x_0 und x_1 , wobei x_0 den Anteil aufgrund der Vorspannung der hydraulischen Presse an der Messstelle und x_1 den restlichen Weg bis zum Ende von Bereich 2 (vollständiger Kontakt mit der Rohrwand) darstellt.

Für die weitere Auswertung werden zwei charakteristische Messpunkte ausgewählt.

Ergebnisse Messpunkt 1

Die in Bild 26 und Bild 27 dargestellten Kurven zeigen die Werte aus dem ersten Messpunkt.

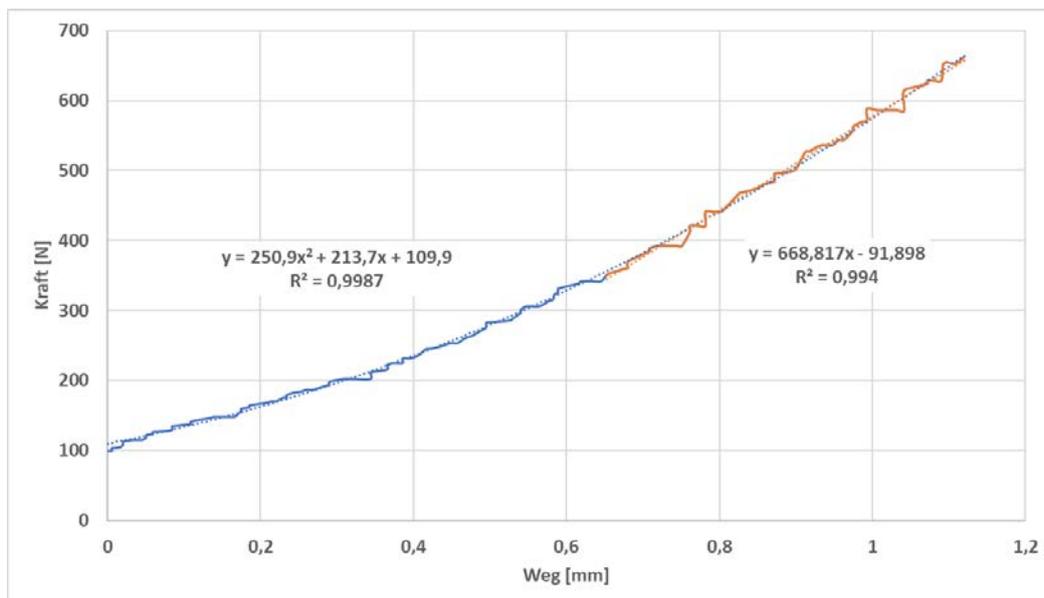


Bild 26 Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 1 mit Regressionsfunktionen für die Gesamtfunktion (links) mit dem linearen Anteil in Bereich 2 (rechts, orange)

