


IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur,  
Gelsenkirchen  
www.ikt.de



# **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Stand sicherheitsbewertung von Kanal- Großprofilen im Bestand**

- Abschlussbericht -

über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 29939 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

10/01		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
AZ	<b>29939</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>70.545 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Standsicherheitsbewertung von Kanal-Großprofilen im Bestand für ökologisch sinnvolle Kanalsanierungsstrategien</b>			
<b>Stichworte</b>		Verfahren, Abwasser, Kanalisation			
Laufzeit <b>12 Monate</b>		Projektbeginn <b>13.02.2012</b>	Projektende <b>16.12.2013</b>	Projektphase(n) <b>1</b>	
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH Exterbruch 1 45886 Gelsenkirchen		Tel 0209/17806-0 Fax 0209/17806-88 Projektleitung Martin Liebscher Bearbeiter Martin Liebscher	
<b>Kooperationspartner</b>		Fachhochschule Münster - Fachbereich Bauingenieurwesen Corrensstraße 25 48149 Münster  Leibniz Universität Hannover - Institut für Geotechnik (IGtH) Appelstraße 9A 30167 Hannover			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b> Von schadhaften Abwasserkanälen geht ein hohes Gefährdungspotential für die Umwelt aus. Durch undichte Abwasserkanäle kann Abwasser exfiltrieren und die Schutzgüter Boden und Grundwasser gefährden oder aber Grundwasser infiltrieren und zur hydraulischen Überlastung führen. Den Großprofilen kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, da diese in der Regel große Abwassermengen führen. Mit Blick auf die hohe Umweltrelevanz und das hohe Alter vieler Großprofile gewinnt die frühzeitige Schadenserkennung und die Beurteilung der Standsicherheit immer mehr an Bedeutung. Ziel des Forschungs- bzw. Entwicklungsvorhabens ist es, ein Prüfverfahren zu entwickeln, mit deren Hilfe zerstörungsfrei Standsicherheitsbewertungen von begehbaren Abwasserkanälen vorgenommen werden können. Es wird ein halbautomatisches Prüfgerät für Kanal-Großprofile entwickelt, dass sich an einem bereits bestehenden Prüfgerät der Pariser Wasserbetriebe „Eau de Paris“ für Nennweiten größer DN 1500 orientiert. In Abstimmung mit den Pariser Wasserbetrieben sollen mit der deutschen Neuent-					

wicklung – abweichend vom Einsatzbereich der französischen Prüfeinheit - insbesondere auch Kanäle ab einer Eiprofil-Nennweite von DN 1200/800 untersucht werden können. Darüber hinaus stehen bei der Neuentwicklung die spezifischen rechtlichen und technischen Anforderungen des deutschen Marktes im Vordergrund.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Zunächst wurde der Stand der Technik bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren analysiert. Sodann wurden die einzelnen Untersuchungsschritte bei einer Prüfung mit dem MAC-Verfahren zusammengestellt. Im Rahmen der Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung wurde auf den Einsatz von jenen Techniken, die einen halbautomatischen Betrieb ermöglichen, besonderen Wert gelegt, da hierdurch die Arbeitsabläufe bei der Prüfung vereinfacht und die Prüfgeschwindigkeit entsprechend erhöht werden kann. Begleitend zur Weiterentwicklung wurden Praxiseinsätze mit dem Gerät durchgeführt. Im Vorfeld wurden zudem Einsätze mit dem französischen Gerät inhaltlich und wissenschaftlich begleitet, um daraus wichtige Erkenntnisse über die Konzeption und Anwendung der Prüfeinheit zu gewinnen. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 1500 wurde bei einem Kanalnetzbetreiber überprüft. Ergänzt wurde das Prüfprogramm durch weitere Testeinsätze insitu und Prüfungen an einem Testrohr in der Versuchshalle des IKT. Basierend auf den Testeinsätzen wurde eine fachliche Einordnung der Prüfergebnisse aus bodenmechanischer und bautechnischer Sicht vorgenommen. Hier wurden insbesondere Möglichkeiten zur statischen Berechnung vorgestellt. Schließlich wurde ein Konzeptes zur Standsicherheitsanalyse mithilfe der Prüfergebnisse des MAC-Verfahrens erarbeitet.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 •

<http://www.dbu.de>

### **Ergebnisse und Diskussion**

Die Vorgehensweise bei der Standsicherheitsanalyse mit dem MAC-Verfahren kann in folgende Schritte unterteilt werden:

#### **1. Vorinspektion**

Im Rahmen einer Begehung werden der Zustand des Kanals erfasst und Auffälligkeiten dokumentiert. Auf dieser Basis wird zunächst das Messintervall für die MAC-Prüfung festgelegt. Die Informationen aus der Vorinspektion sind zudem für die Anpassung der Gerätetechnik erforderlich. Des Weiteren können auch Sofortmaßnahmen eingeleitet werden, wenn schon die optische Inspektion auf eklatante Schäden hinweist.

#### **2. Beurteilung der Gleichförmigkeit des Rohr-Boden-Systems in Längsrichtung (MAC-Prüfung)**

Es wird eine MAC Prüfung in den aus (1) ermittelten Messintervallen durchgeführt. Auf Basis der Steifigkeitsergebnisse wird der Kanal in Bereiche ähnlicher Rohr-Boden-Steifigkeiten eingeteilt. Abhängig von der Güte der vorliegenden Planunterlagen folgt eine erste Einschätzung von Standsicherheitsrisiken.

#### **3. Qualifizierung von Standsicherheitsrisiken durch Berechnung des Rohr-Boden-Systems (ABC-Zonierung)**

Zone A: Mit den vorliegenden Planunterlagen und ggf. Berechnungen nach der Finite-Element-Methode (FEM) lässt der Nachweis nach Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 eine ausreichende rechnerische Standsicherheit des Sammlers erwarten. In diesem Fall besteht zu diesem Zeitpunkt kein Anlass für weitere Untersuchungen, wie beispielsweise Bohrkernentnahmen.

Zone B: Der Nachweis der Standsicherheit nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 auf Basis der Ergebnisse der FEM und der vorliegenden Planunterlagen ergibt keine ausreichende Sicherheit nach Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127. Ein Standsicherheitsproblem kann nicht ausgeschlossen werden. In diesem Fall liefern Bohrkernentnahmen weitere Erkenntnisse insbesondere zu den Materialeigenschaften. In der Folge können Risikobetrachtungen und weitere Maßnahmen, wie z. B. regelmäßige Inspektionen, Verformungsmessungen und/oder MAC-Prüfungen, sinnvoll sein.

Zone C: Der Nachweis der Standsicherheit nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 auf Basis der Ergebnisse der FEM und der vorliegenden Planunterlagen gelingt nicht. Ein Standsicherheitsproblem ist dann sehr wahrscheinlich. Weitere Erkenntnisse zu den Eigenschaften von Rohr- und Bodenmaterial durch Bohrkernentnahmen und Rammkernsondierungen sind erforderlich. Zudem sollten weitere Analysen hinsichtlich der Sanierungsfähigkeit und der Bestimmung von Sanierungszonen in Anlehnung an DWA-A 143-2 erfolgen.

#### 4. **Sanierungsanalyse und Einteilung in Sanierungszonen S123**

Sofern Abschnitte des Kanals der Standsicherheitszone C zugeordnet wurden oder künftig werden (ggf. bei Veränderungen in Zone B), ist folgende Einteilung in Sanierungszonen in Anlehnung an das Merkblatt ATV-M 127-2 bzw. das Arbeitsblatt DWA-A 143-2 vorzunehmen:

Zone S1: Altrohrzustand II – „Längsrisse, daher biegeweich“

In dieser Zone ist das Altrohr-Boden-System noch tragfähig, und der Nachweis eines Sanierungssystems ist bei Ansatz von Bettungsreaktionskräften möglich. Eine Auskleidung oder Beschichtung sollte zur Dauerhaftigkeit bezüglich Wasserdichtheit oder Bodeneinbruch ausgewählt werden.

Zone S2: Altrohrzustand III – „Längsrisse, daher biegeweich plus Auskleidung“

In dieser Zone ist das Altrohr-Boden-System allein nicht mehr tragfähig, und das Sanierungssystem muss einen Beitrag zur Standsicherheit liefern. Daher sollte eine Auskleidung mit dem Ziel der statischen Ertüchtigung ausgewählt werden.

Zone S3: Bodenverbesserung/Bodennachweis notwendig

In dieser Zone sind die Altröhre nicht mehr tragfähig und können auch keinen ausreichenden Beitrag mehr zur Standsicherheit liefern. Es wird wie eine Art „Kiesbettung“ für das Sanierungssystem betrachtet. In diesem Fall muss das Sanierungssystem sämtliche Lasten übernehmen. Durch Bodenverbesserung mittels Injektionen kann zudem eine mittragende Wirkung erzielt werden. Ein rechnerischer Nachweis ist nach Arbeitsblatt DWA-A 143-2 (Altrohrzustand IIIa) möglich. Sind die vorstehend genannten Maßnahmen nicht ausreichend, so ist der Kanal in offener oder geschlossener Bauweise zu erneuern.

#### 5. **Verfahrensauswahl für die Sanierung**

Auf Basis der Sanierungsanalyse und der Einteilung in Sanierungszonen können dann in Frage kommende Sanierungssysteme ausgewählt, ausgeschrieben und ausgeführt werden. Begleitend können verschiedene Sanierungsvarianten berechnet werden.

#### 6. **Sicherung der Qualität von Sanierungsmaßnahmen**

Im Anschluss an eine Sanierung kann die Qualität der Ausführung mithilfe einer zweiten MAC-Prüfung erfasst und ggf. ein weiterer Standsicherheitsnachweis geführt werden. Hierdurch bietet sich erstmalig die Möglichkeit, statische Sanierungen nicht nur anhand von Materialprüfungen in begrenzter Zahl sondern ganzheitlich am Rohr-Boden-System zu kontrollieren.

#### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das MAC-System wurde auf folgenden Messen und Tagungen präsentiert:

- IFAT München (Mai 2012)
- Standpunkte-Seminar, Düsseldorf (November 2012)
- Standpunkte-Seminar, Düsseldorf (November 2013)
- DWA Sanierungs- und Inspektionstage, Dortmund (Dezember 2013)

Geplant ist eine Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen des IKT-eNewsletter und über den IKT Presseverteiler im Frühjahr 2014.

#### **Fazit**

Das MAC-Prüfgerät bietet die Möglichkeit, weit mehr Informationen über das Rohr-Boden-System bei gleichbleibendem oder geringerem Aufwand für Kernbohrungen und Bodenproben zu gewinnen. In einer Haltung können zahlreiche Einzelprüfungen in konstanten Abständen durchgeführt werden, womit Änderungen in der Steifigkeit des Rohr-Boden-Systems über die gesamte Haltungslänge sichtbar gemacht werden. Durch die Messungen besteht damit die Möglichkeit, eine Haltung in Zonen gleicher Rohr-Boden-Steifigkeit einzuordnen. Sofern erforderlich können anschließend zielgerichtet nähere Untersuchungen zu den Materialeigenschaften und den Wanddicken des Sammlers durchgeführt werden. Anhand der MAC-Prüfung können in Verbindung mit Ergebnissen von gezielten Bohrkern- und Bodenuntersuchungen statische Berechnungen durchgeführt werden, mit denen bei biegesteifen Rohren auf die Lastverteilung zwischen Boden und Rohr geschlossen werden kann (Konzentrationsfaktor der Bodenspannungen in Rohrscheitelebene). Bei längs gerissenen und damit biegeweichen Rohren liefert die MAC-Prüfung den Verformungsmodul des Bodens und damit die horizontale Bettungssteifigkeit. Damit können Sanierungsmaßnahmen zielgerichtet auf die Schwachstellen in einer Haltung ausgerichtet werden, z. B. durch eine Spritzbetonauskleidung zur statischen Ertüchtigung des Sammlers oder durch Bodeninjektionen zur Verbesserung der seitlichen Bettung. Die dann nicht allein auf einer optischen Inspektion von Innen beruhenden Beurteilungen erhalten so eine deutlich höhere Aussagekraft und die auf dieser Basis durchgeführten Standsicherheitsberechnungen eine erheblich bessere Datengrundlage. Schließlich kann eine zweite MAC-Prüfung auch zur Qualitätssicherung ausgeführter Sanierungsarbeiten herangezogen werden. Durch Vorher-Nachher-Vergleiche der Systemsteifigkeit an den Stellen der ersten Prüfung ist eine direkte Kontrolle der Wirksamkeit einer Sanierung möglich.

**Abschlussbericht zum Forschungsprojekt:**

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Standsicherheitsbewertung von Kanal-Großprofilen im Bestand

AZ: 29939

**Auftraggeber:**



Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bornau 2  
49090 Osnabrück

**Auftragnehmer:**



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH  
Exterbruch 1  
45886 Gelsenkirchen

**Bearbeitung:**

Wissenschaftliche Leitung: PD Dr.-Ing. B. Bosseler

Projektleitung und -bearbeitung: Dipl.-Ing. M. Liebscher

A. Lücke, B. Eng  
Dipl.-Ing. F. Bersuck  
Dipl.-Ing. M. Bartel  
K. Schmale, M.Sc

**Kooperationspartner:**



Fachhochschule Münster  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Falter  
Corrensstraße 25  
48149 Münster



Leibniz Universität Hannover  
Institut für Geotechnik (IGtH)  
Prof. Dr. Ing. Martin Achmus  
Dipl.-Ing. Mark Klameth  
Appelstraße 9A  
30167 Hannover

<b><u>Inhaltsverzeichnis</u></b>	<b>Seite</b>
<b>BILDERVERZEICHNIS .....</b>	<b>8</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>11</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>12</b>
<b>1 VERANLASSUNG .....</b>	<b>13</b>
<b>2 ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE.....</b>	<b>15</b>
<b>3 STAND DER TECHNIK – MAC-VERFAHREN .....</b>	<b>16</b>
3.1 EINLEITUNG .....	16
3.2 BESCHREIBUNG DES MAC-PRÜFSYSTEMS .....	17
3.3 STATISTISCHE AUSWERTUNG, BEREICHSERMITTLUNG, PROBENAHEME .....	20
3.4 BERECHNUNG DES MODULS VON STRUKTUR UND BODEN .....	21
3.5 DER MICRO-VERFORMUNGSMODUL DES BODENS UND DER MAC-VERSUCH .....	24
3.6 ANWENDUNG DES MAC-PRÜFSYSTEMS .....	26
3.7 BEURTEILUNG DER AUSWIRKUNGEN VON MÖRTELINJEKTIONEN.....	27
3.8 BEURTEILUNG VON SPRITZBETON.....	28
3.9 BEZUG ZUR DEUTSCHEN VORSCHRIFT ATV-M 127-2 .....	29
<b>4 UNTERSUCHUNGSSCHRITTE MAC-VERFAHREN .....</b>	<b>31</b>
4.1 VERFAHRENSSCHEMA.....	31
4.2 VORPLANERISCHE MAßNAHMEN.....	32
4.3 ERFORDERLICHE VORARBEITEN .....	33
4.4 KANALVORINSPEKTION .....	34
4.5 DURCHFÜHRUNG DER MAC-MESSUNG .....	34
<b>5 ENTWICKLUNG MAC-PRÜFEINRICHTUNG .....</b>	<b>37</b>
5.1 GRUNDLAGEN.....	37
5.2 MECHANIK.....	38
5.3 MESSTECHNIK .....	39
5.4 GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG .....	41
5.4.1 Grundlagen .....	41
5.4.2 Zündquellen .....	45
5.4.3 Explosion .....	46
5.4.4 Gesundheitlich .....	52
5.4.5 Gefährdungsbeurteilung MAC-Prüfeinrichtung.....	55
<b>6 PRAXISEINSÄTZE.....</b>	<b>59</b>
6.1 ÜBERBLICK.....	59
6.2 GEMEENTE ARNHEIM.....	59
6.3 VERSUCHSSTRECKE IKT.....	65
6.4 STADT DÜSSELDORF .....	68
6.5 STADT SCHWERTE .....	72
6.6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT .....	76
<b>7 FACHLICHE EINORDNUNG DER PRÜFERGEBNISSE.....</b>	<b>78</b>
7.1 ANALYTISCHER BERECHNUNGSANSATZ .....	78
7.1.1 Nicht gerissene Rohre (Altrohrzustand I).....	78
7.1.2 Längs gerissene Rohre (Altrohrzustand II und III).....	85
7.2 BEISPIELBERECHNUNG MIT DER FEM .....	88

7.2.1	<i>Allgemeines</i> .....	88
7.2.2	<i>FE-Berechnung und weitere Untersuchungen</i> .....	88
7.2.3	<i>Berechnungsergebnisse</i> .....	90
7.2.3.1	Steifigkeit und Übertragungsverhältnis .....	90
7.2.3.2	Qualitätsindex .....	92
7.2.3.3	Boden .....	93
7.2.3.4	Einschränkungen des Verfahrens .....	93
7.2.4	<i>Zusammenfassung</i> .....	94
7.3	<b>MAC-VERFAHREN IM NORMEN- UND REGELWERK</b> .....	94
7.3.1	<i>Arbeitsblatt DWA-A 143-2</i> .....	94
7.3.2	<i>Grenzlasten nicht gerissener Altrohre</i> .....	95
7.3.3	<i>Grenzlasten gerissener Altrohre</i> .....	96
<b>8</b>	<b>STANDSICHERHEITSANALYSE</b> .....	<b>101</b>
8.1	KONZEPT .....	101
8.2	NACHWEISE .....	104
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT</b> .....	<b>107</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>110</b>

## Bilderverzeichnis

Bild 1	Das MAC-Prüfsystem .....	17
Bild 2	Das MAC-Prüfsystem in einem eiförmigen Sammler.....	18
Bild 3	Versuchsergebnisse: Hauptverformungs- und 3D-Verformungskurve....	19
Bild 4	Verlauf der globalen Steifigkeit und des Übertragungsverhältnisses.....	20
Bild 5	Finite Element Modell zur Rückrechnung des Elastizitätsmoduls des Bodens und der Sammlerstruktur.....	21
Bild 6	Anpassung der Finite Element Ergebnisse.....	22
Bild 7	Darstellung des Werkstoffqualitätsindex und des Mikromoduls des Bodens. ....	24
Bild 8	Finite Element Simulation des MAC-Versuchs - der Boden erfährt sehr geringe Verzerrungen (< 0,02%). ....	25
Bild 9	Abnahme des Bodenmoduls infolge von Schubverzerrungen. ....	25
Bild 10	Beurteilung der Rehabilitationsarbeiten mit dem MAC-Prüfsystem .....	26
Bild 11	Mörtelinjektionen in einem Sammler mit Eiqerschnitt. ....	27
Bild 12	MAC-Steifigkeit vor und nach der Sanierung (Mörtelinjektion). ....	27
Bild 13	MAC-Versuche vor und nach der Sanierung (Spritzbeton).....	28
Bild 14	MAC-Steifigkeit vor und nach der Sanierung (Spritzbeton). ....	28
Bild 15	Betonsammler, wahrscheinlich Altrohrzustand III („fully deteriorated“)...	29
Bild 16	Finite Element Berechnungen der MAC-Versuche für ein Rohr im Altrohrzustand I und im Altrohrzustand III.....	29
Bild 17	Kreisförmiges Betonrohr, bereichsweise Altrohrzustand III. ....	30
Bild 18	Verfahrensablauf mit dem MAC-Verfahren.....	31
Bild 19	Verkürzter Verfahrensablauf nach Sanierungsarbeiten .....	32
Bild 20	MAC-Prüfeinrichtung - Komponenten.....	37
Bild 21	Hydraulisches Schaltbild mit Ansteuerung .....	38
Bild 22	Höhenverstellung der Prüfeinheit .....	39
Bild 23	Schematischer Aufbau der Kommunikationslogik.....	39
Bild 24	Wegmessmodul (links) und Kraftmessdose (rechts) .....	40
Bild 25	manuelle Steuerbox (links), MAC-Steuermodul (rechts).....	41
Bild 26	Ablaufschema zur Beurteilung der explosionsgefährdung und Festlegung von Schutzmaßnahmen [15].....	43
Bild 27	„Moerriool“: Trassenverlauf in Arnheim, Länge ca. 1150 m.....	60



Bild 28	Aufbau des „Moerriool“: Gereinigter Kanal (links); Skizze (rechts) .....	60
Bild 29	Typische Schadensbilder: Korrosionsschäden und Absackungen mit Schrägstellung (links) und offensichtlichen Ausspülungen im darunterliegenden Bettungsmaterial (rechts).....	60
Bild 30	Typisches Rissbild (links) und Querschnitt mit Rissbereichen (rechts)...	61
Bild 31	Ergebnisse von Radaraufnahmen im Umfeld des „Moerriool“ .....	61
Bild 32	Einsatz des MAC-Verfahrens im „Moerriool“ .....	62
Bild 33	Ablauf der Sofortmaßnahmen, vom Schaden bis zur abgeschlossenen Reparatur (Skizze).....	63
Bild 34	Sicherung über Laststempel (links) und Lasermessungen (rechts).....	64
Bild 35	Gesamtsteifigkeit des „Moerriool“ nach PU-Injektion.....	64
Bild 36	Einsatz der SAAF-Messtechnik zum Monitoring im Londoner Kanalsystem, aus [23] .....	65
Bild 37	Teststrecke mit Stahlbetonrohren im IKT: Bereich mit Bettungssimulation links im Bild .....	66
Bild 38	Abstände von d0, d1 und d2 zur Druckzylindermitte (links) und Positionierung der Wegmessmodule d0, d1 und d2 (rechts).....	66
Bild 39	Positionen der Messpunkte zum Spitzende von Rohr 1 bzw. Rohr 2 .....	67
Bild 40	Steifigkeiten in der IKT-Versuchsstrecke .....	67
Bild 41	Ei-Profil DN 1200 / 800 Düsseldorf: Skizze (links) und Prüftermine (rechts) .....	68
Bild 42	Katasterauszug Haltung Düsseldorf Inselstr. / Sternstr. ....	68
Bild 43	Herablassen der MAC-Prüfeinrichtung (links) und des Scherenarms (rechts) in die Haltung .....	69
Bild 44	Fugensanierter Mauerwerkskanal mit Fliesensanierter Sohle (links) und Positionierung der MAC-Prüfeinrichtung im Betonabschnitt (rechts) .....	70
Bild 45	Steifigkeitsdiagramm der Haltung Düsseldorf Inselstr. / Sternstr.....	72
Bild 46	Maulprofil mit Mittelbankett DN 2250 / 1860 Schwerte .....	73
Bild 47	Katasterauszug Haltung Schwerte "Obere Meischede" .....	73
Bild 48	Typische Schadensbilder: Rissbildung (links) und Ablagerungen (rechts) .....	73
Bild 49	Positionierung der MAC-Prüfeinrichtung (links), verbreitete Auflagefläche für den Druckzylinder (rechts) .....	74
Bild 50	Steifigkeitsdiagramm der Haltung Schwerte "Obere Meischede" .....	75
Bild 51	Bert Bosseler, IKT, (links), demonstriert dass mit der Messtechnik der MAC-Prüfeinrichtung auch in Glasrohren Verformungen und Steifigkeiten	

direkt messbar sind und Olivier Thépot, Eau de Paris, (rechts) erläutert die Funktionsweise der MAC-Prüfeinrichtung anhand eines 1:1-Prototypen .....77