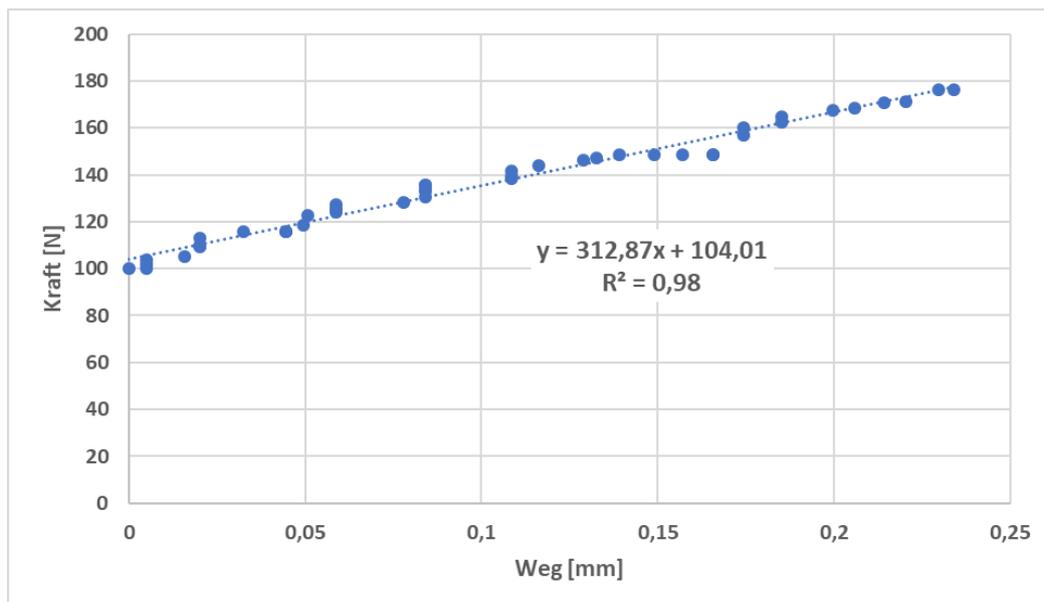


Bild 27 Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 1 mit Regressionsfunktion für den linearen Anteil in Bereich 1

Aus der Auswertung in Bild 26 ergibt sich rechnerisch eine Deformation von $x_1 = 0,69$ mm bis zum Schließen des Ringspalts. Die sich rechnerisch aus der Vorspannkraft ergebende Deformation (siehe Bild 27) beträgt $x_0 = 104,01/312,87 = 0,33$ mm. Der Gesamtringspalt ergibt sich somit zu insgesamt $x = 1,02$ mm, während der in der Statik angesetzte (Gesamt)Ringspalt 3,0 mm beträgt. Der gemessene Ringspalt ist somit deutlich kleiner als in der Statik angesetzt und die Einhaltung dieser statischen Randbedingung somit eingehalten.

Die sich nach Bild 27 ergebende Federsteifigkeit des Systems liegt bei ca. $K = 312,9$ N/mm und ist somit um den Faktor 2,15 größer als die in der vergleichenden FE-Berechnung ermittelte Steifigkeit von ca. $K = 145,6$ N/mm. Die beiden hierfür zugrunde gelegten Materialparameter Wanddicke und E-Modul stammen aus den Materialproben im Schacht und können von denen an der Messstelle abweichen. Welchen Anteil daran welcher Parameter hat, lässt sich durch diese Untersuchung nicht ermitteln. Der Wert liegt jedoch auf der sicheren Seite. Zudem würde hierbei der E-Modul nur linear in die Steifigkeit eingehen. Eine derartige Erhöhung läge jedoch deutlich außerhalb der realistischen Schwankungsbreite des E-Moduls. Daher kann davon ausgegangen werden, dass diese Erhöhung eher durch eine vergrößerte Wanddicke an dieser Messstelle erzeugt wurde. Alternativ kann sich der Liner bei der Messung auch im Altrohr verklemmt haben. Auch hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig, um diesen Punkt anhand der Messwerte bewerten zu können.

Ergebnisse Messpunkt 2

Die in Bild 28 und Bild 29 dargestellten Kurven zeigen die Werte aus dem zweiten Messpunkt.