Bild 52 Verformungen U des Schalenmodells  $t = 225$  mm bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN in Rohrmitte (Schale in der Mitte geschnitten) .....80

Bild 53 Verformungen U des Schalenmodells  $t = 225$  mm bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN in Rohrmitte (Schale in der Mitte geschnitten) .....81

Bild 54 Gesamtverformung U des Schalenmodells  $t = 225$  mm bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN in Rohrmitte, Darstellung in Umfangsrichtung .....81

Bild 55 Verformungen U2 des Schalenmodells  $t = 225$  mm in Längsrichtung bei gegenseitiger Einzellast  $F$  in Rohrmitte,  $x = 0 =$  Schalenmitte .....82

Bild 56 Verformungen U2 des Schalenmodells  $t = 225$  mm in Längsrichtung bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN am freien Rand der Rohrschale .....83

Bild 57 Verformungen U2 in Längsrichtung bei gegenseitiger Einzellast  $F$  in Rohrmitte,  $x = 0 =$  Schalenmitte .....83

Bild 58 Verformungen U2 des Schalenmodells  $t = 225$  mm ohne Boden in Längsrichtung (vgl. Bild 56) bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN am freien Rand der Rohrschale, Vergleich mit verschiedenen Näherungsfunktionen Gl. (7.4) .....84

Bild 59 Biegelinie und Biegemomentenlinie des elastisch gebetteten Balkens = Hälfte eines vierfach längs gerissenen Rohres DN 1500 mit 2,5 m Länge, Verformungsmodul des Bodens  $E_2 = 20$  N/mm<sup>2</sup> .....85

Bild 60 Längs gerissenes Altrohr im Boden, Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$ , Prüflast  $F$  (Hinweis: Die Koordinatenbezeichnungen weichen von Bild 52 und Bild 53 ab). .....86

Bild 61 FE-Modell als halbes Kanalsegment .....88

Bild 62 Generiertes Modell der Testkonfiguration .....89

Bild 63 Zonierung der Steifigkeiten (links) und der Übertragungsfaktoren (rechts) über die Untersuchungsstrecke anhand der MAC-Messwerte .....89

Bild 64 Steifigkeit  $K_G$  (Rohr und Boden, gemessen) und  $K_0$  (Rohr, berechnet) in den jeweiligen Zonen .....91

Bild 65  $\Omega_G$  gemessen (rot, unten) und berechnet (blau, oben) in den jeweiligen Zonen .....91

Bild 66 erreichte MAC-Steifigkeit im Vergleich zum theoretischen Maximum .....93

Bild 67 Längs gerissenes Altrohr im Boden mit Liner, Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$  .....96

Bild 68 Viertelsystem im verformten Zustand, Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$ , Auflagerreaktionen in den Druckzonen V (Kämpfer) und H (Scheitel) .....97

Bild 69	Last-Verschiebungskurven des Viergelenkringes für vertikale Bodenspannungen $q_{v,d}$ , Bodengruppe G2, $K_2 = 0,3$ , Anfangsverformung $\delta_0$ .....	98
Bild 70	Last-Verschiebungskurven des Viergelenkringes für vertikale Bodenspannungen $q_{v,d}$ , Bodengruppe G2, $e_G/t = 0,25$ , $K_2 = 0,3$ .....	99
Bild 71	Vorgehensweise Altrohrzustand I .....	106
Bild 72	Vorgehensweise Altrohrzustand II und III .....	106

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Parameter für Sammler mit Eiprofil (1) .....	23
Tabelle 2	Parameter für Sammler mit Eiprofil (2) .....	23
Tabelle 3	Zustandsgruppen in den Zonen .....	24
Tabelle 4	Sicherheitstechnische Kennwerte relevanter Stoffe [15] .....	44
Tabelle 5	Zündschutzarten (mechanisch) nach EN 1127-1 [ ] .....	45
Tabelle 6	Zündschutzarten (elektrisch) nach EN 1127-1 [17] .....	45
Tabelle 7	Zuordnung der Gerätegruppe zur Kategorie und dessen Schutzgrad ....	47
Tabelle 8	Einteilung der Gefahren-Arten und Dauer in Zonen .....	48
Tabelle 9	Intervall des Auftretens und Verweilzeit der Gemische .....	49
Tabelle 10	Temperaturen für die Gruppe I .....	49
Tabelle 11	Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel in gasexplosionsgefährdeten Bereichen .....	50
Tabelle 12	Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel in gasexplosionsgefährdeten Bereichen (Fortsetzung) .....	51
Tabelle 13	Schutzmaßnahmen bei Gesundheitlicher Gefährdung .....	55
Tabelle 14	Gegenmaßnahmen zur Gefährdung im Umgang mit dem MAC-Prüfsystem .....	56
Tabelle 15	Haltungs-Abschnitte .....	69
Tabelle 16	Zoneneinteilung der Haltung .....	75
Tabelle 17	Parametervariationen für ein Rohr DN 1500 aus unbewehrtem Beton mit $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$ und $\mu = 0,2$ .....	82
Tabelle 18	Verformungen an der Lasteinleitungsstelle für ein Rohr DN 1500 aus unbewehrtem Beton mit $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$ für die Varianten nach Tabelle 17 .....	84

## Zusammenfassung

Zielstellung des Projektes ist es, auch für die besonderen rechtlichen und technischen Anforderungen des deutschen Marktes in Orientierung an die französische MAC-Prüfeinrichtung bei Auswahl und Nutzung geeigneter, neuer, aktueller Technik ein Prüfverfahren zu entwickeln, mit deren Hilfe zerstörungsfrei Standsicherheitsbeurteilungen von begehbaren Abwasserkanälen auch mit einer Nennweite von  $\leq$  DN 1500 vorgenommen werden können. Hierbei sollen u. a. die im DWA-Regelwerk aufgeführten Anforderungen berücksichtigt werden, da ein Analogieschluss zwischen den bodenmechanischen Modell der „Steifigkeit bei Mikrodeformationen“ zu dem empirisch begründeten Bodenmodell in Deutschland nach ATV A 127 derzeit noch nicht möglich ist. Im Einzelnen wurde folgende Vorgehensweise zur Erreichung dieser Zielstellung gewählt:

Zunächst wurde der Stand der Technik bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren analysiert. Sodann wurden die einzelnen Untersuchungsschritte bei einer Prüfung mit dem MAC-Verfahren zusammengestellt. Im Rahmen der Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung wurde auf den Einsatz von jenen Techniken, die einen halbautomatischen Betrieb ermöglichen, besonderen Wert gelegt, da hierdurch die Arbeitsabläufe bei der Prüfung vereinfacht und die Prüfgeschwindigkeit entsprechend erhöht werden kann. Begleitend zur Weiterentwicklung wurden Praxiseinsätze mit dem Gerät durchgeführt. Im Vorfeld wurden zudem Einsätze mit dem französischen Gerät inhaltlich und wissenschaftlich begleitet, um daraus wichtige Erkenntnisse über die Konzeption und Anwendung der Prüfeinheit zu gewinnen. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 1500 wurde bei einem Kanalnetzbetreiber überprüft. Ergänzt wurde das Prüfprogramm durch weitere Testeinsätze insitu und Prüfungen an einem Testrohr in der Versuchshalle des IKT. Basierend auf den Testeinsätzen wurde eine fachliche Einordnung der Prüfergebnisse aus bodenmechanischer und bautechnischer Sicht vorgenommen. Hier wurden insbesondere Möglichkeiten zur statischen Berechnung vorgestellt. Schließlich wurde ein Konzeptes zur Standsicherheitsanalyse mithilfe der Prüfergebnisse des MAC-Verfahrens erarbeitet.

Die Vorgehensweise bei der Standsicherheitsanalyse mit dem MAC-Verfahren kann in folgende Schritte unterteilt werden:

1. *Vorinspektion*
2. *Beurteilung der Gleichförmigkeit des Rohr-Boden-Systems in Längsrichtung (MAC-Prüfung)*
3. *Qualifizierung von Standsicherheitsrisiken durch Berechnung des Rohr-Boden-Systems (ABC-Zonierung)*
4. *Sanierungsanalyse und Einteilung in Sanierungszonen S123*
5. *Verfahrensauswahl für die Sanierung*
6. *Sicherung der Qualität von Sanierungsmaßnahmen*

Kooperationspartner:

- Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik (IGtH)

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), AZ: 29939

## 1 Veranlassung

Von schadhafte Abwasserkanälen geht ein hohes Gefährdungspotential für die Umwelt aus. Durch undichte Abwasserkanäle können im Abwasser enthaltene Schadstoffe in die Umwelt gelangen und die Schutzgüter Boden und Grundwasser verunreinigen (Exfiltration). Auch die Infiltration von Grundwasser birgt Risiken. Zum einen wird der Fremdwasseranteil im Kanal erhöht und dadurch das Abwassersystem hydraulisch überlastet, zum anderen wird ggf. Bodenmaterial in den Kanal mit eingespült, so dass sich Hohlräume in der Leitungszone bilden können. Die Standsicherheit des Kanals ist dann möglicherweise nicht mehr gewährleistet, so dass im Extremfall mit einem Einsturz des Bauwerks und somit noch weitaus massiveren Konsequenzen für die Umwelt zu rechnen ist. Wird im schadhafte Kanal aufgrund von Grundwasserinfiltration bereits ein relativ hoher Fremdwasseranteil transportiert, führen besonders ergiebige Regenfälle schnell zu unerwarteten Überstauereignissen, da die hydraulische Leistungsfähigkeit des Kanals erschöpft ist. Eine Zunahme von Starkregenereignissen mit weiterer Belastung der Kanalnetze verschärft die Situation ("Klimawandel").

Den Großprofilen kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, da diese in der Regel große Abwassermengen führen. Zudem befinden sich Großprofile häufig am Ende von Entwässerungsnetzen und somit meist auch in entsprechender Tiefenlage unterhalb des Grundwasserspiegels. Von schadhafte Großprofilen geht daher auch ein entsprechend hohes Gefährdungspotential für die Umwelt aus, denn im Regelfall kann über die Schadstellen Grundwasser in das Abwassernetz infiltrieren. Gebietsweise kann es zu Grundwasserabsenkungen kommen, die für das umliegende Ökosystem weitreichende Folgen nach sich ziehen.

Im Rahmen eines IKT-Verbundprojektes unter Beteiligung mehrerer größerer Kanalnetzbetreiber<sup>1</sup> zum Thema „Reparatur von Großprofilen“ wurde deutlich, dass besonders die Zustandserfassung und -beurteilung des Abwasserkanals vor der Sanierung für die Projektbeteiligten von großem Interesse ist. Vor allem die Standsicherheitsbeurteilung des Sanierungsobjektes steht häufig zur Diskussion und erscheint in der Umsetzung problematisch. Bisherige Erfahrungen der beteiligten Netzbetreiber mit Ingenieurbüros oder Statikern lassen vermuten, dass statische Nachweise oder Beurteilungen besonders im Fall älterer Abwasserkanäle aufgrund fehlender Angaben häufig nicht erbracht werden können. Ein Grund sind fehlende Eingangsinformationen z.B. über die Bodenbeschaffenheit in der Leitungszone oder den Wandaufbau des schadhafte Abwasserkanals besonders bei älterem Mauerwerk. Weitergehende Hinweise über Art und Umfang der im Vorfeld erforderlichen Zustandserfassung sind den Betreibern häufig ebenfalls nicht bekannt. In der Konsequenz ist auch die Auswahl eines geeigneten Sanierungsverfahrens oft mit Schwierigkeiten verbunden. Mit Blick auf die hohe Umweltrelevanz und vor dem Hintergrund des derzeitigen und zukünftigen Sanierungsbedarfs gewinnen die Schadenserkennung und die Auswahl geeigneter Reparaturverfahren für Großprofile immer mehr an Bedeutung. Nach einer ATV-

<sup>1</sup>Gemeente Arnhem (NL), Stadtentwässerungsbetrieb Landeshauptstadt Düsseldorf, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Städtische Werke Magdeburg, Städtische Betriebe Minden, Münchner Stadtentwässerung, Wuppervverband

Umfrage [1] aus dem Jahr 2009 sind ca. 17 % des deutschen Kanalisationsnetzes kurz- bzw. mittelfristig sanierungsbedürftig.

Die Instandhaltung von Großprofilen ist in der Regel arbeitsaufwändig, kostenintensiv und mit hohen Erfolgsrisiken verbunden. Insbesondere Injektions-, Abdichtungs- und Beschichtungsverfahren werden derzeit eingesetzt. Für bestimmte Schadensbilder und in der Regel schwierige Netzsituationen sind geeignete Reparaturverfahren auszuwählen, um den Sanierungserfolg zu sichern. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse aus der vorhergehenden Zustandserfassung (z.B. optische Inspektion durch Begehung) für die anschließende Auswahl des Sanierungsverfahrens von großer Bedeutung. Die optische Inspektion oder Inaugenscheinnahme liefert hier nur unzureichende Informationen über den Zustand der inspizierten Haltung, denn lediglich die unmittelbare Kanalinnenoberfläche kann in Augenschein genommen werden. Eine Begutachtung der Bereiche hinter oder in der Kanalwand sowie dem darüber liegenden Bodenkörper und dem Straßenoberbau ist mit den optischen Inspektionsverfahren allein nicht möglich. Somit bleiben wesentliche Beeinträchtigungen in und hinter der Kanalwand, wie z.B. Hohlräume und unzureichende Verdichtungen (Lagerungsdefekte) in der Leitungszone, sowie Schäden an der Außenwand unerkannt. Dies kann zum Teil zu erheblichen Fehleinschätzungen hinsichtlich des baulichen Zustands und des aktuellen Sanierungsbedarfs führen. Eine zuverlässige Beurteilung der Standsicherheit ist basierend auf den verfügbaren Informationen kaum möglich.

Mit Blick auf die mechanischen Kennwerte für statische Berechnungen bzw. Standsicherheitsanalysen von Kanal-Großprofilen im Bestand werden in der Regel entsprechende Annahmen getroffen, die auf der sicheren Seite liegen. Mögliche Reststandsicherheiten des Altrohr-Boden-Systems bleiben gänzlich unberücksichtigt, so dass auch in diesem Fall Fehleinschätzungen unvermeidbar sind. Als Folge werden aufwändige und ökologisch bedenkliche Neubaumaßnahmen durchgeführt, obwohl diese bei näherer Betrachtung nicht erforderlich wären. Zur Behebung der vielfältigen Schadensbilder wurden zahlreiche Reparaturverfahren entwickelt, in begehbaren Kanälen werden jedoch in der Regel Injektions-, Abdichtungs- und Beschichtungsverfahren eingesetzt. Welches der genannten Reparaturverfahren im Einzelfall auszuwählen ist, ist für die Netzbetreiber häufig unklar.

Bereits in den 80er Jahren wurde in Frankreich das zerstörungsfreie Prüfverfahren mit der Bezeichnung „MAC - Methode d'Auscultation des Conduits“ [2] entwickelt, dass in derartigen Fällen eine sinnvolle Alternative darstellt. Anhand von Druckzylindern an der Prüfeinheit werden im Kanal Verformungen erzeugt und gemessen und so die Steifigkeit des Rohr-Boden-Systems ermittelt. Ein Übertrag der Daten in ein FE-Berechnungsprogramm liefert dann die Standsicherheitsbeurteilung. Während die Prüfeinrichtung von den Pariser Wasserbetrieben „EAU DE PARIS“ seit 1989 erfolgreich eingesetzt wird, ist auf dem deutschen Markt bisher kein derartiges System zur Standsicherheitsbeurteilung verfügbar.

Dies nahm das IKT zum Anlass auf Grundlage der Erfahrungen aus Paris eine Prüfeinheit zur Standsicherheitsanalyse zu entwickeln, die explizit auf die Anforderungen der deutschen Netzbetreiber ausgerichtet ist.

## 2 Zielstellung und Vorgehensweise

Zielstellung des Projektes ist es, auch für die besonderen rechtlichen und technischen Anforderungen des deutschen Marktes in Orientierung an die französische MAC-Prüfeinrichtung bei Auswahl und Nutzung geeigneter, neuer, aktueller Technik ein Prüfverfahren zu entwickeln, mit deren Hilfe zerstörungsfrei Standsicherheitsbeurteilungen von begehbaren Abwasserkanälen auch mit einer Nennweite von  $\leq$  DN 1500 vorgenommen werden können. Hierbei sollen u. a. die im DWA-Regelwerk aufgeführten Anforderungen berücksichtigt werden, da ein Analogieschluss zwischen den bodenmechanischen Modell der „Steifigkeit bei Mikrodeformationen“ (siehe Kapitel 3.5) zu dem empirisch begründeten Bodenmodell in Deutschland nach ATV A 127 derzeit noch nicht möglich ist.

Im Einzelnen wurde folgende Vorgehensweise zur Erreichung dieser Zielstellung gewählt:

Zunächst wurde der **Stand der Technik** bei der Prüfung mit dem MAC-Verfahren analysiert (vgl. Kapitel 3). Sodann wurden die einzelnen **Untersuchungsschritte** bei einer Prüfung mit dem MAC-Verfahren zusammengestellt (vgl. Kapitel 4).

Im Rahmen der **Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung** wurde auf den Einsatz von jenen Techniken, die einen halbautomatischen Betrieb ermöglichen, besonderen Wert gelegt, da hierdurch die Arbeitsabläufe bei der Prüfung vereinfacht und die Prüfungsgeschwindigkeit entsprechend erhöht werden sollen (vgl. Kapitel 5).

Begleitend zur Weiterentwicklung wurden **Praxiseinsätze** mit dem Gerät durchgeführt. Im Vorfeld wurden zudem Einsätze mit dem französischen Gerät inhaltlich und wissenschaftlich begleitet, um daraus wichtige Erkenntnisse über die Konzeption und Anwendung der Prüfeinheit zu gewinnen. Die Praxistauglichkeit der neuentwickelten Prüfeinrichtung für den Einsatzbereich unterhalb von DN 1500 wurde bei einem Kanalnetzbetreiber überprüft. Ergänzt wurde das Prüfprogramm durch weitere Testeinsätze insitu und Prüfungen an einem Testrohr in der Versuchshalle des IKT (vgl. Kapitel 6).

Basierend auf den Testeinsätzen soll eine **fachliche Einordnung der Prüfergebnisse** aus bodenmechanischer und bautechnischer Sicht vorgenommen werden (vgl. Kapitel 7). Hier werden insbesondere Möglichkeiten zur statischen Berechnung vorgestellt.

Abschließendes Ziel des Projektes, ist die Erarbeitung eines **Konzeptes zur Standsicherheitsanalyse** mithilfe der Prüfergebnisse des MAC-Verfahrens. Zudem sollten anhand der festgestellten Schadensbilder und den Ergebnissen aus den Standsicherheitsbeurteilungen Rückschlüsse und Hinweise auf im Einzelfall geeignete Reparaturverfahren zu ziehen sein (vgl. Kapitel 8).

### 3 Stand der Technik – MAC-Verfahren

#### 3.1 Einleitung

Die Wasserversorgung von Paris EAU DE PARIS entwickelte in den späten achtziger Jahren das MAC-Prüfverfahren für Großprofil-Kanäle und Wasserleitungen. Das Verfahren wird seitdem von den Wasserversorgern der französischen Großstädte Paris, Lyon und Bordeaux erfolgreich in einem Nennweitenbereich von größer als DN 1500 eingesetzt.

Olivier Thépot von Eau de Paris war maßgeblich an der Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Beurteilung der (Rest-) Standsicherheit von begehbaren Kanälen und Sammlern beteiligt ([3], [4]). Im Folgenden wird die Veröffentlichung [5] vollständig zitiert, in der das Prüfsystem MAC (Mechanical Assessment of Conduit) erläutert und die Anwendung anhand von Fallbeispielen vorgestellt wird.

Das MAC-Prüfsystem ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren für die Diagnose von begehbaren Sammlern und Durchlässen. Es wird von der Pariser Wasserversorgungsgesellschaft EAU DE PARIS seit 1989 angewendet. Das MAC-Prüfverfahren wurde in Frankreich bereits vielfach angewendet (Paris, Lyon, Bordeaux) und wird von der French Tunneling and Underground Space Technology (AFTES) für die Beurteilung von Rehabilitationsmaßnahmen empfohlen (Mörtel- und Spritzbetonverfahren). Mehr als 40 km Sammler werden pro Jahr mit dieser Technik geprüft.

Das Verfahren, das für die Beurteilung von größeren Nennweiten geeignet ist, besteht aus den folgenden Schritten:

**Inspektion:** Die Inspektion großer Sammler erfolgt üblicher Weise durch Begehung. Schäden werden identifiziert und beurteilt. Inspektionen durch Begehung ermöglichen die Sammlung von Informationen aus erster Hand und detaillierte Informationen zu den Schäden.

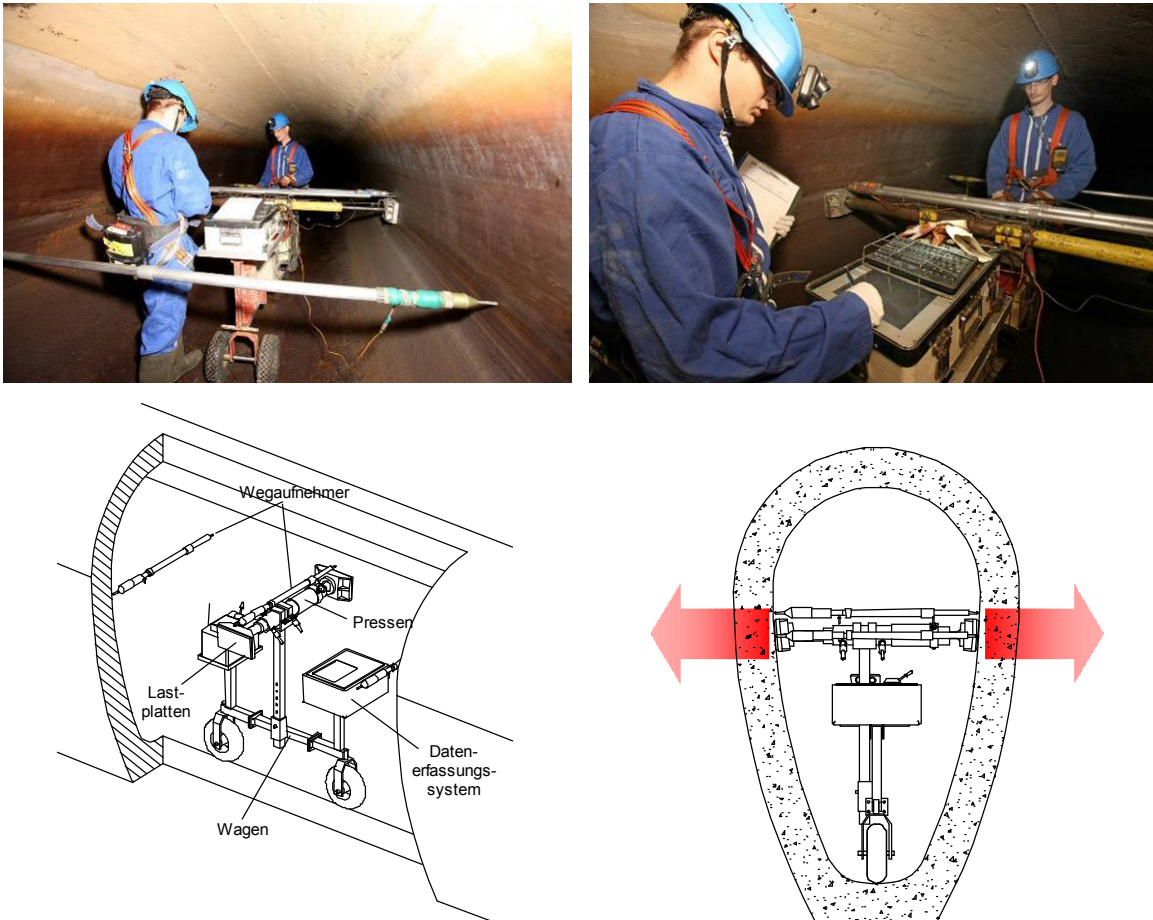
**Versuch:** Kontinuierliche Prüfungen mit nicht zerstörenden Verfahren (z. B. MAC-Verfahren oder Bodenradar) werden mit lokalen zerstörenden Techniken (Bohrungen) kombiniert, um die Integrität der Sammlerwand und der Stützung durch den umgebenden Boden zu erkunden.

**Beurteilung:** Die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit werden aus den Inspektionsdaten und den Versuchsergebnissen beurteilt.

**Empfehlung von Rehabilitationstechniken:** Abschließend werden Rehabilitationsmaßnahmen geplant. Mörtel- oder Spritzbetonanwendung sowie Lining (GFK-Kurzrohre oder Schlauchlining) sind die wesentlichen Rehabilitationstechniken.



### 3.2 Beschreibung des MAC-Prüfsystems



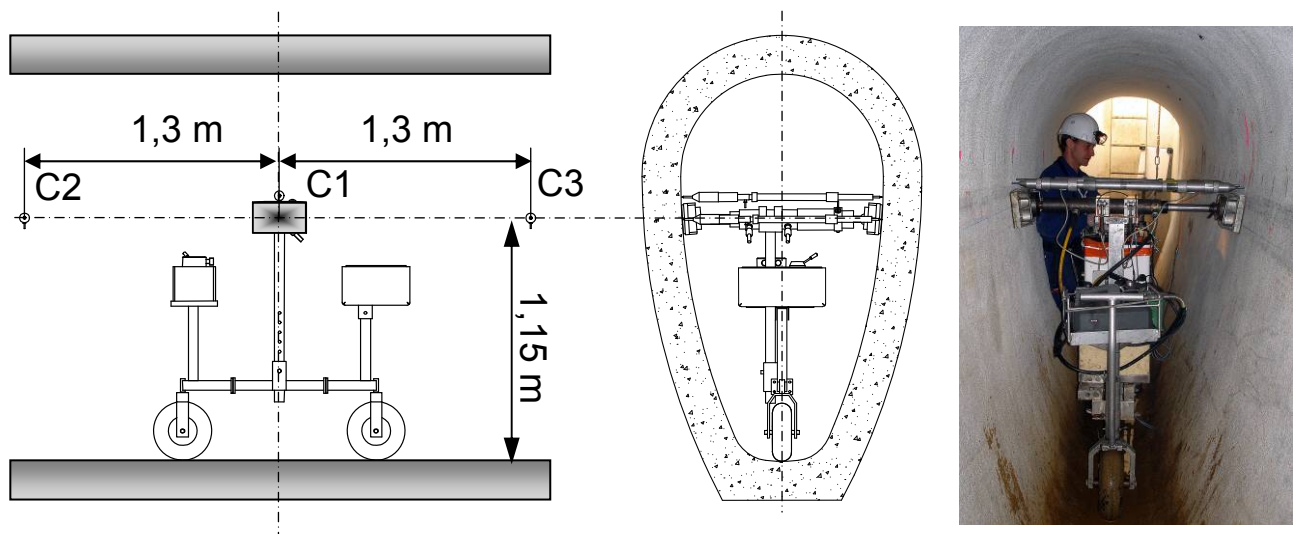
**Bild 1** Das MAC-Prüfsystem

Das MAC-Prüfsystem besteht aus den folgenden Teilen (s. Bild 1):

- ein mechanisches Belastungssystem mit einer hydraulischen Presse, das über zwei Lastplatten zyklische Lasten in zwei entgegengesetzte Richtungen erzeugen kann;
- mehrere Wegaufnehmer, die auf Stäben montiert sind;
- ein System zur Erfassung der Messdaten;
- ein Wagen zum Verfahren der MAC-Prüfeinrichtung.

Die MAC-Prüfeinrichtung hat eine variable Geometrie und kann dadurch an alle Sammlerformen angepasst werden.

Der Sammler sollte die folgenden Abmessungen aufweisen: Mindestbreite 0,8 m, Mindesthöhe 1,5 m, die Maximalabmessung beträgt 4 m.



**Bild 2** Das MAC-Prüfsystem in einem eiförmigen Sammler

Bild 2 zeigt den Versuchswagen in Arbeitsposition. Die Hydraulische Presse und die Lastplatten sind in horizontaler Richtung angeordnet. Die Wegaufnehmer werden danach in die folgende Position gebracht:

- Die Hauptwegaufnehmer werden horizontal über den Belastungsplatten angeordnet (Punkt C1 in Bild 2).
- Zwei "dreidimensionale" Wegaufnehmer werden horizontal und symmetrisch zu den Hauptwegaufnehmern in einer Entfernung von 1,3 m angebracht (Punkte C2 und C3).

Die Versuche werden in regelmäßigen Intervallen durchgeführt (z. B. alle 10 m). Falls erforderlich können die Abstände jedoch in Abhängigkeit von den Ergebnissen der zurückliegenden Station verringert werden: Die Kurven und die Werte der Steifigkeiten werden in Echtzeit auf dem Datenerfassungsgerät angezeigt. Die Gesamtdauer eines Versuchs einschließlich der Einrichtungszeit beträgt ca. fünf Minuten.

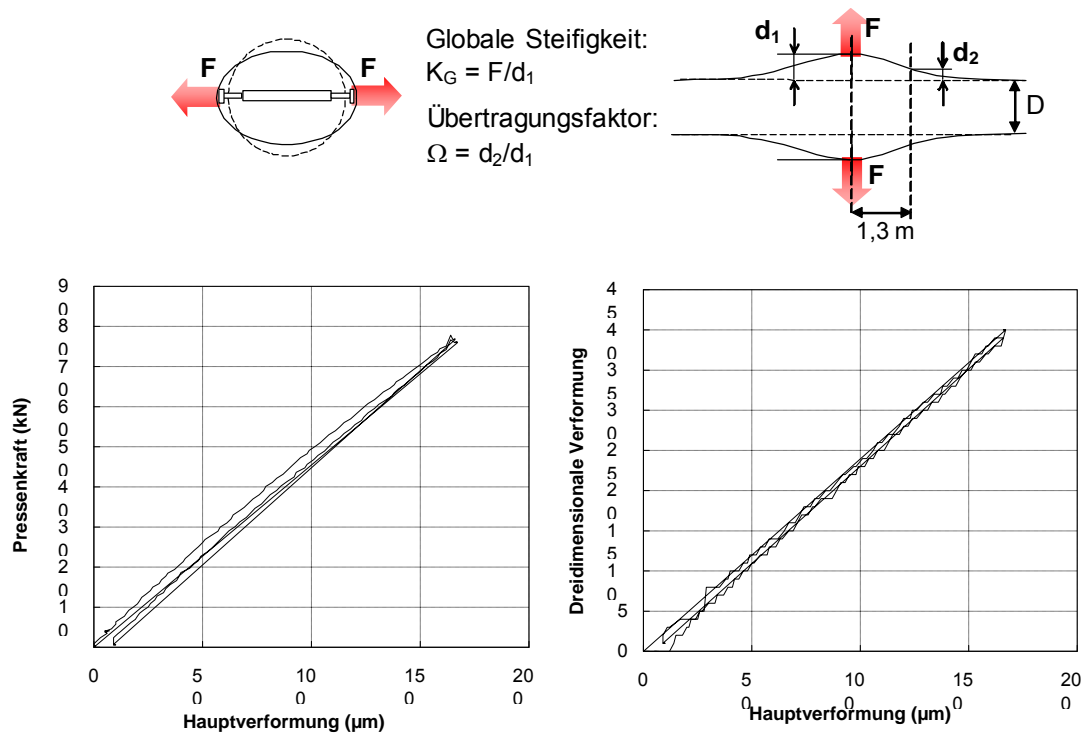


Bild 3 Versuchsergebnisse: Hauptverformungs- und 3D-Verformungskurve.

Die Pressenkraft liegt zwischen 0 und 100 kN. Die Verformung des horizontalen Durchmessers ist auf 0,025 % oder 300  $\mu\text{m}$  (der kleinste Wert ist gültig) begrenzt. Ein Test besteht aus zwei Belastungs- und Entlastungszyklen, die Belastungsgeschwindigkeit liegt bei 20 kN/s. Der innere Pressendruck verursacht eine dreidimensionale Verformung. Es werden jeweils vier Messergebnisse kontinuierlich aufgezeichnet:

- Die Druckkraft, die auf die Lastplatten wirkt.
- Die Verformung, die von dem Hauptwegaufnehmer gemessen wird, im Folgenden "Hauptverformung" genannt.
- Die beiden Verformungen, die von den dreidimensionalen Wegaufnehmern gemessen werden - im Folgenden "dreidimensionale Verformungen" genannt.

Diese vier Messungen ergeben zwei Grafiken: Die Kurve der Kraft über die Hauptverformung und die Kurve der mittleren dreidimensionalen Verformung über die Hauptverformung. Aus den beiden Kurven werden zwei Parameter berechnet:

**$K_G$ :** Die globale Steifigkeit, die gleich dem Verhältnis zwischen Kraft und Hauptverformung ist (genauer: die Steigung der Kraft-Verschiebungskurve).

**$\Omega$ :** Das Übertragungsverhältnis, das gleich dem Verhältnis zwischen der dreidimensionalen Verformung und der Hauptverformung ist (die Steigung der dreidimensionalen Verformungs-Hauptverformungskurve).

### 3.3 Statistische Auswertung, Bereichsermittlung, Probenahme

Zunächst werden die beiden Parameter (die globale Steifigkeit  $K_G$  und der Übertragungsfaktor  $\Omega$ ) statistisch ausgewertet. Dieser Prozess ermöglicht eine Analyse der Homogenität des Bauwerks und eine Aufteilung in Bereiche. Jeder Bereich wird damit durch Mittelwerte und Standardabweichungen charakterisiert (s. Bild 4).

Diese Anfangsuntersuchung ermöglicht die Identifikation von Bereichen, in denen sich die Sammlerstruktur homogen verhält.

Durch diese Zuordnung lässt sich die Zahl der Materialproben, die für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Struktur und den umgebenden Boden benötigt werden, erheblich reduzieren. Dadurch wird sichergestellt, dass Auswahl und Prüfungen nur dort erfolgen, wo es erforderlich ist.

Die Charakterisierung und Identifikation der Materialien, aus denen die Sammlerstruktur und der umgebende Boden bestehen, werden für jede Zone im Labor durchgeführt. Als Minimum ist jedoch ca. alle 100 m eine Probe aus der Sammlerwand und dem umgebenden Boden vorzusehen.

Die Bohrungen ermöglichen zudem die Messung der Wanddicke, der Qualität der Struktur und der Eigenschaften des Sammler-Bodenüberganges (durch Endoskopie).

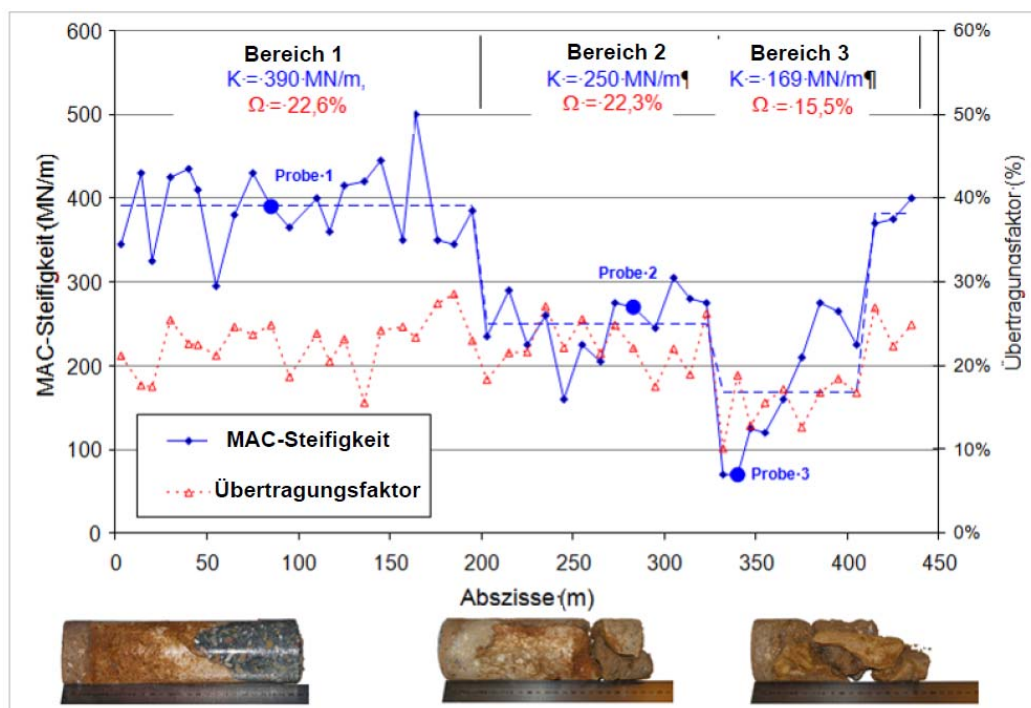


Bild 4 Verlauf der globalen Steifigkeit und des Übertragungsverhältnisses

### 3.4 Berechnung des Moduls von Struktur und Boden

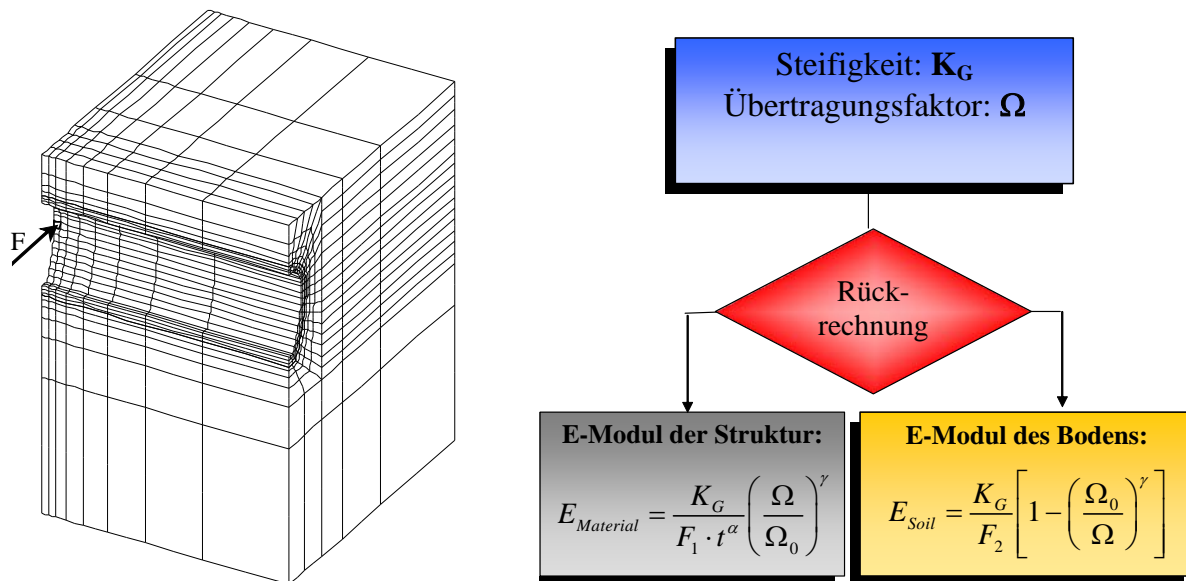


Bild 5 Finite Element Modell zur Rückrechnung des Elastizitätsmoduls des Bodens und der Sammlerstruktur.

Ist die Geometrie des Sammlers (seine Form und Wanddicke) bekannt, so ist eine Rückrechnung des E-Moduls des Bodens und des E-Moduls der Sammlerstruktur möglich.

Um die E-Moduln der Sammlerstruktur und des Bodens an die globale Steifigkeit und den Dämpfungsfaktor durch analytische Ausdrücke anzupassen, wird ein parametrisches Finite Element Modell verwendet. Diese analytischen Ausdrücke müssen für jede Sammlergeometrie ermittelt werden.

Die in situ gemessene globale Steifigkeit kann in erster Näherung als Summe der Steifigkeiten der Struktur allein und des Bodens betrachtet werden:

$$K_G = K_0 + K_{Soil}$$

Die Steifigkeit der Sammlerstruktur ohne Boden beträgt:

$$K_0 = F_1 \cdot E_M \cdot t^\alpha$$

mit  $t$  = Wanddicke

und  $E_M$  = E-Modul der Struktur

Der Exponent  $\alpha$  ist näherungsweise 2,5 und  $F_1$  ist ein Formparameter.

Die Steifigkeit des Bodens ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$K_{Soil} = F_2 \cdot E_S$$

mit  $E_S$  = Mikro-Verformungsmodul des Bodens

Der Mikro-Verformungsmodul ist deutlich höher als der Oedometer-Modul, der Faktor beträgt zwischen 10 bis 20. Er liegt in der Nähe des dynamischen Moduls.

$F_2$  ist ein weiterer Formparameter. Der Formparameter ist nur näherungsweise konstant. Er ist vom Verhältnis der Steifigkeit ohne Boden und der globalen Steifigkeit abhängig:

$$F_2 = F_{20} \cdot \left( \frac{K_0}{K_G} \right)^\lambda \quad (\lambda > 0)$$

mit  $F_{20}$  = tangentialer Formparameter  
 und  $\lambda$  = Formexponent.

Die folgende empirische Beziehung hat sich beim Einsatz der Finite Element Methode bewährt:

$$K_0 \cdot \Omega^\gamma = K_G \cdot \Omega_0^\gamma,$$

wobei  $\gamma$  ein Kopplungsfaktor und  $\Omega_0$  der Übertragungsfaktor des Sammlers ohne Boden ist. Der Wert  $\Omega_0$  bezeichnet eine obere Grenze, die unabhängig vom Modul des Sammlers ist.

Es gilt die folgende Beziehung:

$$\Omega < \Omega_0$$

Die Parameter  $F_1$ ,  $F_{20}$ ,  $\lambda$ ,  $\Omega_0$  und  $\gamma$  werden durch Anpassung der Finite Element Ergebnisse ermittelt (s. Bild 6). Sie sind eine Funktion der Geometrie der Struktur (Form und Wanddicke) sowie der Geometrie des MAC-Prüfsystems: Höhe der Druckkraft über der Sohle, Dimension der Lastplatten (von untergeordneter Bedeutung), Abstand zwischen Haupt- und 3-D-Wegaufnehmern.

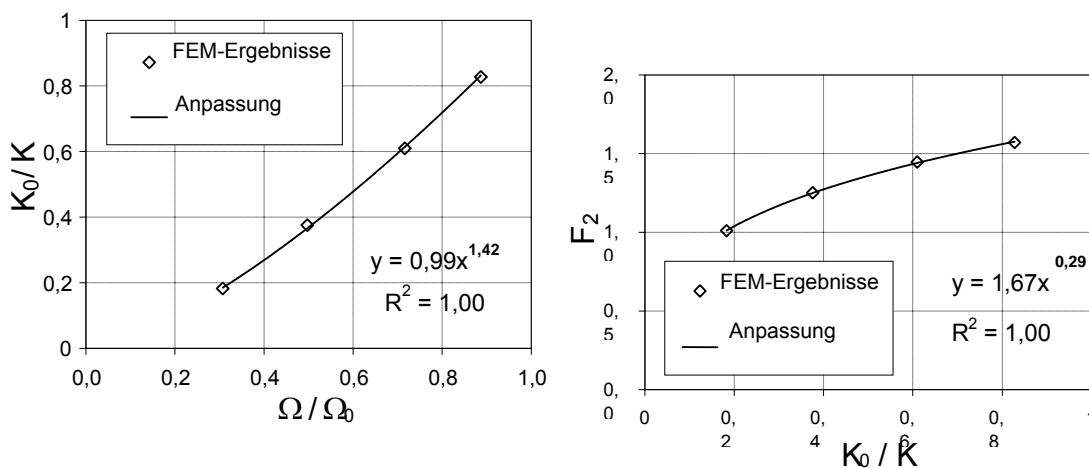


Bild 6 Anpassung der Finite Element Ergebnisse.