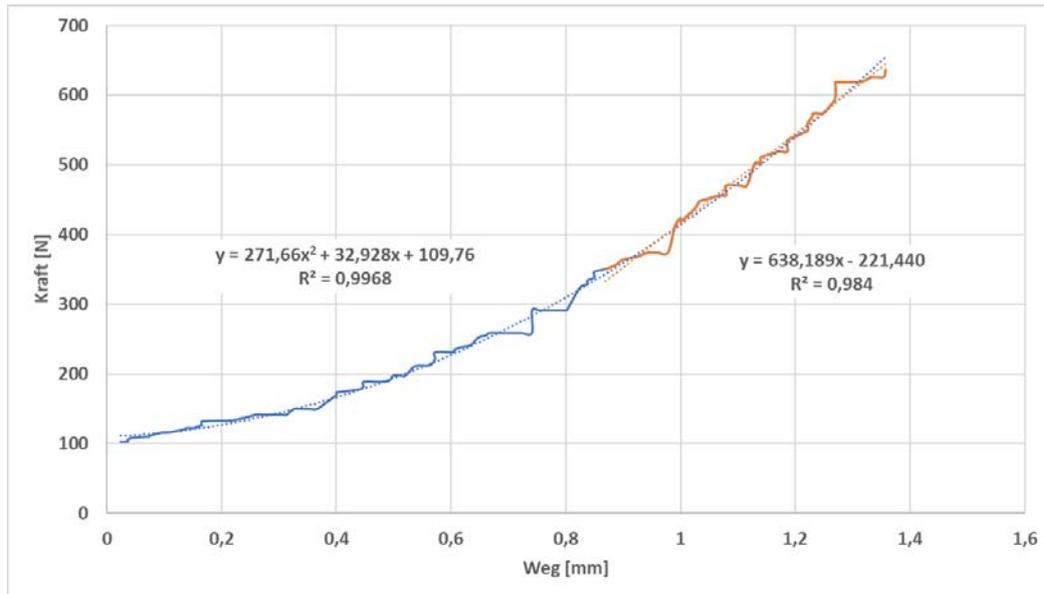


Bild 28 Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 2 mit Regressionsfunktionen für die Gesamtfunktion (links) mit dem linearen Anteil in Bereich 2 (rechts, orange)

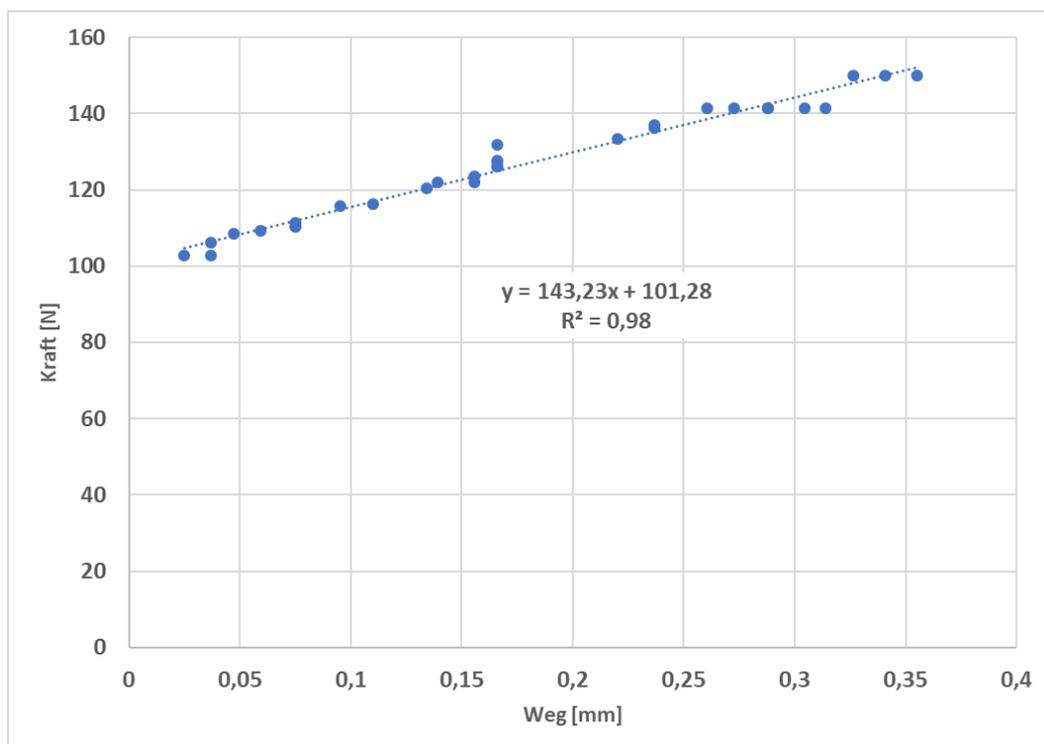


Bild 29 Last-Verschiebungskurve von Messpunkt 2 mit Regressionsfunktion für den linearen Anteil in Bereich 1