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Parameter für einen Sammler mit Eiprofil 2300x1300 und 200 mm Wanddicke angegeben:

Tabelle 1 Parameter für Sammler mit Eiprofil (1)

Eiprofil	$\alpha$	$F_1$	$F_{20}$	$\lambda$	$\gamma$	$\Omega_0$
2300x1300 mm	<b>2,5</b>	<b>0,84</b>	<b>1,67</b>	<b>0,29</b>	<b>1,42</b>	<b>43,7%</b>

Tabelle 2 Parameter für Sammler mit Eiprofil (2)

Material	Strukturmodul $E_M$ (MPa)	Boden Mikro-modul $E_S$ (MPa)	MAC Steifigkeit $K_G$ (MN/m)	Übertragungsfaktor $\Omega$ (%)
Mauerwerk	10000	0	<b>151</b>	<b>43,7</b>
		200	<b>247</b>	<b>21,7</b>
Beton	35000	0	<b>527</b>	<b>43,7</b>
		200	<b>820</b>	<b>32,0</b>

Zuletzt werden die E-Moduln der Sammlerstruktur ( $E_M$ ) und des Bodens ( $E_S$ ) mit den folgenden Gleichungen berechnet:

$$K_0 = K_G \cdot \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^\gamma, \quad E_M = \frac{K_0}{F_1 \cdot t^\alpha}, \quad F_2 = F_{20} \cdot \left( \frac{K_0}{K_G} \right)^\lambda, \quad E_S = \frac{(K_G - K_0)}{F_2}$$

Ist der Modul des Sammlerwerkstoffs bekannt, so kann dieser mit dem zugehörigen Modul eines Werkstoffs in gutem Zustand (d. h. ohne Alterung und Risse) verglichen werden. Damit ist eine Eingruppierung des Werkstoffs möglich.

Der Erwartungswert ist der bekannte Wert bei einem guten Sammlerzustand (aus der Literatur oder aus Erfahrung) oder der charakteristische Wert. Zum Beispiel gilt für

- Beton 30.000 bis 40.000 MPa,
- Mauerwerk 1000 bis 10.000 MPa, stark abhängig von der Bauart und Qualität.

Der Qualitätsindex Q wird nun als das Verhältnis zwischen berechnetem und erwartetem Modul bei gutem Zustand definiert (s. Bild 7).

Die Beurteilungskriterien sind:

- Bei einem Qualitätsindex kleiner als 0,1 ist der Materialzustand schlecht.
- Bei einem Qualitätsindex unter 0,3 und über 0,1 ist der Materialzustand mittelmäßig.
- Bei einem Qualitätsindex größer als 0,3 ist der Materialzustand zufriedenstellend bis gut.

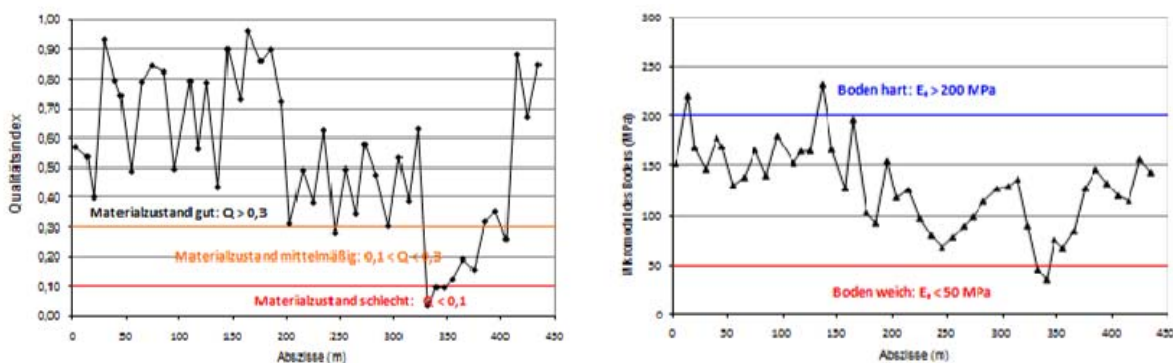


Bild 7 Darstellung des Werkstoffqualitätsindex und des Mikromoduls des Bodens.

Der Mikro-Verformungsmodul des Bodens hängt von vielen Faktoren wie der Bodenart, der Lagerungsdichte, der mittleren effektiven Spannung und der Spannungsgeschichte (Grad der Überkonsolidierung) ab. Für sandige Böden liegt der Mikro-Verformungsmodul in der Regel zwischen 50 bis 300 MPa.

Bei sandigen Böden gilt:

- Ist der Mikro-Verformungsmodul kleiner als 50 MPa, so ist der Boden weich.
- Ist der Mikro-Verformungsmodul höher als 200 MPa, so ist der Boden hart.
- Zwischen diesen beiden Grenzen ist der Boden mitteldicht gelagert.

Damit kann jeder Bereich durch die Mittelwerte des Qualitätsindex und des Bodenmoduls charakterisiert und in drei Zustandsgruppen (grün, orange, rot) für die Struktur und den Boden eingeteilt werden (s. Tabelle 3).

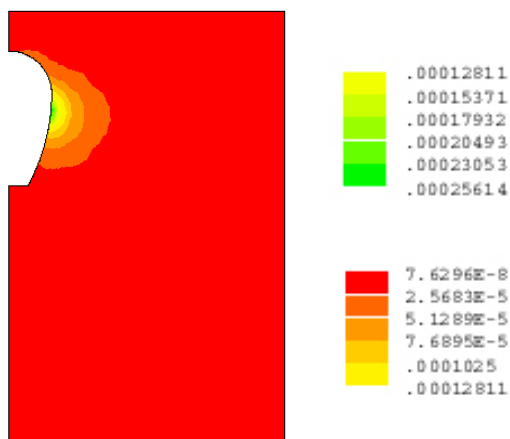
Tabelle 3 Zustandsgruppen in den Zonen

	Sammlerstruktur Mittlerer Qualitätsindex	Mittlerer Mikro-Verformungsmodul (MPa)
Zone 1: 0 bis 195 m	<b>0,72</b>	<b>159</b>
Zone 2: 195 m bis 322 m	<b>0,45</b>	<b>104</b>
Zone 3: 322 m bis 402 m	<b>0,18</b>	<b>92</b>

### 3.5 Der Micro-Verformungsmodul des Bodens und der MAC-Versuch

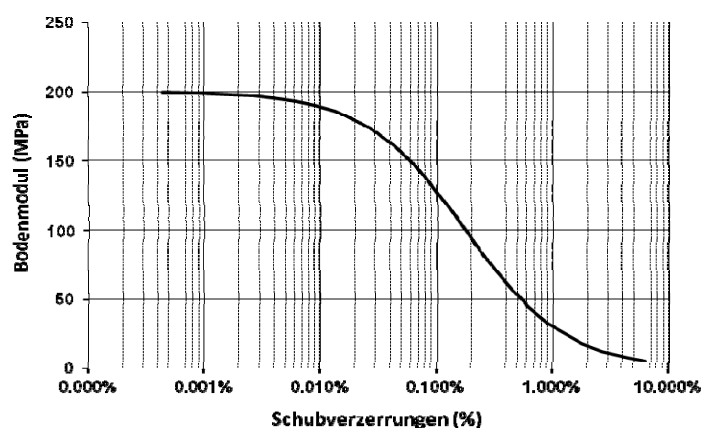
Die durch das MAC-Prüfsystem verursachten Bodenverzerrungen sind sehr gering (kleiner als 0,02%, vgl. Bild 8), daher liegt der berechnete Verformungsmodul in der Nähe des Moduls für kleine Dehnungen (auch Mikromodul genannt), der 10 bis 20 mal höher als der Bodenmodul im Oedometerversuch ist.





**Bild 8** Finite Element Simulation des MAC-Versuchs - der Boden erfährt sehr geringe Verzerrungen (< 0,02%).

Die Bodensteifigkeit wird erheblich durch Schubverzerrungen reduziert (s. Bild 9). Bei sehr kleinen Verzerrungen (unter  $10^{-5}$ ) kann das Bodenverhalten als elastisch angenommen werden, die Bodensteifigkeit ist nahezu konstant und liegt in der Nähe des dynamischen Moduls.



**Bild 9** Abnahme des Bodenmoduls infolge von Schubverzerrungen.

Der Mikromodul hängt im Wesentlichen von der Bodenart, dem Porenverhältnis und der mittleren Bodenspannung ab. In [6] wird ein allgemeines Gesetz für Böden mit einer plastischen Grenze unter 50% wie folgt vorgeschlagen:

$$E_{\mu} (MPa) = \frac{450}{e} \sqrt{p' (MPa)}$$

mit dem Porenverhältnis  $e$ ,  
 der mittleren effektiven Spannung  $p'$  in MPa und  
 dem Elastizitätsmodul für sehr kleine Dehnungen  $E_{\mu}$ .

Bei dicht gelagerten Sandböden ( $e = 0,4$ ) in einer Tiefe von 4 m ( $p' = 0,05$  MPa) ist  $E_{\mu} = 250$  MPa.

In der Vorschrift ATV-DVWK-A 127 [7] wird der Verformungsmodul durch die folgenden Beziehungen beschrieben:

$$E_B(\text{MPa}) = \frac{40}{G} \cdot e^{-0,188 \cdot (100 - D_{Pr})}$$

$$E_{B,\sigma} = E_B \cdot \left( \frac{p_E}{100} \right)^z$$

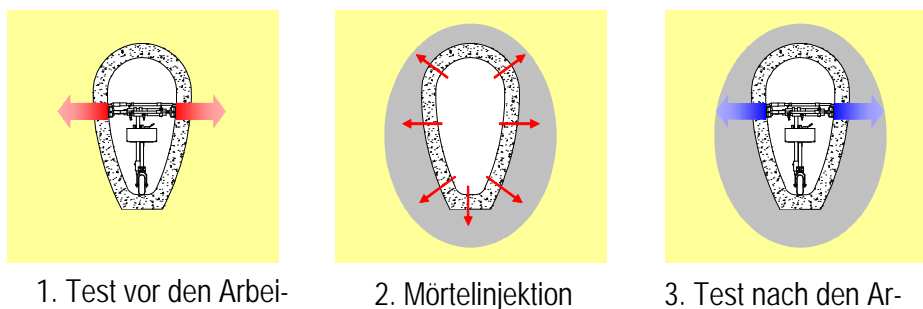
mit der Nummer der Bodengruppe  $G$  ( $G1$  für Kies o. Sand bis  $G4$  für pl. Ton),  
der Proctordichte  $D_{Pr}$  in %,  
der mittleren Spannung  $p_E$  in kPa und  
dem Exponenten  $z$  ( $0,5$  für Kies und Sand).

Der Verformungsmodul des Arbeitsblattes ATV-DVWK-A 127 [7] ist um den Faktor 10 bis 20 geringer als der Mikro-Verformungsmodul.

### 3.6 Anwendung des MAC-Prüfsystems

Für das MAC-Prüfsystem sind folgende Anwendungen möglich:

- Die wesentliche Anwendung besteht in der Identifikation von Bereichen, die als mechanisch homogen betrachtet werden können und die sinnvolle Positionierung von Bohrkernen zur Erkundungen der Sammlerstruktur und des umgebenden Bodens.
- Eine zweite Anwendung beruht auf der Zurückrechnung des Boden- und Strukturmoduls. Ziel ist die Beurteilung der Eigenschaften und der Qualität des Materials: Änderungen innerhalb der Sammlerstruktur oder Hohlräume sowie Auflockerungen im umgebenden Boden.
- Eine dritte Anwendung betrifft die Beurteilung von ausgeführten Sanierungsarbeiten wie z. B. Bodeninjektionen und Liningmaßnahmen: Werden die Ergebnisse der ersten Versuchsserie als Grundlage verwendet, so dient die zweite Serie mit Messungen an denselben Stellen dazu, die Erhöhung der Steifigkeit als Ergebnis der ausgeführten Rehabilitationsmaßnahmen nachzuweisen, vgl. Bild 10.



**Bild 10** Beurteilung der Rehabilitationsarbeiten mit dem MAC-Prüfsystem

### 3.7 Beurteilung der Auswirkungen von Mörtelinjektionen

Mörtelverpressungen sind eine sehr effektive Technik zur Rehabilitation von gemauerten Sammlern. In Frankreich wird dieses Verfahren bei 90% der Rehabilitationsmaßnahmen angewendet.

Der Mörtel (Wasser + Zemente + Sand + Bentonit) wird in der Nähe des Überganges zwischen Boden und Mauerwerk injiziert. Der Mörtel kann Hohlräume sowohl im Boden als auch im Mauerwerk verfüllen, wodurch Materialwiderstand und -steifigkeit verbessert werden, vgl. Bild 11.

Die Wirksamkeit der Mörtelinjektionen kann anhand der Zunahme der MAC-Steifigkeit (Material- und Bodenmodul) aber auch anhand der Verbesserung der Homogenität der Ergebnisse beurteilt werden, vgl. Bild 12.



Bild 11 Mörtelinjektionen in einem Sammler mit Eiqerschnitt.

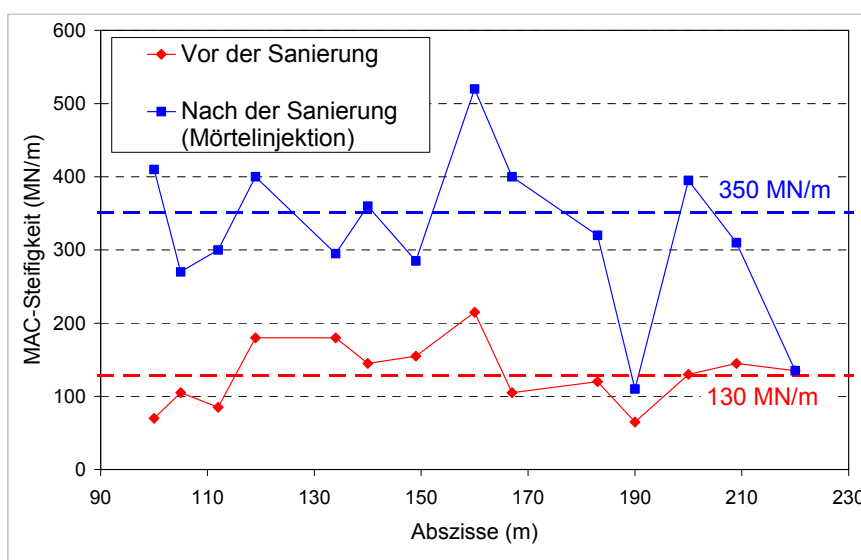


Bild 12 MAC-Steifigkeit vor und nach der Sanierung (Mörtelinjektion).

### 3.8 Beurteilung von Spritzbeton

Bei der Anwendung von Spritzbeton oder von vorgefertigten Linerrohren wird die Zunahme der globalen Steifigkeit ermittelt. Die Ergebnisse der in situ Messungen (Bild 13) werden mit den erwarteten Ergebnissen aus dem theoretischen Modell verglichen, vgl. Bild 14. In diesem Beispiel werden die Sammlersteifigkeit aus der ersten Untersuchungsserie und die Auswirkungen des hinzugekommenen Liners miteinander verglichen.



Bild 13 MAC-Versuche vor und nach der Sanierung (Spritzbeton).

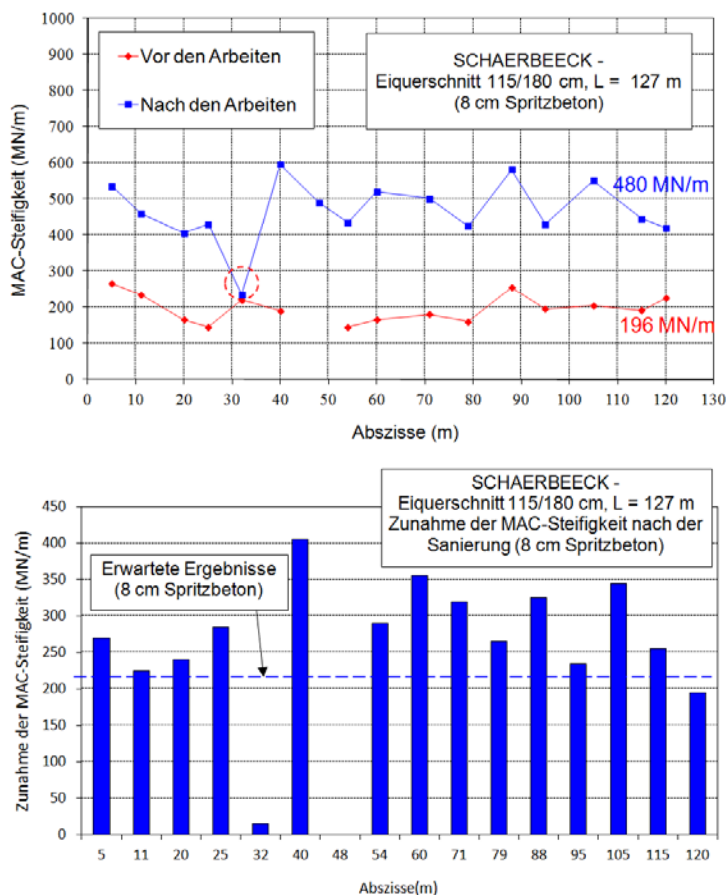


Bild 14 MAC-Steifigkeit vor und nach der Sanierung (Spritzbeton).

### 3.9 Bezug zur deutschen Vorschrift ATV-M 127-2

Das deutsche Konzept der Linerbemessung nach Merkblatt ATV-M 127-2 [8] beruht auf der Unterscheidung von drei Altrohrzuständen (s.a. [9]):

- Altrohrzustand I: undichter Sammler, starre Bettung des Liners im Sammler.
- Altrohrzustand II: gerissen und strukturell standsicher, starre Bettung des Liners durch vier verformte Altrohrscherben.
- Altrohrzustand III: gerissen und strukturell nicht standsicher, nachgiebige Bettung des Liners durch vier verformte Altrohrscherben (Bezeichnung nach ASTM-F 1216 [10]: „fully deteriorated“).

Die Altrohrzustände I und II werden nur für Grundwasser, das als Druck auf die Lineroberfläche wirkt, berechnet. Liegt der Altrohrzustand III vor, so wird die Interaktion des Boden-Sammlersystems berücksichtigt und eine zusätzliche Berechnung für Erd- und Verkehrslasten durchgeführt.



Bild 15 Betonsammler, wahrscheinlich Altrohrzustand III („fully deteriorated“)

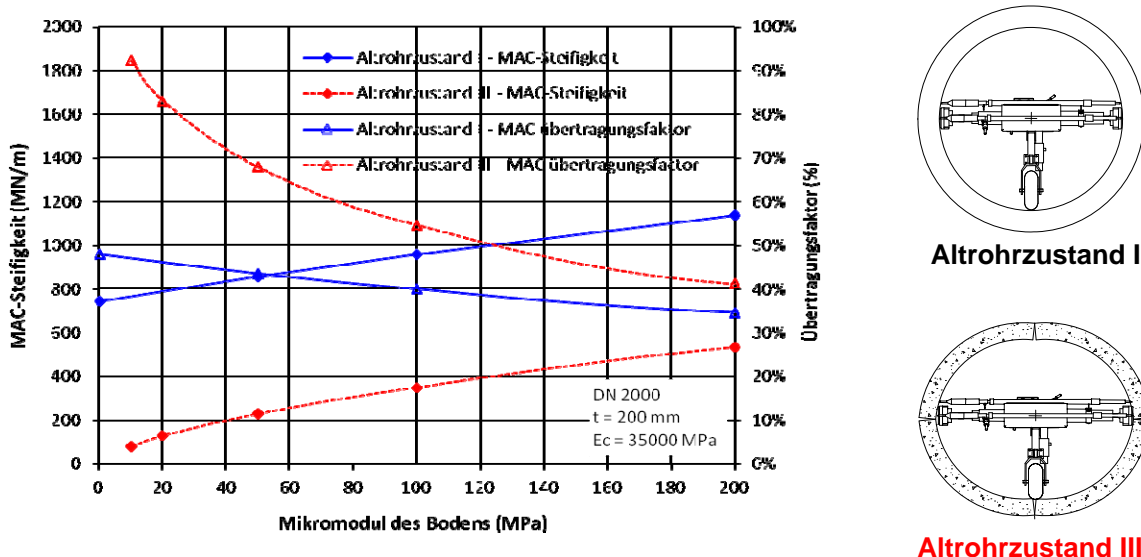


Bild 16 Finite Element Berechnungen der MAC-Versuche für ein Rohr im Altrohrzustand I und im Altrohrzustand III.

Durch die Simulation des MAC-Versuchs kann der Altrohrzustand III leicht vom Altrohrzustand I unterschieden werden. Risse setzen die MAC-Steifigkeit stark herab, wobei der Übertragungsfaktor möglicherweise bis zur Obergrenze  $\Omega_0$  ansteigt.

Z. B. beträgt die MAC-Steifigkeit eines Betonsammlers DN 2000 im Altrohrzustand I mit 200 mm Wanddicke in einem mitteldichten Boden 960 MN/m, während die Steifigkeit desselben Sammlers bei Altrohrzustand III auf 350 MN/m abfällt (s. Bild 16). Der Übertragungsfaktor beträgt 40,1% für Altrohrzustand I und 54,7% für Altrohrzustand III (die Obergrenze für Altrohrzustand I beträgt 48%). Der Bodenmodul wird durch die folgende Gleichung, die für ein Betonrohr DN 2000 gilt, beschrieben:

$$E_s = K_G \times [-0,32 \times \ln(\Omega) + 0,095]$$

Das MAC-Prüfsystem trägt also dazu bei, Sammlerbereiche mit Altrohrzustand III zu lokalisieren (s. Bild 17).

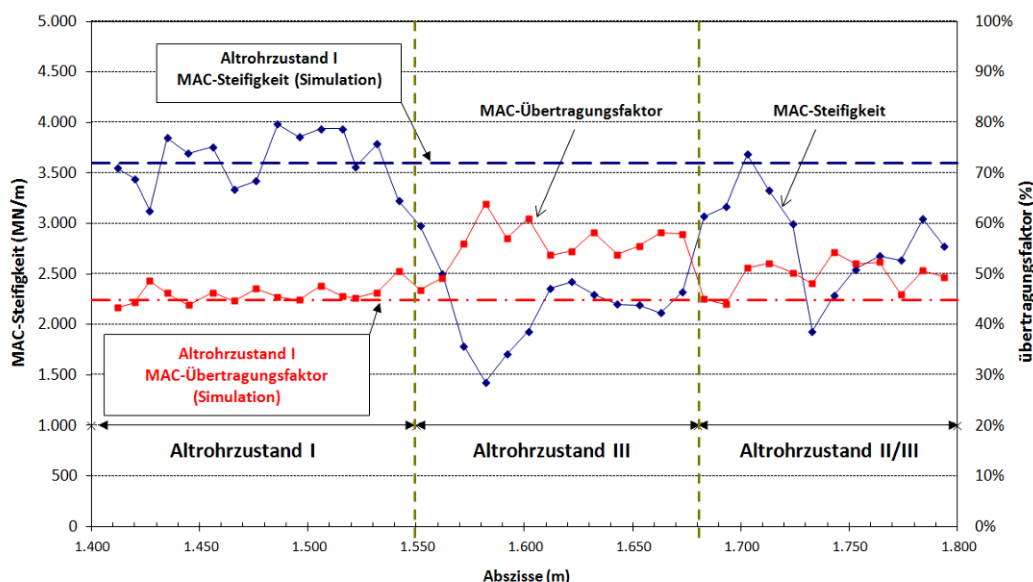


Bild 17 Kreisförmiges Betonrohr, bereichsweise Altrohrzustand III.