Aus der Auswertung in Bild 28 ergibt sich rechnerisch eine Deformation von $x_1 = 0,90$ mm bis zum Erreichen des Ringspalts. Die sich rechnerisch aus der Vorspannkraft ergebende Deformation (siehe Bild 29) beträgt $x_0 = 101,28/143,23 = 0,75$ mm. Der Gesamtringspalt ergibt sich somit zu insgesamt $x = 1,65$ mm, während der in der Statik angesetzte (Gesamt-) Ringspalt 3,0 mm beträgt. Der gemessene

Ringspalt ist somit deutlich kleiner als in der Statik angesetzt und die Einhaltung dieser statischen Randbedingung somit eingehalten.

Die sich nach Bild 29 ergebende Federsteifigkeit des Systems liegt bei ca. $K = 134,2$ N/mm und trifft somit genau die in der vergleichenden FE-Berechnung ermittelte Steifigkeit von ca. $K = 145,6$ N/mm.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des neu entwickelten Mikro-MAC-System wurde ein neu mit einem GfK-Schlauchliner sanierter Kanalabschnitt DN 600 befahren. Dieser Einsatz stellte einen ersten Praxistest des Geräts dar und sollte zeigen, ob das Gerät in der Lage ist, unter realen Umgebungsbedingungen die entsprechenden Messungen vor Ort durchzuführen.

Dieser erste Praxiseinsatz des Mikro-MAC hat dabei gezeigt, dass man mit dem Mikro-MAC-Gerät in der Lage ist, den Ringspalt und die Steifigkeit eines installierten Liners zu bestimmen. Beide Größen sind für die Bewertung des erfolgreichen Einbaus eines Liners unerlässlich und ließen sich bislang nicht zerstörungsfrei direkt vor Ort untersuchen.

Um für die Zukunft eine breitere Datengrundlage zu haben und aus den verschiedenen Ergebnissen bei den jeweiligen Einsätzen mehr Erfahrung ziehen zu können, sind jedoch noch weitere Einsätze notwendig. Insbesondere die Einschätzung von Ergebnissen, die nicht dem Standard entsprechen und entsprechend interpretiert werden müssen, sind hierbei für die Anpassung der Auswertungsroutinen interessant. Auch das Verhalten von verschiedenen Werkstoffen hinsichtlich ihrer Neigung zur Bildung eines Ringspalts ist sehr interessant.

5.6 Öffentlichkeitsarbeit

Das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur hat auf der HRW-Karriere-Messe der Hochschule Ruhr West die Arbeiten des IKT präsentiert. Mit dabei war auch das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Micro-MAC System. Demonstriert wurde die hochauflösende Prüf- und Messtechnik an einem Glasrohr, bei welchem selbst bei minimaler Verformung die hieraus resultierenden Kräfte messtechnisch erfasst werden konnten.



Bild 30 *Simon Torunski (IKT) demonstriert, dass mit der Messtechnik der Micro-MAC-Prüfeinrichtung sogar in Glasrohren Verformungen und Steifigkeiten direkt messbar sind*

Des Weiteren sind Veröffentlichungen der Ergebnisse im Rahmen des IKT-eNewsletters und in Fachzeitschriften geplant. Auch soll das Prüfsystem im Rahmen eines Projektes eingesetzt werden, welches die Qualität von Schlauchlinersanierungen in Hauptkanälen zum Thema hat. An diesem Projekt sind auch Netzbetreiber aus Belgien, den Niederlanden, Großbritannien, Neuseeland und Australien beteiligt. Hierdurch ist auch eine internationale Verbreitung der Ergebnisse gewährleistet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Schadhafte Abwasserkanäle und -leitungen bergen ein hohes Risiko für die Umwelt, denn durch Undichtigkeiten können einerseits im Abwasser enthaltene Schadstoffe in die Umwelt gelangen und Boden und Grundwasser verunreinigen (Exfiltration). Andererseits kann es bei undichten Abwasserleitungen auch zu einer Infiltration von Grundwasser kommen, was wiederum den Fremdwasseranteil erhöht und somit zu einer hydraulischen Überlastung des Gesamtsystems Kanalisation/Kläranlage führt.