## 4 Untersuchungsschritte MAC-Verfahren

### 4.1 Verfahrensschema

Eine Standsicherheitsüberprüfung mit dem MAC-Verfahren beinhaltet mehrere Prozesse, die nacheinander abgearbeitet werden müssen, um einerseits eine Messung mit der Prüfmaschine durchführen zu können und andererseits aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten (Bild 18).

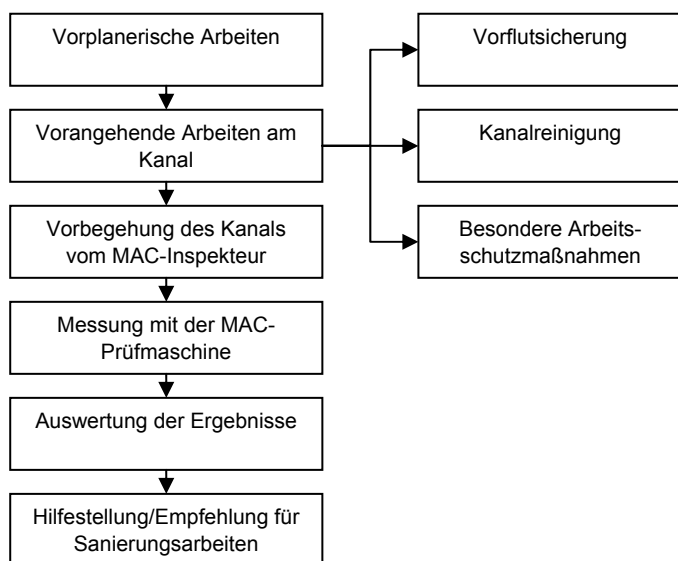


Bild 18 Verfahrensablauf mit dem MAC-Verfahren

Der Verfahrensablauf einer MAC-Untersuchung beginnt mit den vorplanerischen Arbeiten des MAC-Inspektors, indem er die örtliche Situation des Kanals beurteilt und das Kartenmaterial sowie die Erkenntnisse der Vorbegehung des Betriebsinspektors auswertet. Auf dieser Grundlage folgt eine Auswahl an vorangehenden Vorarbeiten, die notwendig sind, um eine MAC-Messung durchzuführen. Hierzu zählen die Kanalreinigung, die Vorflutsicherung und die Arbeitsschutzmaßnahmen, die bei dem jeweiligen Kanalabschnitt erforderlich sind.

Anschließend ist eine Vorbegehung des MAC-Inspektors notwendig. Diese kurze Inspektion bezieht sich auf die Vermessung des Kanals und die Markierung der Messstellen. Dabei muss besonders auf die Abmessungen des Kanals und die Werkstoffbeschaffenheit der Kanalwandungen geachtet werden.

Nach der Vorbegehung durch den MAC-Inspekteur kann die eigentliche Messung erfolgen. Während der Messung kann der Inspekteur aufgrund der Messergebnisse erste Aussagen über die Homogenität des Netzabschnittes treffen. Die ausführliche Analyse der Ergebnisse und die Berechnung der Werkstoffkennwerte erfolgen anschließend.

Darauf folgend kann der MAC-Inspekteur nach der Auswertung der Untersuchung Hilfestellungen und Empfehlungen für die Standsicherheitsanierung des Abwasserkanals geben.

Wird nach der Sanierung des Altröhres eine direkte Überprüfung mit der MAC-Prüfmaschine durchgeführt, verkürzt sich der Verfahrensablauf wie in Bild 19 dargestellt.

Es entfallen die zuvor erforderlichen Vorarbeiten, da viele Informationen bereits bekannt sind oder Arbeitsschritte wie die Kanalreinigung vor der Wiederinbetriebnahme nicht notwendig sind. Aus diesen Gründen beginnt die Sanierungsüberprüfung direkt mit der Vorbegehung des Kanals durch den MAC-Inspekteur. Anschließend erfolgt die erneute Messung der Standsicherheit.

Nach Auswertung der zweiten Messergebnisse ist es möglich, einen Vergleich zwischen der ersten Messung und der Messung nach der Sanierung durchzuführen. Hieraus wird klar ersichtlich, in welchen Bereichen die Standsicherheitsanierung des Kanals erfolgreich verlaufen ist und in welchen Netzabschnitten nachgebessert werden muss [11].

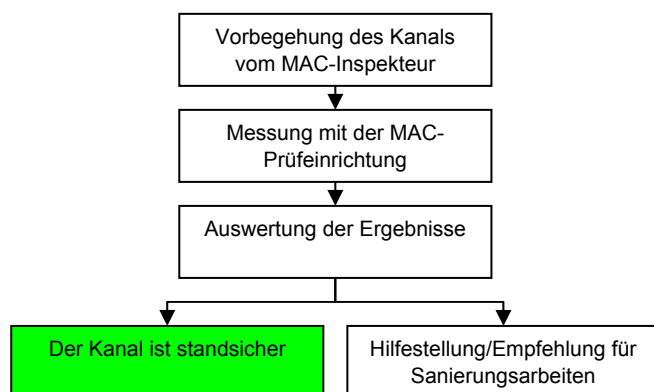


Bild 19 Verkürzter Verfahrensablauf nach Sanierungsarbeiten

## 4.2 Vorplanerische Maßnahmen

Die vorplanerischen Maßnahmen dienen hauptsächlich der Informationsermittlung für den MAC-Inspekteur. Es ist für die MAC-Untersuchung notwendig, dass sich der Inspekteur mit den örtlichen Gegebenheiten auskennt und über die Gefahren, die ihn erwarten könnten, unterrichtet wurde. Die hierfür erforderlichen Informationen sind vonseiten des Betreibers weiterzugeben. Unter anderem beziehen sich die Informationen auf folgende Punkte [12]:

- **Lagepläne:** maßstabsgetreu mit Darstellung des Trassenverlaufs, mit Haltingsbezeichnungen und Schachtnummern, mit Verkehrswegen und Flächen und anderen Bebauungen
- **Schächte:** Bezeichnung, Lage im Verkehrsraum, Abmessungen und Form der Schachttöpfung, Tiefe des Gerinnes und Geländeoberkante (GOK), ggf. Konstruktion



- **Haltung:** Bezeichnung, Länge, Nennweite und Profil, Material, ggf. Einzelrohrlänge, Gefälle, Baujahr, vorherige Sanierungen
- **Betriebszustand:** Abwasserart, ggf. besondere Abwasserzusammensetzungen, mittlere Fließverhältnisse, Reinigungsbedarf
- **Betriebspunkte:** Absperreinrichtungen, Pumpwerke, Kläranlage, Rückhaltebecken
- **Besonderheiten:** vorhandene Abstürze, besondere Einleitungen, Einbauten (Messeinrichtungen, Spülvorrichtungen), besondere statische Lasten (unter Bebauung, unter Verkehrswegen)

### 4.3 Erforderliche Vorarbeiten

#### Arbeitsschutzmaßnahmen

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 [13] 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 Standsicherheitsuntersuchung mit der 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 [11].

#### Kanalreinigung

Bevor mit einer Begutachtung der baulichen Substanz eines Kanalabschnittes begonnen werden kann, ist eine Reinigung des Kanalabschnittes erforderlich. Hierbei ist es wichtig darauf zu achten, dass der zeitliche Vorlauf der Reinigung in einem angemessenen Rahmen, im Regelfall 48 Stunden, gewählt wird, sodass sich keine gravierenden neuen Verschmutzungen an den Kanalwänden ablagern können. Es sollte ebenfalls in diesem Zusammenhang darauf geachtet werden, dass die Kanalwänden so gut es geht abgetrocknet sind [14].

Je nach vorhandenem Verschmutzungsgrad des Kanals ist die Intensität der Reinigung in dem Maße zu wählen, dass alle mit Hochdruckreinigung (HDR) lösbaren Verschmutzungen und Ablagerungen vollständig entfernt werden und eine umfängliche Inspektion des Kanalabschnittes möglich ist. [14]

Für die betriebliche Umsetzung des MAC-Verfahrens ist im besonderen Maße die Reinigung von Großprofilkanälen wichtig, da nur dort die MAC-Einheit eingesetzt werden kann [11].

#### Vorflutsicherung

Generell ist eine Messdurchführung in einem trockenen Profil oder einem Profil mit einem sehr geringen Wasserdurchfluss aufgrund der Messgenauigkeit zu empfehlen. Vibrationen, die durch den Abwasserstrom auf die Einheit übertragen werden können, würden hier vermieden, die Rutschgefahr für das Personal stark reduziert und die Messtechnik der Prüfeinrichtung geschützt.

Bei Arbeiten mit einem kontinuierlichen Abwasserstrom muss sichergestellt werden, dass der Abwasserstrom die Messtechnik der Prüfmaschine nicht erreicht. Die Bodenfreiheit der MAC-Maschine ist aus diesem Grund variabel einstellbar. Es muss hierbei allerdings auf die Restriktion des Kanaldurchmessers geachtet werden, da die Prüfung im Kämpferbereich des Kanalquerschnittes durchgeführt werden muss und durch eine Erhöhung der Bodenfreiheit ebenfalls die minimale Messhöhe vergrößert wird.

#### **4.4 Kanalvorinspektion**

Die Kanalvorinspektion durch den MAC-Inspekteur ist eine der wichtigsten Vorarbeiten bei dem MAC-Verfahren. Ohne Durchführung dieser Inspektion besteht zwar die Möglichkeit eine MAC-Messung durchzuführen, es kann allerdings nicht sichergestellt werden, dass die Untersuchungsergebnisse qualitativ aussagekräftig sind. Die Vorinspektion ist daher eine zentrale Maßnahme, die die Qualität der MAC-Messung garantiert.

Ziel bei der Kanalvorinspektion ist es, dass der MAC-Inspekteur einen Eindruck von dem zu untersuchenden Kanal erhält und einen Überblick über die zu untersuchenden Haltungen bekommt. Hierdurch ist es ihm anschließend möglich, die Prüfeinrichtung spezifisch für die örtlichen Gegebenheiten umzurüsten und bereits beschädigte oder besonders auffällige Kanalstellen zu identifizieren.

Ähnlich wie eine routinemäßige Begehung eines Kanalabschnittes ist eine Kanalvorinspektion für das MAC-Verfahren durch den MAC-Inspekteur vorzubereiten und zu planen. Dies bezieht sich zum einen auf die theoretische Vorbereitung, bei der eine Auswertung der vom Betreiber ausgehändigten vorplanerischen Informationen erfolgen muss [11].

#### **4.5 Durchführung der MAC-Messung**

In der Haltung des Kanals wird die MAC-Prüfeinrichtung zu dem in der Vorinspektion markierten Messstelle geschoben. Am Messpunkt angekommen, wird im ersten Schritt die Position des Druckzylinders angepasst. Hierbei sollte darauf geachtet werden,

dass die Zylinderachse auf dem markierten Messpunkt liegt. Die jeweilige Höhe des Druckzylinders kann durch den im MAC verbauten Elektrozyylinder individuell angepasst werden, sodass sich der Druckzylinder immer im Kämpferbereich des Kanalquerschnittes befindet.

Im nächsten Arbeitsschritt ist der Zylinder durch das Handsteuergerät auszufahren. Hierbei ist zuvor die Hydraulikgeschwindigkeit zu erhöhen, um in verkürzter Zeit mit den Lastplatten die Kanalwandungen zu erreichen. Ist die Breite des Sammlers an der Messstelle größer als die Länge des ausgefahrenen Zylinders, sind die Lastübertragungsplatten per Hand aus dem Druckzylinder herauszuschrauben.

Sind die Kanalwandungen durch das Ausfahren des Druckzylinders erreicht, wird der Druckzylinder so lange ausgefahren, bis das Handsteuergerät die erste Kraffeinleitung in die Seitenbereiche des Kanalquerschnittes verzeichnet. Der Zylinder hat sich nun an den Kanalquerschnitt angepresst, sodass der Elektrozyylinder zur Höheneinstellung des Druckzylinders heruntergefahren werden kann. Der Druckzylinder hängt nun entkoppelt von der MAC-Prüfmaschine in dem Kanalquerschnitt, sodass einerseits keine Vibrationen der Kraffeinleitung an die Prüfeinheit weitergegeben werden können und andererseits keine Kraft durch einen nicht genau horizontal hängenden Druckzylinder in den MAC-Fahrwagen eingeleitet werden kann.

Es folgt das Positionieren der Wegmessmodule (WMM). Es müssen drei an Teleskopstangen montierte WMM zwischen den Wandungen verspannt werden. Hierzu wird zunächst das hintere WMM befestigt. Hierbei wird die Teleskopstange herausgezogen und quer zum Kanalquerschnitt in die Wandungen gedrückt, sodass sich WMM an der Kanalwandung fixiert. Vorteil dieser WA-Positionierungstechnik ist die sehr hohe Variabilität, die sowohl in der Querschnittsform als auch in Abstandsvariation der Messstellen liegt. Sind die WMM sachgemäß und rutschfest an den Kanalwandungen angebracht, muss die zuvor erhöhte Geschwindigkeit des Druckzylinders reduziert werden.

Anschließend werden in der Regel drei Belastungen mit Verformungsmessung bis zu einer vorher definierten Weggrenze durchgeführt. Anschließend kann die MAC-Prüfeinrichtung zum nächsten Messpunkt umgesetzt werden.

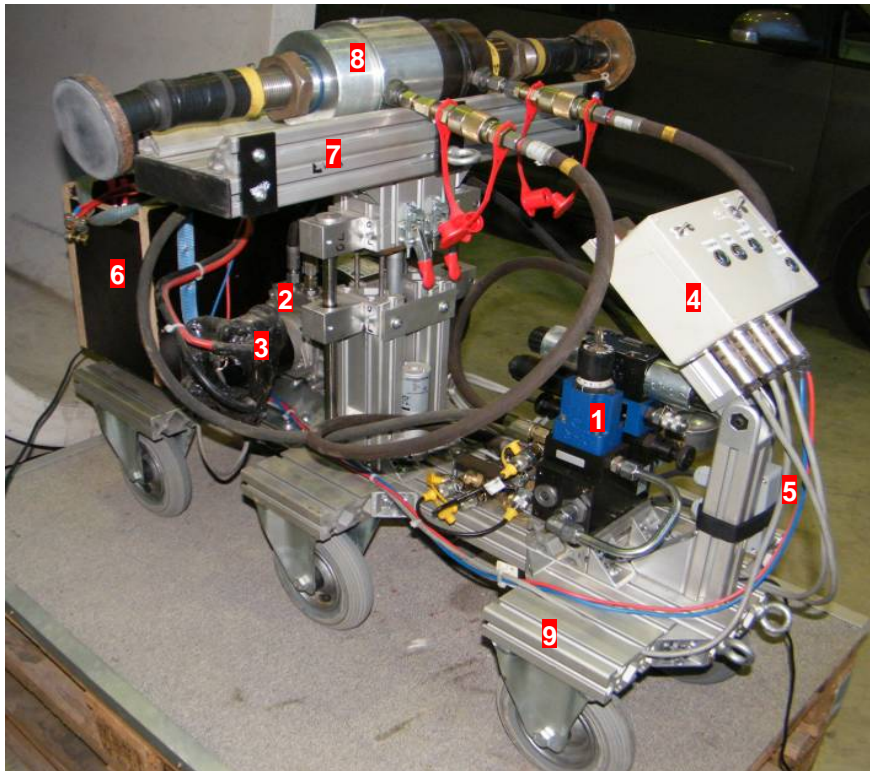
Hierzu werden zunächst alle WMM demontiert und in dafür vorgesehene Halterungen am MAC-Fahrwagen abgelegt. Bevor nun der Elektrozyylinder zu dem Druckzylinder hochgefahren wird, sollte die Position des Druckzylinders im Kanalquerschnitt gemessen werden. Hierfür müssen zwei Maße genommen werden, einmal der Abstand des Zylinders zur Kanalfirste und einmal der Abstand zur Kanalsole. Erfolgt auf Basis der Verformungsuntersuchung eine darauf folgende FE-Modellierung, sind diese Werte von enormer Wichtigkeit. Anschließend kann der Lasteinleitungszyylinder zusammengefahren und auf dem Elektrozyylinder abgelegt werden. Sind zuvor zur Breitenanpassung die Lasteinleitungsplatten herausgeschraubt worden, sollten diese im nächsten Arbeitsschritt zurückgedreht werden. Es folgt das Herunterfahren des Druckzylinders und die Prüfeinrichtung kann zur nächsten Messstelle vorgeschoben werden.

Aufgrund der Mitführung eines Handsteuergerätes mit Touchscreen ist es dem MAC-Inspekteur möglich, direkt im Kanal erste Erkenntnisse über die Homogenität des Großprofils zu erlangen, da die Messergebnisse des Messvorganges live auf dem Handheld angezeigt werden.

## 5 Entwicklung MAC-Prüfeinrichtung

### 5.1 Grundlagen

Die MAC-Prüfeinrichtung besteht aus drei Teilen. Dem Fahrwagen, der darauf montierten Hydraulik und den Messmodulen. Diese messen die aufgebrachte Zylinderkraft (Kraftmessdose), die daraus resultierenden Verformungen (Wegmessmodul) und die zur Verfügung stehende Versorgungsspannung (Steuerbox) (Bild 20).



- 1) Hydraulik
- 2) Pumpe
- 3) Motor
- 4) Steuerbox
- 5) Kraftmessdose
- 6) Batterie
- 7) Schlitten
- 8) Druckzylinder
- 9) Fahrwagen

*Bild 20 MAC-Prüfeinrichtung - Komponenten*

Der Fahrwagen ist in Modulbauweise gebaut und entwickelt worden. Hierdurch wird erreicht, dass spätere Umbaumaßnahmen sowie individuelle Anpassungen an den Kanalquerschnitt schnell und kostengünstig durchgeführt werden können. Um den Bau und den Umbau der Prüfeinheit noch weiter zu beschleunigen, sind Aluhohlkammerprofile mit einer Nuten-Schrauben-Technik verwendet worden. Hierdurch lassen sich individuelle, stabile und abwasserresistente Bausätze umsetzen.

Der Kern der MAC-Prüfeinrichtung ist der Fahrwagen. Er besteht aus einem großen Aluhohlkammerprofil. Es dient als Basis für alle Aufbauten und gleichzeitig als Grundplatte des Fahrwagens der Prüfeinrichtung. An ihr sind sechs luftbereifte Räder montiert. Die Radmontage erfolgt über rechteckige Nutenwinkel, sodass eine Höhenverstellung der Räder bei der Radmontage einfach und schnell umzusetzen ist.

Die weiteren Aufbauten, bestehend aus der Mechanik und Messtechnik, werden auf der Grundplatte des Moduls über die Nuten-Schrauben-Technik befestigt.

## 5.2 Mechanik

Der Hauptbestandteil der Prüfeinrichtung ist die Hydraulikanlage. Sie besteht aus mehreren Komponenten, die in bestimmter Weise zusammenwirken, um den Druckzylinder des Prüfsystems anzusteuern und zu betätigen. Die Funktionsweise des Hydraulik-Systems lässt sich anhand der folgenden Skizze (Bild 21) beschreiben.

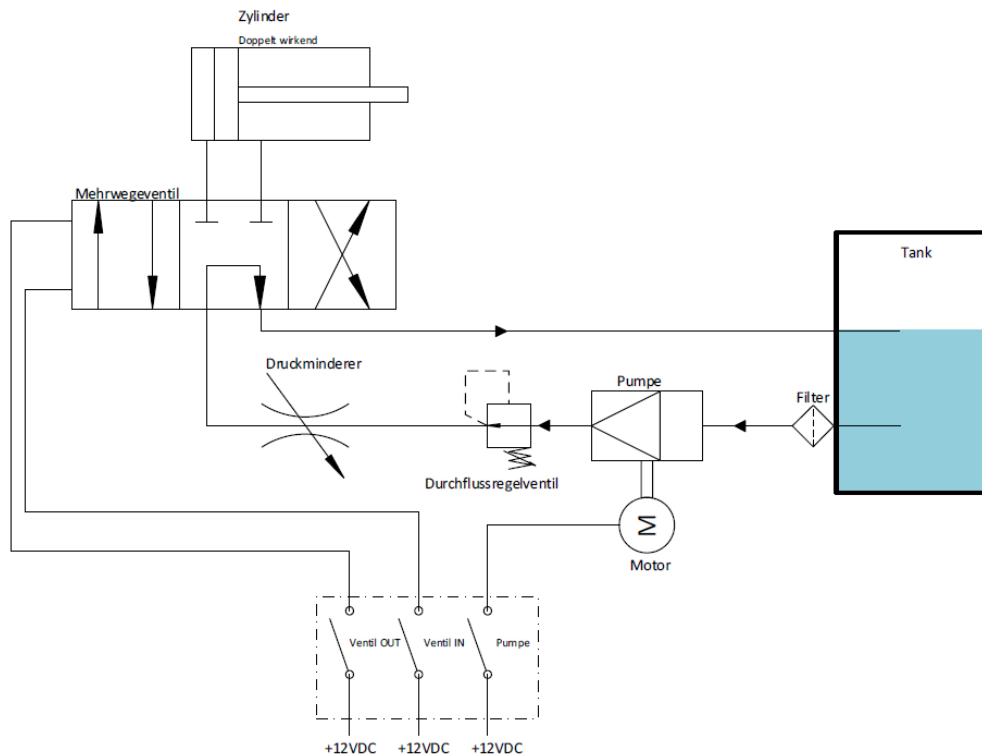


Bild 21 Hydraulisches Schaltbild mit Ansteuerung

Das sich im Tank befindende Hydrauliköl wird durch Betätigen der Hydraulikpumpe in ein Durchflussregelventil geführt, welches die Aufgabe besitzt, den Öldurchfluss konstant zu halten, sodass hierüber die Ausfahrgeschwindigkeit des Druckzylinders gesteuert werden kann. Wird das Durchflussregelventil aufgedreht, erfolgt ein erhöhter Durchfluss und der Druckzylinderkolben fährt schneller. Nachdem das Öl den Durchflussminderer passiert hat, gelangt es zu einem Druckminderer, der den maximalen Öldruck begrenzt. Von hier aus wird das Hydrauliköl in ein Mehrwegeventil geleitet, mit dem die Hydraulikanlage gesteuert wird. Hierbei gibt es drei unterschiedliche Schaltzustände. Im Schaltzustand LEERLAUF wird das Öl durch das Mehrwegeventil direkt in den Hydrauliktank geführt. Bei dem Schaltzustand OUT steuert das Ventil den Öldurchfluss so, dass das Öl auf der Druckseite des Zylinders eingeleitet und über die Zugsseite herausgeführt wird. Es entsteht hierdurch ein Druck auf den Zylinderkolben, der diesen ausfahren lässt. Um einen Zug auf den Zylinderkolben zu erzeugen, muss das Mehrwegeventil den Schaltzustand IN erhalten, sodass sich der Kolben zurückziehen kann. Über den gemessenen Öldruck kann die resultierende Druckkraft des Hydraulikzylinders berechnet werden.