Vor dem Hintergrund der alternden Kanalnetze und des wachsenden Investitionsbedarfes kommt der Zustandserfassung und der Sanierung schadhafter Kanäle daher eine hohe Bedeutung zu. Die derzeit gängige Methode der optischen Inspektion mit TV-Befahrung liefert allerdings nur unzureichende Informationen über den tatsächlichen Zustand oder die Qualität ausgeführter Erneuerungs- bzw. Renovierungsmaßnahmen, da lediglich die unmittelbare Oberfläche des Kanalinneren in Augenschein genommen werden kann.

Ziel dieses Projektes war aufbauend auf das bereits etablierte MAC-Verfahren für Nennweiten größer als DN 1000 die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens, welches die Beurteilung des Bettungszustandes beim Neubau und des Sanierungserfolges bei der Renovierung nicht-begehrbarer Abwasserleitungen ermöglicht, das Mikro-MAC.

Zunächst wurde der Stand der Technik bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren und bei der derzeit üblichen Qualitätssicherung von Schlauchlinersanierungen analysiert. Mit Netzbetreibern wurden die möglichen Einsatzgebiete des Micro-MAC diskutiert und Randbedingungen für die Geräteentwicklung festgelegt. Im Rahmen der Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung wurde auf den Einsatz von jenen Techniken, die einen unbemannten Betrieb ermöglichen, besonderen Wert gelegt. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 800 wurde bei Praxiseinsätzen im IKT und in situ überprüft. Basierend auf den Testeinsätzen wurde eine fachliche Einordnung der Prüfergebnisse aus bautechnischer Sicht vorgenommen. Hier wurden insbesondere Möglichkeiten zur Auswertung der gewonnenen Messwerte für den jeweiligen Anwendungsfall zusammengestellt. Schließlich wurden Auswertekonzepte zur Qualitätssicherung von neuerlegten biegeweichen Rohren und von Schlauchlinersanierungen mithilfe der Prüfergebnisse des Micro-MAC-Verfahrens erarbeitet.

Im Ergebnis wurde eine Prüfeinrichtung entwickelt, welche die Möglichkeiten der Qualitätssicherung bei Neubau und Sanierung für den Nennweitenbereich DN 300 bis DN 800 um folgende Prüfaspekte erweitert:

- Überprüfung der Bettung bei neuerlegten biegeweichen Kanalrohren (Standardbettung / Flüssigböden).
- Überprüfung der Qualität von Schlauchlinersanierungen (E-Modul / Ringraum).

Künftig müssen nun die entwickelte Gerätetechnik und zugehörigen Auswertekonzepte im Labor und in situ bei unterschiedlichen Nennweiten, Rohrwerkstoffen, Bettungseigenschaften und Schlauchlinerwerkstoffen angewendet werden, um gegebenenfalls Modifikationen vornehmen zu können und die Datenbasis zu erweitern.

Das Micro-MAC-Prüfgerät bietet die Möglichkeit, weit mehr Informationen über die Qualität von Neuverlegungen und Renovierungen zu gewinnen. In einer Haltung können zahlreiche Einzelprüfungen in konstanten Abständen durchgeführt werden, womit qualitätsrelevante Eigenschaften über die gesamte Haltungslänge sichtbar gemacht werden können. Durch die Messungen besteht damit erstmals die Möglichkeit, Bettungsqualitäten bei Neuverlegungen und Ringraumgröße und E-Modul bei Schlauchlinersanierungen quantitativ zu erfassen. Die dann nicht allein auf einer optischen Inspektion von Innen und punktuellen Materialprüfungen beruhenden Beurteilungen erhalten so eine deutlich höhere Aussagekraft und tragen so wesentlich zum Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen durch Abwasserexfiltrationen bei.