Der am Grundmodul befestigte Elektrozyylinder besitzt die Aufgabe, den Druckzylinder über einen Schlitten in der Höhe zu verstellen, sodass die Messhöhe im Kanal indivi-

duell auf die Kämpferhöhe angepasst werden kann (Bild 22). Der Elektrozyylinder ist in einem Führungssystem aus verschiedenen Gleitstangen und Aluprofilen verbaut.

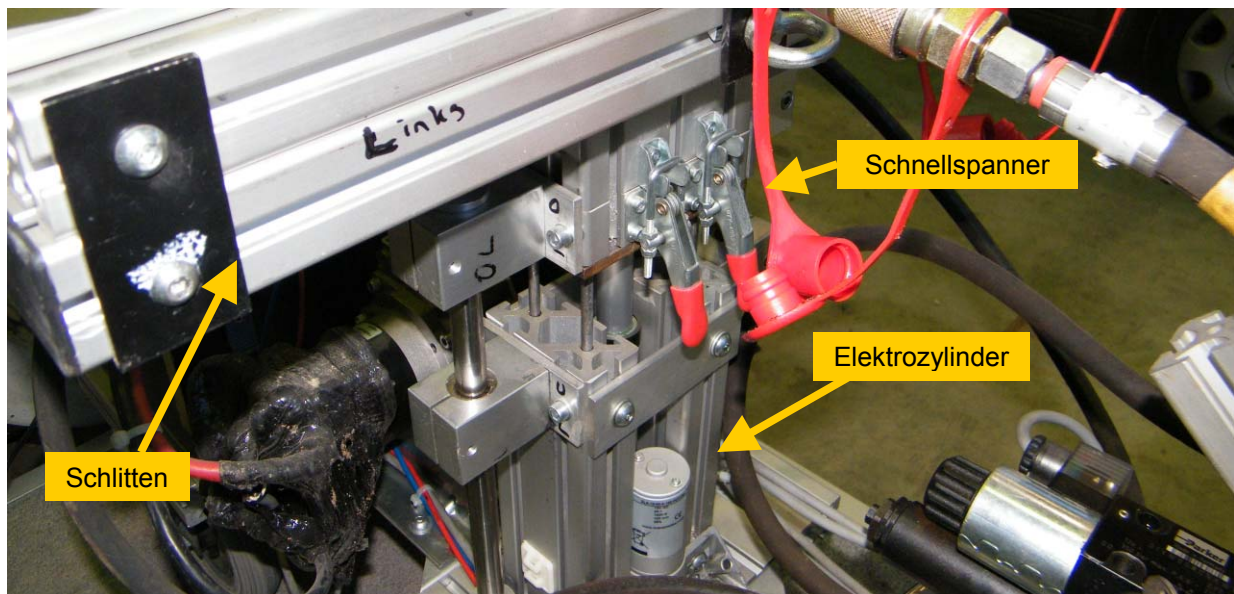


Bild 22 Höhenverstellung der Prüfeinheit

### 5.3 Messtechnik

Die Anforderung, die Prüfeinrichtung über Funk zu Steuern und die Messwerte der Sensoren direkt zu empfangen wurde mit Hilfe des ZigBit-Funksystems umgesetzt, welches über das Zigbee-Übertragungsprotokoll IEEE 802.15.4 kommuniziert. Zu realisieren ist folgendes Kommunikationssystem (Bild 23), welches eine Sternstruktur nachstellt. Die einzelnen Knoten bestehen dabei aus Koordinatoren oder Endgeräten. In jedem Netzwerk gibt es genau einen Koordinator, der durch das MAC-Steuermodul repräsentiert wird und Befehle an das End-Device Steuerbox sendet oder Messwerte der End-Devices Kraftmessdose, Wegmessmodul oder Versorgungsspannung empfängt.

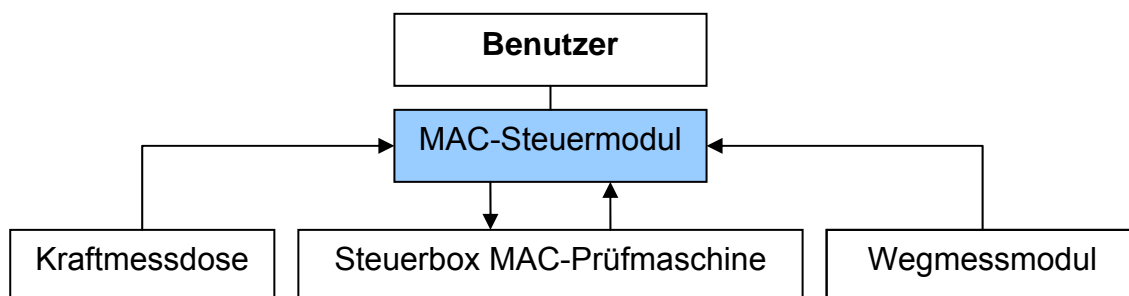
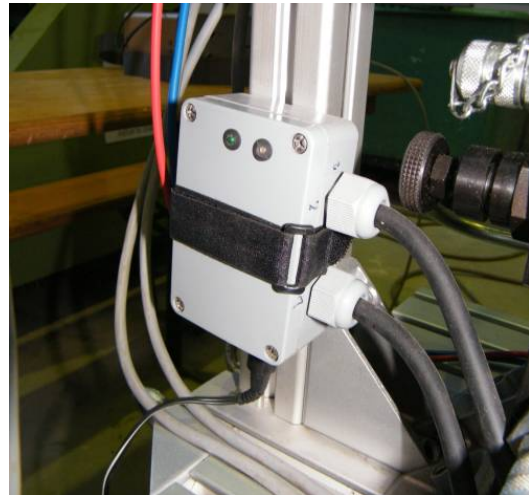


Bild 23 Schematischer Aufbau der Kommunikationslogik

Für die Druckmessung des Zylinders wird eine Kraftmessdose (Bild 24 rechts) und für die Messung des Abstandes zwischen den beiden Kanalinnenwänden werden Wegmessmodule mit eingebauten ZigBit-Funkmodulen eingesetzt. Sie finden Ihren Einsatz

als End-Device im Zigbee-Netzwerk. Betrieben werden die Module mit je einem 4 V Lithium-Ion Akku, der über eine nach außen geführte Buchse geladen werden kann.

Das Wegmessmodul (Bild 24 links) ist ein elektronisches Mess- und Funkmodul zur Signalübertragung einer Längenänderung. Für die Verformungsmessung des Abwasserkanals werden potentiometrische Wegaufnehmer verwendet.



*Bild 24 Wegmessmodul (links) und Kraftmessdose (rechts)*

Zur Steuerung der Prüfeinrichtung bestehen zwei Möglichkeiten. Die **manuelle Steuerbox** befindet sich direkt an der Prüfeinheit (Bild 25 links). Sie fungiert als halbautomatische Steuereinheit für den Druckzylinder, den Elektrozyylinder sowie als Notauschalter. Sie besitzt jeweils einen Taster für das Ein- und Ausfahren des Zylinders und einen Taster für den Betrieb der Pumpe. Eine Zylinderfahrt ist nur bei gleichzeitigem Drücken des Tasters Pumpe und dem jeweiligen Taster für Ein- oder Ausfahren möglich. Dies dient der Verriegelung vor unabsichtlicher Betätigung eines Tasters durch den Bediener. Durch die Taster Ein- und Ausfahren öffnen sich die Ventile. Über den Elektrozyylinder findet die Höhenverstellung des Druckzylinders statt, welcher über einen Kippschalter für die Fahrrichtung und einen Taster für den Bewegungsvorgang zu steuern ist. Die manuelle Steuerbox kommt ohne Drahtlose Kommunikation aus, sodass eine direkte Steuerung der Hydraulik möglich ist. Dies ist nur der Fall, wenn der Kippschalter auf H (Halbautomatik) steht. Wird er in die Stellung A (Automatik) gebracht, findet die Steuerung der MAC-Prüfeinrichtung über das MAC-Steuermodul statt. Dazu ist in der manuellen Steuerbox zusätzlich ein Funkmodul eingebaut, welches die Befehle zum Fahren der Hydraulik empfängt und weiterleitet.





Bild 25 manuelle Steuerbox (links), MAC-Steuermodul (rechts)

Die Hauptsteuerung der Maschine erfolgt kabellos über das **Handheld-Steuerungsgerät** (Bild 25 rechts), in dem sich ebenfalls die halbautomatische Steuerung des Prüfverfahrens befindet. Alternativ kann ein Notebook mit einem über USB angeschlossenen Koordinator eingesetzt werden.

Zum einfacheren Verständnis zeigt Bild 23 den schematischen Aufbau der Kommunikationslogik. Ein Benutzer startet das MAC-Steuermodul und weist die End Device Nummer der Kraftmessdose, der Wegmessmodule und der Steuerbox der jeweiligen Aufgabe zu. Nach erfolgreichem Start des im Steuermodul integrierten Koordinators werden die End Devices für die zu messenden Parameter Kraft, Weg und Spannung dazu geschaltet. Die Reihenfolge muss eingehalten werden, damit sie sich erfolgreich am Koordinator anmelden und ihm ihre Daten über das ZigBee-Protokoll schicken können. Lediglich die Steuerbox empfängt zum Schalten der Hydraulik Befehle.

Empfangene Daten der End Devices werden mit dem Handheld-Steuerungsgerät direkt ausgewertet, auf dem Display als numerische Werte angezeigt und in einem Verformungsdiagramm dargestellt. Für eine exakte Auswertung wird eine Vielzahl an Datensätze der Messwerte benötigt. Durch das kurze Speicherintervall werden diese zeilenweise in eine Datei geschrieben und zur weiteren Analyse auf einer SD-Karte gespeichert.

## 5.4 Gefährdungsbeurteilung

### 5.4.1 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. können nicht abgedeckte Schneckenhebwerke je nach Bauform beispielsweise als Anlagen-

teile 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 26.

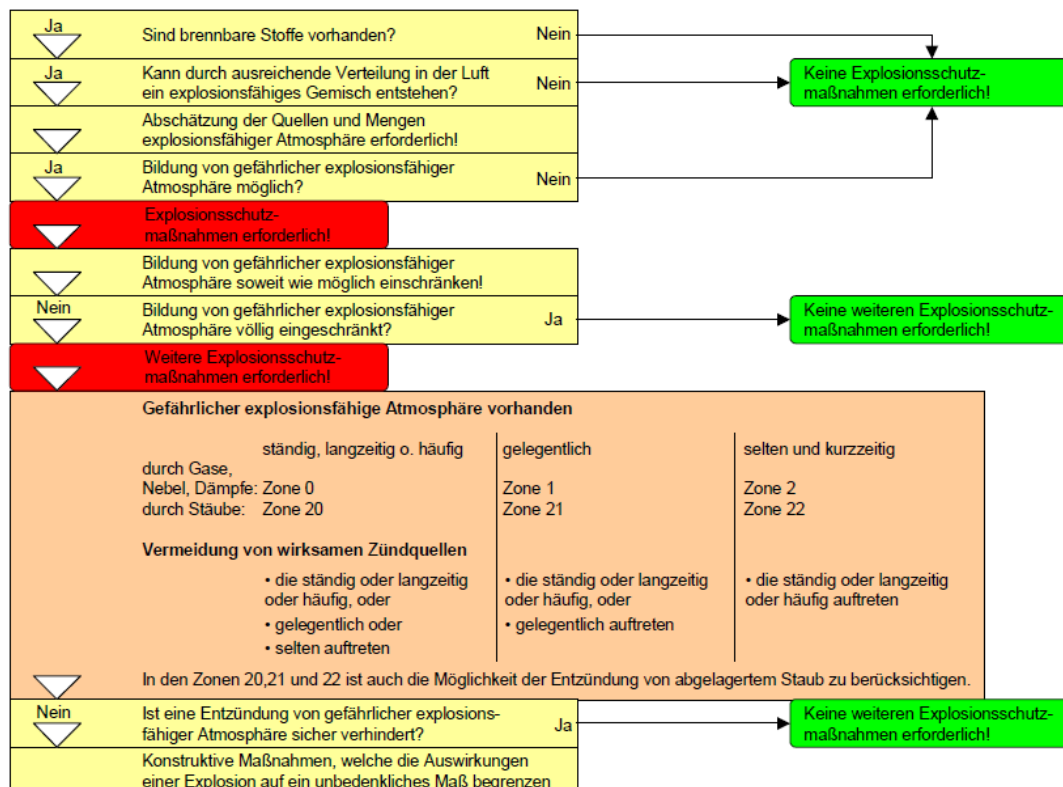


Bild 26 Ablaufschema zur Beurteilung der explosionsgefährdung und Festlegung von Schutzmaßnahmen [15]

Grundsätzlich hat die Vermeidung des Auftretens g. e. A. (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 [15].

### 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 Anlagen oder kurzzeitige Nutzungsänderung von Anlagenteilen (Zwischenlagerung von Klärschlamm etc.) erfordern eine einzelfallbezogene Beurteilung [15].

### 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 [15].

### 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 [15].

Tabelle 4 Sicherheitstechnische Kennwerte relevanter Stoffe [15]

	Explosionsgrenzen in Luft [Vol.-%]	Zündtemperatur [°C]	Relative Dichte (Luft=1)	Flammpunkt [°C]	Temperaturklasse	Explosionsgruppe	Max. Expl.-druck [bar]
Faulgas	70% CH <sub>4</sub> 30% CO <sub>2</sub>	4,4 – 14,0	> 595	0,85		T 1	IIA
	60% CH <sub>4</sub> 40% CO <sub>2</sub>	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

### 5.4.2 Zündquellen

Zündquellen werden in der Praxis häufig als solche nicht erkannt oder unterschätzt. Deshalb ist es notwendig sich mit Ihnen und geeigneten Schutzmaßnahmen eingehend zu befassen. Sie sind im Abschnitt E 2 der BGR 104 [16] ausführlich dargestellt [15]. Es werden mechanisch und elektrisch erzeugte Zündquellen unterschieden. Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen eine Auswahl mechanisch und elektrisch erzeugter Zündquellen.

Tabelle 5 Zündschutzarten (mechanisch) nach EN 1127-1 [17]

Zündquelle	Zündvorgang
Funken	Mechanisch erzeugte Funken (z.B. durch Reib-, Schlag- oder Abtragvorgänge), elektrische Funken
Lichtbögen	Kurzschluss, Schaltvorgänge
Heiße Oberfläche	Heizkörper, spanabhebende Bearbeitung, Erwärmung im Betrieb
Flammen und heiße Gase	Verbrennungsreaktionen, Funkenflug bei Schweißarbeiten
Adiabatische Kompression und Stoßwellen	Schlagartiges Öffnen von Ventilen
Exotherme Reaktionen	Chemische Reaktion führt zur Erwärmung

Tabelle 6 Zündschutzarten (elektrisch) nach EN 1127-1 [17]

Zündquelle	Zündvorgang
Elektrische Anlagen	Öffnen/Schließen von Kontakten, Wackelkontakt Schutzkleinspannungen ( $U < 50V$ ) sind keine Maßnahme des Explosionsschutzes. Es kann auch bei kleinen Spannungen noch genügend Energie erzeugt werden, um eine explosionsfähige Atmosphäre zu entzünden.
Statische Elektrizität	Entladung aufgeladener, isoliert angeordnete leitende Teile, bei z.B. vielen Kunststoffen
Elektrische Ausgleichsströme, kathodischer Korrosionsschutz	Rückströme von Generatoren, Körper-/ Erdschluss bei Fehlern, Induktion
Elektromagnetische Wellen im Bereich $3 \times 10^{11} \dots 3 \times 10^{15}$ Hz	Laserstrahl zur Entfernungsmessung, insbesondere bei Fokussierung
Hochfrequenz 9 kHz bis 300 GHz	Funksignale, industrielle Hochfrequenzgeneratoren für Erwärmung, Trocknung oder Schneiden
Blitzschlag	Atmosphärische Wetterstörungen
Ionisierende Strahlung	Röntgengerät, radioaktiver Stoff, Absorption von Energie führt zur Erwärmung
Ultraschall	Absorption von Energie in festen/flüssigen Stoffen führt zur Erwärmung

### 5.4.3 Explosion

Als Explosion bezeichnet man eine plötzliche, d. h. mit großer Reaktionsgeschwindigkeit ablaufende, Oxidations- oder Zerfallsreaktion, die eine Temperatur- oder Druckerhöhung oder beides gleichzeitig erzeugt. Am bekanntesten sind Reaktionen brennbarer Gase, Dämpfe oder Stäube mit dem Sauerstoff der Luft.

Damit Explosionen in atmosphärischer Luft stattfinden, müssen in der Regel die drei Faktoren brennbarer Stoff, Sauerstoff und Zündquelle zusammenkommen. Gerade bei Prüfungen in abwassertechnischen Anlagen kommen diese schnell zusammen. So besitzen z.B. Inspektionstechniken oftmals einen Explosionsschutz, um ein sicheres Arbeiten im Kanal im Zusammenspiel mit brennbaren Stoffen (Tabelle 4) zu gewährleisten.

Der allgemeine Vorgang zum Abschätzen des Sicherheitsstandes und Ergreifen von Schutzmaßnahmen wird im Folgenden beschrieben.

#### Technische Schutzmaßnahmen

Technische Schutzmaßnahmen und die bei Ihrem Einsatz zu beachtenden Gesichtspunkte sind in der BGR 104 ausführlich beschrieben. Die Erläuterungen wurden an dieser Stelle auf abwasserspezifischen Bedingungen beschränkt. Der Staubexplosionsschutz, z.B. in Volltrocknungsanlagen für Klärschlamm, erfordert besondere Schutzmaßnahmen; Hinweise enthält die VDI Richtlinie 2263 [18], sowie DIN 19569-10 [19].

#### Lüftung

An natürliche oder technische Lüftungsmaßnahmen werden besondere Anforderungen gestellt [16]. Eine technische Lüftung genügt, die der Geruchsbekämpfung dient, nicht immer den Anforderungen des Explosionsschutzes. Bei der Auslegung technischer Lüftungen ist die Luftführung besonders zu beachten [15].

#### Vermeidung von Zündquellen

Nach Maßnahmen des primären Explosionsschutzes verbleiben oft Bereiche, in denen ergänzend Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen erforderlich sind. Diese Bereiche sind in Zonen einzuteilen, zu kennzeichnen und in einem Ex-Zonenplan darzustellen [15].

#### Auswahl von Betriebsmitteln

Angaben zur Auswahl von Betriebsmitteln für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen enthält Anhang 4 B der BetrSichV, der die Zuordnung von Gerätekategorien zu Zonen enthält. Als Mindestanforderungen in abwassertechnischen Anlagen gilt die Explosionsgruppe II A und die Temperaturklasse T1 für Bereiche in denen mit dem Auftreten einer g. e. A. durch Faulgas bzw. T 3 für Bereiche, in denen mit dem Auftreten einer g. e. A. durch Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten zu rechnen ist.

Für die in Ex-Zonen eingesetzten Betriebsmittel ist neben der Bedienungsanleitung die EG-Konformitätserklärung für Geräte der Kategorien 1 und 2 vorzuhalten.

Geräte, die nicht über die Kennzeichnung ATEX verfügen, dürfen nicht mehr Inverkehr gebracht werden. Dies schließt eine Nutzung von Lagerbeständen des Betreibers nicht

aus, soweit die gelagerten Geräte nach einer früheren Rechtsgrundlage zugelassen waren und sich die Lagerbedingungen nicht negativ auf die für den Explosionsschutz entscheidenden Merkmale ausgewirkt haben.

**Festlegung der Gerätekategorie**

Um das geeignete Verfahren zur Konformitätsbewertung festzulegen, muss der Hersteller zunächst anhand der bestimmungsgemäßen Verwendung entscheiden, zu welcher Gerätegruppe und –kategorie das Produkt gehört

- *Gerätegruppe I:* Geräte zur Verwendung im Untertagebetrieb von Bergwerken und deren Übertageanlagen, die durch Grubengase (Methan) und/oder brennbare Stäube gefährdet werden
- *Gerätegruppe II:* Geräte zur Verwendung in den übrigen Bereichen, die durch eine explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können.

*Tabelle 7 Zuordnung der Gerätegruppe zur Kategorie und dessen Schutzgrad*

GG	Kategorie	Schutzgrad	Gewährleistung des Schutzes	Betriebsbedingungen
I	M1	sehr hoher Grad an Sicherheit	Zwei unabhängige Schutzmaßnahmen. Sicher, wenn zwei Fehler unabhängig voneinander auftreten.	Produkte müssen aus Sicherheitsgründen bei vorhandener explosionsfähiger Atmosphäre weiter betrieben werden können.
I	M2	hoher Grad an Sicherheit	Schutzmaßnahmen bei normalem Betrieb auch unter erschwerten Bedingungen wirksam.	Diese Produkte müssen beim Auftreten einer explosionsfähigen Atmosphäre abgeschaltet werden können.
II	1	sehr hoch	Zwei unabhängige Schutzmaßnahmen. Sicher, wenn zwei Fehler unabhängig voneinander auftreten.	Geräte bleiben in den Zonen 0, 1, 2 (G) und 20, 21, 22 (D) weiter einsatzbereit und werden weiter betrieben.
II	2	hoch	Im normalen Betrieb und bei üblicherweise auftretenden Fehlern sicher.	Geräte bleiben in den Zonen 1, 2 (G) und 21, 22 (D) weiter einsatzbereit und werden weiter betrieben
II	3	normal	Im normalen Betrieb sicher.	Geräte bleiben in den Zonen 2 (G) und 22 (D) weiter einsatzbereit und werden weiter betrieben.

### Ex-Zonenplan

Kommt bei der Ermittlung heraus, dass die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären bei dem jeweiligen Einsatzort nicht sicher verhindert werden kann, ist Gefährdung zu beurteilen, und zwar:

- Die Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre,
- Die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins und Wirksamwerdens von Zündquellen
- das Ausmaß der zu erwartenden Auswirkungen von Explosionen

Die Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre wird in Zonen eingeteilt.