7 Literatur

- [1] Bosseler, B.; Liebscher, M.; Ulutaş, S.; Klameth, M.; Rofall, N.: Bericht zum Forschungsvorhaben „Vergleichende Untersuchung von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV)“ – IKT-Warentest „Flüssigböden (ZFSV) im Kanalbau“, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, beauftragt vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MULNV) des Landes Nordrhein-Westfalen. IKT, 2021, noch unveröffentlicht.
- [2] IKT: Entwicklung eines Prüfverfahren zur Standsicherheitsbewertung von Kanal-Großprofilen im Bestand. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 29939 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur. 16.12.2013
- [3] Liebscher, M.; Lücke, A.: Standsicherheit von Großprofilen – MAC-Verfahren hilft bei der Beurteilung des Kanalzustandes. bbr, 10/2014.
- [4] Thépot, O.: Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés. Thèse de doctorat. École Nationale des Pont et Chaussées, 01/2004.
- [5] IKT-Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Standsicherheitsbewertung von Kanal-Großprofilen im Bestand. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Aktenzeichen: 29939. Gelsenkirchen 2013.
- [6] Thépot, Olivier : Experimentelle Beurteilung der Standsicherheit von begehbaren Sammlern mit dem MAC-Prüfsystem. 3R, Ausgabe 3-4, 2012.
- [7] *DWA A 143-2: „Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren“. Entwurf 11/2012*
- [8] Bosseler, B.; Sokoll, O.; Diburg, B.; Beck, S.: Abnahme von Liningmaßnahmen – Materialnachweise und Bewertung der Linerqualität. Endbericht. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur. Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Gelsenkirchen, März 2009.
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 11296-4 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauch-Lining. Beuth Verlag; Berlin, September 2018.
- [10] Informationen der Schlauchlinerprüfstelle des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH. www.ikt.de

- [11] Bosseler, B.; Schlüter, M.; Meyer, P.: Untersuchung der Qualität ausgeführter Kanalsanierungen am Beispiel der Schlauchverfahren. Endbericht zum Forschungsvorhaben. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur. Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW. Gelsenkirchen, März 2001.
- [12] Bosseler, B.; Schlüter, M.: Qualitätseinflüsse Schlauchliner – Stichproben-Untersuchung an sanierten Abwasserkanälen. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur. Dezember 2003.
- [13] Bosseler, B.; Beck, S.: „Gewährleistungsabnahme Schlauchlining“. IKT-Projekt C0270. IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur. Auftraggeber: TBL Leverkusen, Stadtwerke Essen, Niederrheinwerke Viersen GmbH, Göttinger Entsorgungsbetriebe, Stadtbetrieb Wetter. Gelsenkirchen, Dezember 2009 (unveröffentlicht).
- [14] Bosseler, B.; Redmann, A.; Bennerscheidt, C.; Färber, D.: IKT-Warentest Hausanschluss-Liner. Endbericht zum Forschungsprojekt: Vergleichende Prüfung der Qualität von Sanierungsverfahren für Anschlusskanäle II. AZ: IV-7-041 105 0182. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur. Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW. März 2010.
- [15] Falter B., Hoch A., Wagner V.: Hinweise und Kommentare zur Anwendung des Merkblattes ATV-DVWK-M 127-2 für die statische Berechnung von Linern. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 4.
- [16] Wagner, V.: Beulnachweis bei der Sanierung von nichtbegehbaren, undichten Abwasserkanälen mit dem Schlauchverfahren, Dissertation, Technische Universität Berlin, 1992.
- [17] DWA-Arbeitsbericht: Erstellung von Explosionsschutzdokumenten für abwassertechnische Anlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 09/2005.
- [18] BGR 236 Rohrleitungsbauarbeiten/vorherige ZH 1/559: Berufsgenossenschaftliche Regel für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) in Kooperation mit dem Carl Heymanns Verlag, 01/2006.
- [19] Schmale, K.: Vorbereitung und Umsetzung von Standsicherheitsuntersuchungen von Großprofil-Leitungen mit dem MAC-Verfahren. Masterarbeit, 06/2013.