Tabelle 8 Einteilung der Gefahren-Arten und Dauer in Zonen

Zonen	Art der Gefahr	Beispiel
Zone 0 Zone 20	ständig, lange Zeiträume, häufig	z.B. der Bereich im Inneren von Behältern oder Apparaturen, bei staubenden Gütern auch Mühlen, Trockner, Mischern, Förderleitungen, Silos
Zone 1 Zone 21	gelegentlich	z.B. die nähere Umgebung von Beschickungsöffnungen, Füll- o. Entleerungsöffnungen, die nähere Umgebung um die Zone 0, der nähere Bereich bei Abfüllstellen in Behälter, oder Bereich, in denen abgelagerter Staub in solchen Mengen vorliegt, dass es bereits im Normalbetrieb gelegentlich zum Aufwirbeln kommen kann
Zone 2 Zone 22	normalerweise nicht, nur kurzzeitig, nie	Bereiche um Rohrleitungen in geschlossenen Räumen die technisch dicht sind, Bereiche, die die Zonen 0 oder 1 umgeben oder Bereiche, in denen Staubablagerungen zu erwarten sind, die aber regelmäßig beseitigt werden oder in denen auf Grund einer Vielzahl von Freisetzungquellen Staubablagerungen vorhanden sind.

Die Zonen explosionsfähiger Atmosphäre<sup>2</sup> als Gemisch aus **Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln** (0/1/2) werden in der EN-60079-10-1 und als Gemisch aus **Luft / Stäuben** (20/21/22) in der EN-60079-10-2 definiert. Sie besitzen unterschiedliche Gefährdungsgrade. Es lässt sich eine Aussage über das Intervall des Auftretens und der Verweilzeit der Gemische treffen.

<sup>2</sup> Hilfestellung zur Beurteilung von Zonen gibt die Beispielsammlung der „Explosionsschutz-Regeln“ (BGR 104)



Tabelle 9 Intervall des Auftretens und Verweilzeit der Gemische

Gefährungsgrad	Intervall des Auftretens der Gemische jährlich	Intervall des Auftretens der Gemische differenziert	Verweilzeit der Gemische
Zone 0 / 20	Höher als bei Zone 1, z.B. > 1000 mal	Höher als bei Zone 1 z.B. >3 mal / Tag	Länger als bei Zone 1
Zone 1 / 21	>10 mal, < 1000 mal	>1 mal /Monat, <3 mal Tag	Länger als 0,5 Stunden, bis 10 Stunden
Zone 2 / 22	>1 mal, <10 mal	> 1mal / Jahr, <1 mal / Monat	Kürzer als 0,5 Stunden

### Temperaturschutzklassen

Unterschiedliche Stoffe besitzen unterschiedliche Oberflächentemperaturen, bei denen eine Explosion zustande kommen kann. Einige Stoffe besitzen dieselbe und werden in zwei Gruppen eingeteilt, welche wiederum nach ATEX in Temperaturklassen unterteilt werden.

Temperaturen für die Gruppe I:

- Die max. zulässige Oberflächentemperatur der Betriebsmittel ist abhängig von der Art der Ablagerung von Kohlestaub.

Temperaturen für die Gruppe II:

- Die Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre kann verhindert werden, wenn die Oberflächentemperatur der Betriebsmittel niedriger ist, als die Zündtemperatur des umgebenden Gases. Die Oberflächentemperatur gilt für alle Teile eines elektrischen Betriebsmittels, die in Berührung mit dem explosionsfähigen Stoff kommen können.

Tabelle 10 Temperaturen für die Gruppe I

Gruppe I	Temperatur	Bedingungen
Schlagwettergefährdeter Grubenbau (Kohlebergbau)	150°C	Mit Ablagerung von Kohlestaub am Betriebsmittel
	450°C	Ohne Ablagerung von Kohlestaub am Betriebsmittel
Temperaturklassen Gruppe II		
Klasse	Max. Temp.	Stoffbeispiele (siehe auch ATEX)
T1	450°C	Kohlenmonoxid, Methan, Propan, Wasserstoff
T2	300°C	Acetylen, Cyclohexan, Ethylen
T3	200°C	Diesel, Benzin, Schwefelwasserstoff
T4	135°C	Acetaldehyd, Ethylether
T5	100°C	Keine Stoffe
T6	85°C	Ausschließlich Schwefelkohlenstoff

Zündschutzarten

Durch technische Maßnahmen muss sichergestellt sein, dass entsprechend der Eingruppierung eines unterstellten explosiven Gemisches (Spaltweite, Temperaturklasse) keine Zündquelle wirken kann. Es gibt mehrere technische Möglichkeiten, den Explosionsschutz eines elektrischen Gerätes zu erreichen. Die Zündschutzarten sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgeführt.

*Tabelle 11 Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel in gasexplosionsgefährdeten Bereichen*

Zündschutzart		Schutzprinzip	EN	Zone	Anwendung	Beschreibung
d	Druckfeste Kapselung	Verhinderung der Ausbreitung einer Explosion	EN 60079-1	1 oder 2	Schalt-, Befehls- und Meldegeräte, Steuerrungen, Motoren, Leistungselektronik	Die Komponenten, die eine Zündung auslösen können, sind in ein Gehäuse eingebaut, das dem Explosionsdruck standhält. Die Öffnungen des Gehäuses sind so beschaffen, dass eine Übertragung der Explosion nach außen verhindert wird.
e	Erhöhte Sicherheit	Funken verhindern	EN 60079-7	1 oder 2	Abzweig- und Verbindungskästen, Gehäuse, Motoren, Klemmen	Das Entstehen von Funken, Lichtbögen oder unzulässigen Temperaturen, die als Zündquelle wirken könnten, wird durch zusätzliche Maßnahmen und einen erhöhten Grad an Sicherheit verhindert.
p	Überdruckkapselung	Ausschluss explosionsfähiger Atmosphäre	EN 60079-2	1 oder 2	Schalt- und Steuerschränke, Motoren, Mess- und Analysegeräte, Rechner	Das Gehäuse der Geräte ist mit einem Zündschutzgas gefüllt. Es wird ein Überdruck aufrecht gehalten, so dass ein explosives Gasgemisch nicht zu den im Inneren des Gehäuses angeordneten möglichen Zündquellen gelangen kann. Gegebenenfalls wird das Gehäuse dauernd durchströmt.

Tabelle 12 Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel in gasexplosionsgefährdeten Bereichen (Fortsetzung)

Zündschutzart		Schutzprinzip	EN	Zone	Anwendung	Beschreibung
i	Eigensicherheit	Begrenzung der Zündenergie	EN 60079-11 EN 60079-25 EN 60079-27	0, 1 oder 2	Mess, Steuer- und Regeltechnik, Sensoren, Aktoren, Instrumentierung	Die Versorgung der elektrischen Betriebsmittel wird über eine Sicherheitsbarriere geführt, die Strom und Spannung soweit begrenzt, dass die Mindestzündenergie und Zündtemperatur eines explosiven Gemisches nicht erreicht wird.
o	Ölkapselung	Ausschluss explosionsfähiger Atmosphäre	EN 60079-6	1 oder 2	Transformatoren, Relais, Anlaufsteuerungen, Schaltgeräte	Die Teile der elektrischen Betriebsmittel von denen eine Zündung ausgehen kann, sind in eine Schutzflüssigkeit (meistens Öl) getaucht.
q	Sandkapselung	Funken verhindern	EN 60079-5	1 oder 2	Transformatoren, Relais, Kondensatoren	Das Betriebsmittel ist mit feinkörnigem Sand gefüllt. Ein möglicher Lichtbogen wird soweit gekühlt, dass die Zündung eines explosiven Gemisches ausgeschlossen ist. Die Oberflächentemperatur darf den Grenzwert nicht überschreiten.
m	Vergusskapselung	Ausschluss explosionsfähiger Atmosphäre	EN 60079-18	1 oder 2	Spulen von Relais und Motoren, Elektronik, Magnetventile, Anschlusssysteme	Die Teile des elektrischen Betriebsmittels, die Zündquellen erzeugen können, sind in Vergussmasse eingebettet, so dass ein Lichtbogen nicht zu einem explosiven Gemisch außerhalb der Kapselung durchtreten kann.

Bei Schaltanlagen und Transformatoren wählt man oft die Explosionschutzmaßnahme „druckfeste Kapselung“. Bei Anschlusskästen und auch Käfigläufermotoren wird oft die Maßnahme „erhöhte Sicherheit“ angewendet. Eine Überdruckkapselung erfolgt

vorwiegend bei Betriebsmitteln mit größeren Leistungen (Schaltschränke, große Motoren). Eigensichere Stromkreise kommen nur für Stromkreise mit geringen Leistungen in Betracht. Diese Schutzart wird für Mess- und Steuerkreise sowie für den elektrischen Anschluss von Sensoren und Aktoren verwendet. Die Sicherheitsbarriere ist dabei außerhalb der explosionsgefährdeten Zone angeordnet. Durch Einkapselung möglicher Zündquellen in Form einer Sand- oder Ölfüllung oder durch eine geeignete Vergussmasse in Verbindung mit einer entsprechenden Begrenzung der Oberflächentemperatur kann der Explosionsschutz eines elektrischen Betriebsmittels sichergestellt werden.

#### 5.4.4 Gesundheitlich

Im Bereich von abwassertechnischen Anlagen werden Tätigkeiten ausgeführt, bei denen Beschäftigte mit Abwasser, Klärschlamm, Materialien und Gegenständen umgehen, die biologische Arbeitsstoffe enthalten oder freisetzen (Aerosole) bzw. denen diese Stoffe anhaften. Prozessbedingt findet eine Vermehrung bestimmter biologischer Arbeitsstoffe statt. Beschäftigte kommen dabei mit biologischen Arbeitsstoffen in Kontakt, ohne dass diese Tätigkeiten auf diese ausgerichtet sind. Die auftretenden biologischen Arbeitsstoffe sind nicht abschließend der Spezies nach bekannt und es kommt zu einer mikrobiellen Mischexposition der Beschäftigten, wobei die Expositionsverhältnisse zeitlich starken Schwankungen unterliegen und auch räumlich sehr unterschiedlich sein können. Definitionsgemäß handelt es sich demnach um nicht gezielte Tätigkeiten im Sinne der BioStoffV.

Die Gefährdung bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen wird maßgeblich durch deren Eigenschaften sowie Menge, Umfang der Freisetzung und Verbreitung, Art, Dauer und Häufigkeit des Kontakts bestimmt.

Das Abwasser und die bei Arbeiten entstehenden Aerosole sind qualitativ und quantitativ sehr unterschiedlich kontaminiert. Das Spektrum der biologischen Arbeitsstoffe variiert in Abhängigkeit von den Einleitern und den Vermehrungs- bzw. Inaktivierungsbedingungen, die in den Anlagen vorherrschen (Klima, Fließgeschwindigkeit, chemische Zusammensetzung des Abwassers, verfahrenstechnische Gegebenheiten u. a.)

Bakterien und Schimmelpilze können sich auch außerhalb von Abwasser abhängig von Umgebungsbedingungen vermehren, so dass ihr Vorkommen und die Konzentration dieser verschiedenen Organismen abhängig sind z. B. vom Arbeitsbereich, Arbeitsverfahren, Arbeitsmanagement und Hygienezustand des Arbeitsplatzes.

Die Wege für die Aufnahme und Übertragung von biologischen Arbeitsstoffen sind:

1. Aufnahme über den Mund durch Spritzer, durch verunreinigte Nahrungsmittel, durch Essen, Trinken und Rauchen oder Schnupfen ohne vorherige Reinigung der Hände, durch jeglichen Hand-Mund-Kontakt auch über kontaminierte Kleidung oder persönliche Schutzausrüstung
2. Aufnahme über die Atemwege (inhalativ) durch Bioaerosole (z. B. Tröpfchen, Stäube)

3. Aufnahme über die Haut oder Schleimhäute z. B. durch Eindringen bei Hautverletzungen, durch Spritzer in die Augen und Nase, bei verminderter Schutzbarriere z. B. durch Nässe aufgeweichte oder erkrankte Haut, durch alle Hand-Gesicht-Kontakte, durch Kontakt mit kontaminierter Kleidung oder Schutzausrüstung
4. Eindringen in tiefes Gewebe (Muskulatur, Unterhautfettgewebe) bei Verletzungen z.B. durch Stich- und Schnittverletzungen mit kontaminierten Geräten

Zu beachten ist, dass viele Infektionserreger nicht nur über einen sondern auch über mehrere der oben genannten Übertragungswege aufgenommen werden können.

Es werden infektiöse, sensibilisierende und toxische Wirkungen unterschieden. Während bei den infektiösen Wirkungen die orale Aufnahme im Vordergrund steht, ist bei den sensibilisierenden und toxischen Wirkungen auch der inhalative Aufnahmepfad von Bedeutung. Die sensibilisierenden oder toxischen Wirkungen von Mikroorganismen sind unabhängig vom Infektionspotential in der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen. Hierfür typisch sind Mischexpositionen mit einer Vielzahl allergener und toxischer luftgetragener Komponenten. Bei diesen handelt es sich beispielsweise um Schimmelpilze oder Zellwandbestandteile lebender oder abgestorbener Mikroorganismen wie z.B. Endotoxine von gramnegativen Bakterien. Insbesondere endotoxinbelastete Aerosole gelten als Ursache akuter und chronischer Erkrankungen, wie z.B. von Organic Dust Toxic Syndrome (ODTS) und chronischer Bronchitis (s. Endotoxin-Informationspapier des ABAS). Mit Endotoxinen in deutlich höherer Konzentration im Vergleich zur Außenluft (mehrere 100 EU/m<sup>3</sup>) ist z.B. bei Reinigungsarbeiten in Kanalbauwerken zu rechnen.

Stäube, die Schimmelpilze enthalten, werden in der TRGS 907 „Verzeichnis sensibilisierender Stoffe“ als sensibilisierende Gefahrstoffe bewertet.

Beispiele für Tätigkeiten mit möglicher Exposition gegenüber sensibilisierenden und toxischen biologischen Arbeitsstoffen sind z. B. manuelle Reinigungsarbeiten auf Anlagen und in Bauwerken wie

- manuelles Ablösen von Anbackungen
- Hochdruckreinigungsarbeiten
- Tätigkeiten mit Klärschlamm.

Gemäß BioStoffV werden biologische Arbeitsstoffe entsprechend ihrem Infektionsrisiko in Risikogruppen eingeteilt. Im Anwendungsbereich dieser TRBA treten in der Regel biologische Arbeitsstoffe der Risikogruppen 1 und 2 auf (s. Anhang 1 und 2).

Werden Infektionserreger der Risikogruppe 3 nachgewiesen oder besteht ein begründeter Verdacht einer entsprechenden Infektion z.B. durch Stichverletzungen mit entsprechend kontaminierten Spritzen im Rechengut, kann dies jedoch zu einer besonderen Gefährdung für den Menschen führen.

Eine Gefährdung aufgrund der Übertragung biologischer Arbeitsstoffe besteht auch durch Nagetiere, Vögel oder andere Tiere und deren Ausscheidungen.

Tätigkeiten im Zusammenhang mit Infektionskrankheiten, die durch Krankheitserreger der Risikogruppe 4 ausgelöst werden, sind im Anwendungsbereich dieser TRBA nach bisherigem Kenntnisstand nicht bekannt [20].

### **Schutzmaßnahmen**

Grundsätzlich dürfen für Arbeiten in Abwassertechnischen Anlagen nur Personen eingesetzt werden, die vom Unternehmer ausdrücklich dafür bestimmt werden. Sie müssen für diese Arbeiten nach Körperbeschaffenheit und Gesundheitsstand geeignet und durch Kenntnis und Unterweisung in der Lage sein, möglichst Gefahren zu erkennen und abzuwenden.

In abwassertechnischen Anlagen wird eine Vielzahl von Keimen angetroffen. Insbesondere, wenn Fäkalien in die Anlagen eingeleitet werden, muss auch mit Krankheitserregern gerechnet werden. Bei regelmäßigem und intensivem Kontakt zu Fäkalien sollte den Beschäftigten eine Impfung gegen Hepatitis A angeboten werden. Die Infektionsgefährdung durch Hepatitis-B-Viren ist eher niedrig, da die Keimkonzentration im Abwasser zu gering ist und der Hauptinfektionsweg (verletzte Haut) durch Bereitstellung geeigneter persönlicher Schutzausrüstung (Handschutz gegen mechanische Gefährdung) vermieden werden kann. In Fällen, in denen eine erhöhte Verletzungsgefahr besteht, sollte auch zusätzlich eine Impfung gegen Hepatitis-B-Viren vorgenommen werden.

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung und Durchführung der Schutzmaßnahmen ist festzustellen, welche Stoffe und Zubereitungen in welcher Konzentration im umschlossenen Raum enthalten sind oder im Verlauf der Arbeiten auftreten können und ob Sauerstoffmangel auftreten kann. In den meisten Fällen ist dazu Freimessen erforderlich. Dazu sind geeignete Messverfahren zu benutzen. Geeignete Messverfahren sind kontinuierliche Messungen mit direkt anzeigenden Mehrfach-Gaswarngeräten [21].

Umschlossene Räume sind vor Beginn der Arbeiten soweit möglich zu entleeren und zu reinigen. Nach Möglichkeit sollen Abwasser und Verunreinigungen aus dem umschlossenen Raum entfernt werden, ohne dass sich dazu Versicherte darin aufhalten müssen, z.B. durch Ablassen, Absaugen mit Saugfahrzeugen, Reinigen mit Hochdruckspülfahrzeugen oder Abpumpen. Es muss gewährleistet sein, dass im Zuge des Entleerens Stoffe, Zubereitungen oder Rückstände gefahrlos beseitigt werden.

Bei Gefährdungen, die sich nicht beseitigen lassen müssen geeignete Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Geeignete Schutzmaßnahmen können z.B. sein:

- Technische Lüftung,
- geeigneter Atemschutz
- Persönliche Schutzausrüstung zum Schutz gegen Ertrinken

Vor Aufnahme und während der Arbeiten muss durch Lüftung sichergestellt sein, dass weder gefährliche explosionsfähige Atmosphäre noch Sauerstoffmangel, Gase oder Dämpfe in gesundheitsschädlicher Konzentration auftreten können. Lüftung ist natürlich oder technisch möglich. Die Wirksamkeit der Lüftung ist zu überwachen [21].

Um sich vor Angriffen von biologischen Arbeitsstoffen auf die Haut und Schnittverletzungen zu schützen, ist es erforderlich sowohl Handschuhe als auch einen Schutzanzug zu tragen.

In abwassertechnischen Anlagen können sich Zuflüsse zwischen Scheitel und Kämpfer befinden, aus denen schubweise Schlamm, Abwasser, Fäkalien u.v.m. in die Haltung fließen. Dazu kommen noch sich über die Jahre gebildete Ablagerungen sowie eine geringe Prüfhöhe bei kleinen Kanälen. Um sich davor zu schützen ist es erforderlich einen Schutzhelm zu tragen. Die Gesundheitlichen Schutzarten für den Umgang mit der MAC-Prüfeinrichtung sind noch einmal in der Tabelle 13 zusammengefasst.

*Tabelle 13 Schutzmaßnahmen bei Gesundheitlicher Gefährdung*

<b>Gesundheitliche Gefährdung</b>	<b>Schutzart</b>
orale und inhalative Aufnahme von Bioaerosolen	Mundschutz
herabfallenden Teilen, pendelnden Lasten, Ablagerungen, niedrige Höhe	Schutzhelm
Angriff von biologischen Arbeitsstoffen auf die Haut und Schnittverletzungen	Handschuhe
Überwachung von explosionsfähigen Atmosphären, Sauerstoff, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid	Gaswarngerät für Abwasser
Sauerstoffmangel	Belüftung
Angriff von biologischen Arbeitsstoffen auf die Haut und Schnittverletzungen	Schutzanzug

#### **5.4.5 Gefährdungsbeurteilung MAC-Prüfeinrichtung**

Durch geeignete Maßnahmen müssen sowohl die Mitarbeiter vor Ort als auch Nachbargewerke geschützt werden. Grundsätzlich kommt 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 14 zusammengefasst.

Tabelle 14 Gegenmaßnahmen zur Gefährdung im Umgang mit dem MAC-Prüfsystem

Ursache	Gefahrenquelle	Gegenmaßnahme
Motor mit Kohlekontakten und Schleifer schlägt Funken	Funken	Kapseln
Motor entwickelt bei zu dauerhafter Zylinderfahrt Oberflächentemperatur von ca. 50-60°C	Heiße Oberfläche	Kurze Prüfzyklen
es finden Schaltvorgänge durch den Anlasser des Motors statt	Lichtbögen	Kapseln
das Starter Relais des Motors öffnet und schließt häufig bei kurzen Prüfzyklen	Elektrische Anlagen	Kapseln
Sauerstoffmangel, Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid	-	Lüften
Einklemmen der Finger zwischen Lasteinleitungsplatten und Wandung; MAC-Prüfgerät rollt über den Fuß	Quetschungen an Hand und Fuß	Druckzylinder immer hinter den Lasteinleitungsplatten anpacken; Sicherheitsschuhe tragen
bei Undichtigkeit oder Beschädigung kann die Säure auslaufen: stark ätzen	Batteriesäure	Handschuhe tragen; beim auslaufen sind viel Frischluft und umfassende Spülungen der Haut mit Seife sofort notwendig
elektrischer Schlag		Erdung

### Heiße Oberfläche

Unterschiedliche Stoffe können durch bestimmte Oberflächentemperaturen zu einer Explosion führen (Tabelle 10). Die MAC-Prüfeinrichtung besitzt während einer Prüfreihe nur eine Gefahrenquelle – der Motor. Bei Prüffahrten in kurzen Intervallen oder zu dauerhaften Zylinderfahrten entwickelt der Motor eine Oberflächentemperatur. Um dieser entgegenzuwirken, muss bei dem momentan eingebauten Motor das Prüfintervall minimiert werden.

### Quetschungen an Hand und Fuß

Verletzungen an den Füßen können bei Prüfungen mit der MAC-Prüfeinrichtung auf verschiedene Weise geschehen. Herunterfallendes Werkzeug sowie die über einen Fuß rollende MAC-Prüfeinrichtung führen zu Quetschungen und Prellungen der Füße, der Druckzylinder, der aus geringer Höhe fällt, kann sogar Knochenbrüche verursachen. Arbeitsschutzschuhe mit Stahlkappen schützen die Füße sowohl vor Quetschungen, Prellungen und Knochenbrüchen als auch vor Fleischwunden. Bei herabfallenden Objekten dienen die Stahlkappen der Arbeitsschutzschuhe als Schutzschild, das die Wucht des Aufpralls abfängt. Insbesondere die Zehen sind unter den Stahlkappen optimal geschützt. Arbeitsschutzschuhe haben darüber hinaus ein extrem dickes Profil. Dieses sorgt für sicheren Stand, so dass man auf nassem Untergrund nicht ausrutscht, was wiederum zu Verletzungen führen könnte.



Um Handquetschungen zu vermeiden, muss darauf geachtet werden, dass der Druckzylinder immer hinter den Lasteinleitungsplatten gegriffen wird, um diesen in die richtige Prüfposition zu bringen.

### **Lichtbögen**

Schaltfunken und Schaltlichtbögen entstehen, weil der elektrische Strom nach Öffnen der Kontakte in Form einer Funkenentladung oder einer Bogenentladung weiter fließt. Bei geschlossenen Kontakten, liegt eine in etwa homogene Stromverteilung vor. Bei Kontakttrennung kommt es zunächst zu einer Konzentration der Stromdichte am letzten Kontaktpunkt. Bei weiterer Öffnung bildet sich dann an jenem Punkt bzw. Punkten der Lichtbogen zwischen den Kontakten aus. Ursache ist die geringe Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmaterials wie Luft zwischen den noch nicht weit geöffneten Kontakten.

Wird der Lichtbogen nicht schnell genug unterbunden oder gelöscht, führt dies insbesondere bei hohen Strömen und Spannungen zur Zerstörung der Schaltkontakte durch Kontaktbrand. Durch die extrem hohen Temperaturen – abhängig von der unmittelbaren Umgebung – die Gefahr, andere Gegenstände zu entzünden und einen Brand oder eine Explosion auszulösen.

Durch die Schaltvorgänge des Anlassers vom Motor der MAC-Prüfeinrichtung kann die beschriebene Situation erreicht werden und somit eine Gefahrenquelle entstehen. Zur Gegenmaßnahme muss der Anlasser gekapselt werden (Tabelle 11).

### **Explosionsfähige Stoffe**

Durch Lüftungsmaßnahmen kann erreicht werden, dass in der Umgebung der abwassertechnischen Anlage die explosionsfähige Atmosphäre verringert und damit der explosionsgefährdete Bereich eingeschränkt wird. Wie eine wirksame Lüftung zu konzipieren ist, hängt in erster Linie von der maximalen Stärke und Häufigkeit der Quelle sowie von den Eigenschaften der beteiligten brennbaren Gase, Flüssigkeiten oder Stäube ab. Bei der Prüfung mit der MAC-Prüfeinrichtung ist die natürliche Lüftung ausreichend.

### **Funken**

Funken können durch Kohlebürsten im Inneren des Motors auftreten. Die Gleitkontakte stellen den elektrischen Kontakt zum Kollektor oder zu den Schleifringen des rotierenden Teiles des Motors her und nutzen sich durch die Rotation ab, wodurch ein Funkenflug entstehen kann. Besteht also kein Kontakt oder nur sehr geringfügiger ist zusätzlich der Stromfluss nicht korrekt.

Funken können in erster Linie verhindert werden, indem die Kohlebürsten nach der Zeit ausgetauscht bzw. gereinigt werden. Um eine dauerhafte Gegenmaßnahme zu ergreifen, müssen diese gekapselt werden (Tabelle 11).

### **Batteriesäure**

Bei der eingesetzten Autobatterie wird eine nicht unerhebliche Menge an Batteriesäure benötigt, die für die Funktion des Bleiakkus unerlässlich ist. Hinter dem Begriff Batteriesäure verbirgt sich im Zusammenhang mit Autobatterien eine 30-38-prozentige Schwefelsäure, die der Batterie als Elektrolyt dient.

Schwefelsäure ist stark ätzend und stellt deshalb eine ernst zu nehmende Gefahrenquelle dar, die man nur unter Ergreifung gesonderter Schutzmaßnahmen verwenden sollte. Bei Autobatterien, die nicht wartungsfrei sind, ist es wichtig, regelmäßig das Batteriegehäuse zu öffnen und die Flüssigkeitsstände zu kontrollieren. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Batterie einwandfrei funktioniert und die benötigte Kapazität aufweist. Die Kontrolle der Flüssigkeiten darf keinesfalls ohne Schutzkleidung und nur unter besonderer Vorsicht geschehen, da sonst gefährliche Verätzungen und ernsthafte Gesundheitsschäden drohen. Um sich vor auslaufender Batteriesäure zu schützen, sollten Handschuhe getragen werden. Zusätzlich ist für eine gute Belüftung zu sorgen und eine umfassende Spülung der Haut mit Seife sofort notwendig. Gegebenenfalls ist ein Mundschutz zu tragen.

## 6 Praxiseinsätze

### 6.1 Überblick

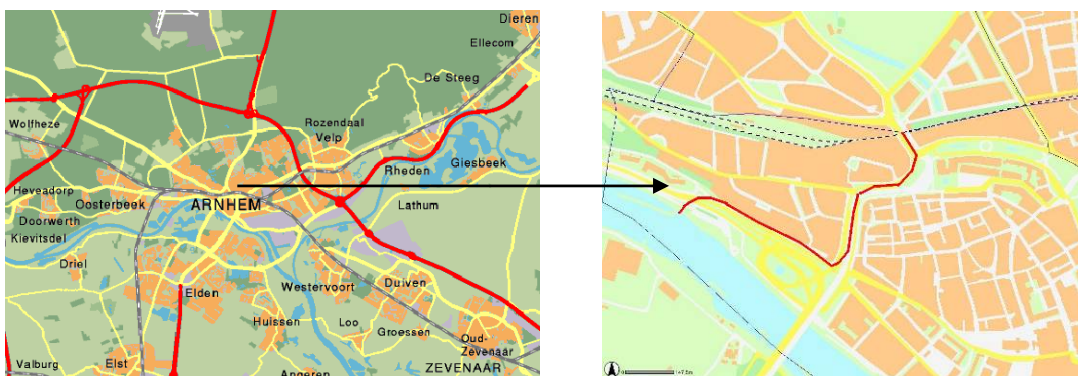
Das neu entwickelte Prüfsystem konnte in einem IKT-Testkanal und mehrmals in den Kanalnetzen der Städte Düsseldorf und Schwerte getestet werden. Es hat sich gerade in der Entwicklung der Prüfeinheit gezeigt, dass diese Testeinsätze unverzichtbar waren. Wichtige Erkenntnisse oder besondere Details an der Prüfmaschine konnten so hinzugewonnen werden, um einerseits die Handhabung und andererseits die Prüfungsgeschwindigkeit zu verbessern. Neben dem Einsatz der vom IKT entwickelten Prüfmaschine konnten auch Einsätze des Originals im Kanalnetz der Stadt Arnheim in den Niederlanden begleitet werden.

### 6.2 Gemeinde Arnheim

Die Stadt Arnheim führte mehrere Praxiseinsätze des MAC-Prüfverfahrens im Abwassersammlersystem „Moerriool“ zur Ermittlung des Zustandes vor und nach einer Sanierung durch. Dieser Einsatz wurde von den Pariser Wasserbetrieben durchgeführt und vom IKT begleitet. Über dieses Projekt berichtete Herr Laurentzen von der „Gemeinde Arnheim“ unter anderem im Rahmen des 13. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquiums [22].

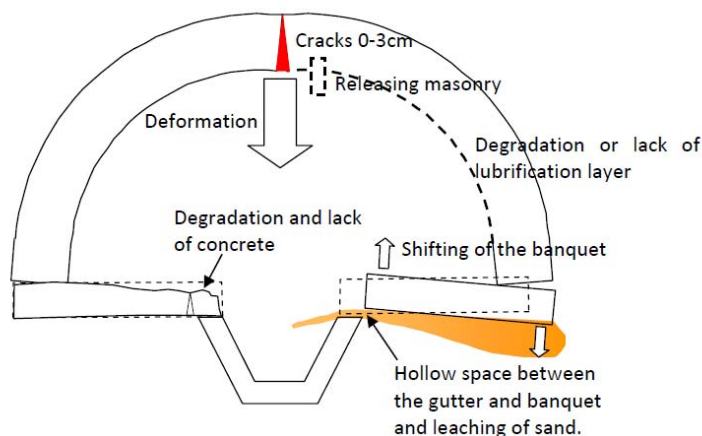
Das Sammlersystem „Moerriool“ wurde um 1870 gebaut und gilt als ältester Kanalabschnitt in Arnheim. Es liegt weitgehend in sandigem Untergrund und durchläuft mit einer Länge von ca. 1150 Metern wichtige Stadtteile im Umfeld des Wilhelmstunnels, weiterer Hauptverkehrsadern sowie zahlreicher Großbauten (Bild 27). Ursprünglich diente das „Moerriool“ zur Ableitung von Bachwasser, später wurde es dann zum Mischsystem umgebaut. Bei Regenfällen ist es regelmäßig innerhalb von kurzer Zeit vollständig gefüllt (ca. 20.000 cbm/h,  $t = 2a$ )

Aus den Bestandsunterlagen sowie alten Gravuren wurde deutlich, dass der Sammler zuletzt um 1907 grundlegend erweitert worden war. Aufgrund des für das Rheingebiet typischen sandigen Untergrunds und fehlender Pfahlgründung ist über die Betriebsdauer die Sohlage inzwischen stark abgesackt, von ursprünglich zwei Metern Tiefe auf heute bis zu zehn Metern Tiefe. Die Bedeutung des Kanalabschnitts hat gleichzeitig durch immer höhere Regenwasserbeaufschlagungen stetig zugenommen.



**Bild 27** „Moerriool“: Trassenverlauf in Arnhem, Länge ca. 1150 m

Der Querschnitt des Sammlers besteht überwiegend aus einem Betongerinne mit Betonbankette und aufgesetztem Mauerwerksbogen (Bild 28). Eine Inspektion des Kanals im Jahr 2011 zeigte, dass in weiten Bereichen mit erheblichen Schäden und Risiken für die Standsicherheit zu rechnen ist. Die Bankette zeigt Korrosionsschäden sowie deutliche Absackungen mit Schrägstellung und offensichtlichen Ausspülungen im darunterliegenden Bettungsmaterial (Bild 29). Der darüber liegende Mauerwerksbogen zeigt Risse, insbesondere im Scheitel (Bild 30).



**Bild 28** Aufbau des „Moerriool“: Gereinigter Kanal (links); Skizze (rechts)



**Bild 29** Typische Schadensbilder: Korrosionsschäden und Absackungen mit Schrägstellung (links) und offensichtlichen Ausspülungen im darunterliegenden Bettungsmaterial (rechts)

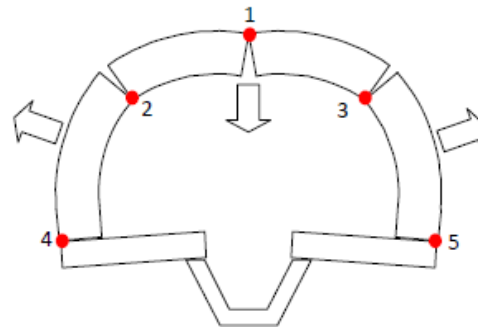


Bild 30 Typisches Rissbild (links) und Querschnitt mit Rissbereichen (rechts)

Radaraufnahmen des Bodenprofils im Umfeld der Leitung zeigten gerade im Bereich des Wilhelmstunnels, dass Schwachstellen und Standsicherheitsrisiken zu vermuten sind (Bild 31). Insbesondere die Auflockerungen im Sohlbereich konnten durch die Radaraufnahmen bestätigt werden. Vor diesem Hintergrund wurde durch den Arnheimer Verwaltungsvorstand beschlossen, dass bis Ende 2013/2014 das gesamte System in geeigneter Weise zu renovieren ist. Der Schwerpunkt liegt dabei zunächst auf zwei Teilabschnitten mit besonderen Risiken, das Umfeld des Wilhelmstunnels mit seinem Parkhaus sowie der Apartmentkomplex „du Soleil“.

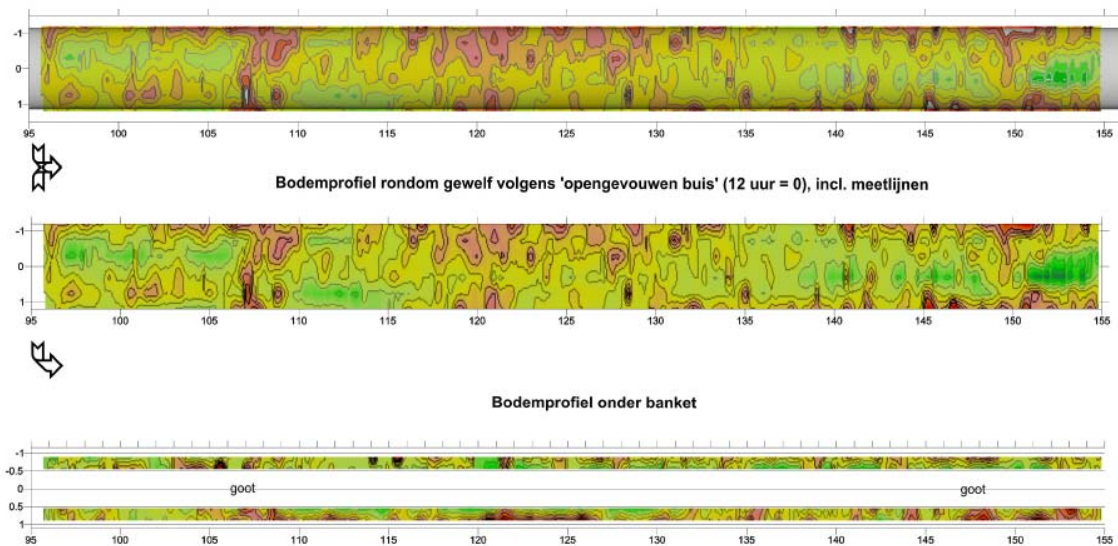


Bild 31 Ergebnisse von Radaraufnahmen im Umfeld des „Moerriool“

Aufgrund der hohen Bedeutung des „Moerriool“ für das Arnheimer Entwässerungsnetz und das hohe Risikopotenzial mit Blick auf Standsicherheitsmängel wurden bei der Planung und Umsetzung des weiteren Vorgehens Experten aus ganz Europa hinzugezogen. Hierzu gehören neben Siedlungswasserwirtschaftlern der TU Delft und der TU Eindhoven auch die Abteilung MAC von Eau de Paris, das Betreiber Netzwerk des IKT in Gelsenkirchen sowie ein belgisches Bauunternehmen. Bei der Auswahl des Monitoring-Systems für begleitende und langfristige Verformungsmessungen wurde auch auf Erfahrungen aus London zurückgegriffen.

Vor o.a. Hintergrund wurden als wesentliche Sanierungsziele die Wiederherstellung der Standsicherheit des „Moerriool“ sowie die vollständige Weiternutzung des bestehenden Fließquerschnitts festgelegt. Hierdurch ergaben sich hohe Anforderungen an die Auswahl der Sanierungsverfahren sowie die vorbereitenden Prüfungen.

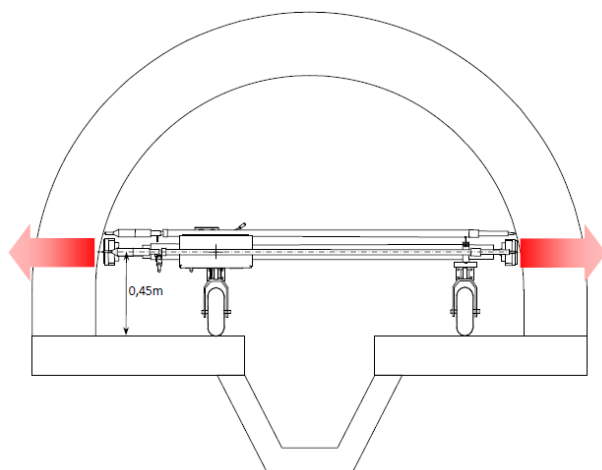
Um die Standsicherheit zuverlässiger einschätzen zu können, wurde das System MAC erstmals auch in den Niederlanden eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Kanälen und Leitungen durch mechanische Belastung und Analyse (MAC – Mécanique d'Auscultation des Conduits). Das Grundprinzip basiert auf der Analyse von Kraft-Verformungsbeziehungen. Hierzu werden horizontale Pressenkräfte in den Kanal eingeleitet und gleichzeitig die Verformungsreaktionen entlang der Kanalwandung gemessen (vgl. Kapitel 3).

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde mit dem MAC-Verfahren zunächst die Steifigkeit des Rohr-Boden-Systems entlang der Kanaltrasse ermittelt und mit begleitenden FEM-Berechnungen die Standsicherheit des Gesamtsystems analysiert. Dabei wurde in vier grundsätzlichen Schritten vorgegangen:

1. Vorinspektion zur Bestimmung der Randbedingungen
2. Messung mit dem MAC-Verfahren
3. Statische Analyse und Risikoabschätzung
4. Empfehlung weiterführender Maßnahmen

Bereits bei der **Vorinspektion** zeigte sich, dass das Mauerwerk nur locker auf die Betonbankette aufgesetzt worden war. Der Scheiteltbereich zeigte Risse und zum Teile starke Einbiegungen aufgrund der hohen Belastung durch die nachträglichen Bauten im Umfeld.

Bei der **Messung mit dem MAC-Verfahren** wurde ein Fahrwagen auf der Bankette platziert, von dem aus eine hydraulische Presse sowie drei Wegaufnehmer an der Rohrwandung positioniert wurden (Bild 32). Während der eigentliche Aufbau im Kanal vergleichsweise langwierig ist, erfolgt die Messung selbst relativ schnell. Im Gesamtblick können so ca. 500 Meter pro Tag bei einer Messung je 10 Meter aufgenommen werden.

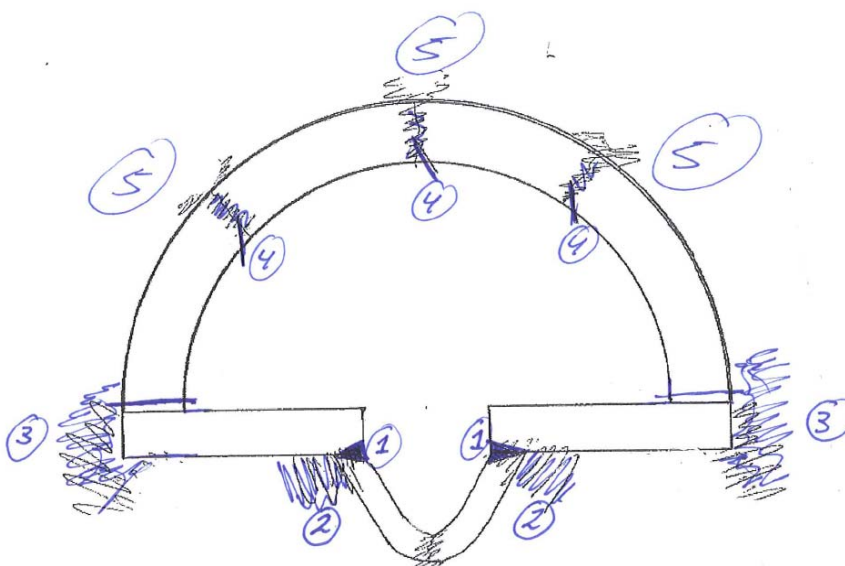


**Bild 32** Einsatz des MAC-Verfahrens im „Moerriool“

Die **statische Analyse** zeigte im Zuge von Parametervariationen, dass die Eigenschaften des Untergrunds, z.B. der Verdichtungsgrad des Sandes, für die Standsicherheit des Gesamtsystems von wesentlicher Bedeutung sind. Im Sinne einer Risikoanalyse wurden anschließend die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens und die Höhe der zu erwartenden Auswirkungen bei Versagen eingeschätzt, z.B. mit Blick auf Hygiene, Umwelt, Verkehr, Wirtschaft und Image der Stadt. Letztendlich musste im Versagensfall mit gigantischen Auswirkungen und damit entsprechend hohen Risiken gerechnet werden.

Die **Empfehlung weiterführender Maßnahmen** orientierte sich an den besonders schweren Schäden mit hohen Risiken, die während der Vorinspektion identifiziert und durch die weitergehende Analyse bestätigt worden waren. So wurde schließlich durch die Verwaltung von Arnheim entschieden, bereits vor Einleiten umfassender Renovierungsmaßnahmen das System in seinem bestehenden Zustand durch Sofortmaßnahmen kurzfristig zu stabilisieren. Begleitend und anschließend sollen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um so eine solide Grundlage für langfristig wirkende Sanierungsmaßnahmen (Renovierung) zu schaffen. Zur Sanierung wurden in fünf Schritten folgende **Sofortmaßnahmen** ausgeführt (s. a. Bild 33):

1. Zunächst wurden die freiliegenden Bereiche in der Bankette mit Mörtel vorabgedichtet.
2. Anschließend wurden in Abständen von ca. 1 Meter Injektionspacker gesetzt, um die Hohlräume im Sohl- und Bankettbereich vollständig zu verfüllen.
3. In einem dritten Schritt wurden dann auch die Risse im Übergangsbereich zwischen Bankette und Mauerwerksbogen mittels Polyurethan-Injektion geschlossen.
4. Anschließend wurden die oberen Rissbereiche im Mauerwerk mit Mörtel abgedichtet und reprofiliert.
5. Abschließend wurden die oben liegenden Hohlräume durch den oberen Rissbereich direkt mit Injektionsmaterial verfüllt.



**Bild 33** Ablauf der Sofortmaßnahmen, vom Schaden bis zur abgeschlossenen Reparatur (Skizze)

Das Injektionsmaterial wurde in kleinen Einheiten angeliefert, so dass dieses auch durch die vergleichsweise kleinen Schachtdurchmesser bis zur Reparaturstelle transportiert werden konnte. In den Niederlanden werden die Schächte meist als reine Inspektionsöffnungen ausgeführt und weisen mit 60 cm Durchmesser über die gesamte Höhe deutlich kleinere Abmessungen auf als dies in Deutschland der Fall ist.

Während der Sofortmaßnahmen wurde zur Sicherheit des ausführenden Personals eine mobile Konstruktion mit Laststempeln vorgehalten, um jederzeit eventuelle Laststeigerungen im Bogen aufnehmen zu können (Bild 34). Darüber hinaus wurden kontinuierlich Lasermessungen ausgeführt, um mögliche Bewegungen des Systems frühzeitig erkennen zu können. Besondere Bewegungen wurden jedoch nicht beobachtet und auf den Einsatz des Sicherungssystems konnte letztlich verzichtet werden.



Bild 34 Sicherung über Laststempel (links) und Lasermessungen (rechts)

Nach Abschluss der Arbeiten wurde das Gesamtsystem wiederum mit dem MAC-Verfahren untersucht, um den Erfolg für die Stabilisierung und Erhöhung der Tragsicherheit des Gesamtsystems nachzuweisen. Bild 35 zeigt beispielhaft, wie die globale Steifigkeit gerade in den kritischen Bereichen ab Meter 250 durch die PU-Injektion verbessert wurde. Dabei fällt auf, dass der Grad der Verbesserung an den Stationen 295, 305, 325, 335 and 342 mit ca. 60% von identischer Größenordnung ist.

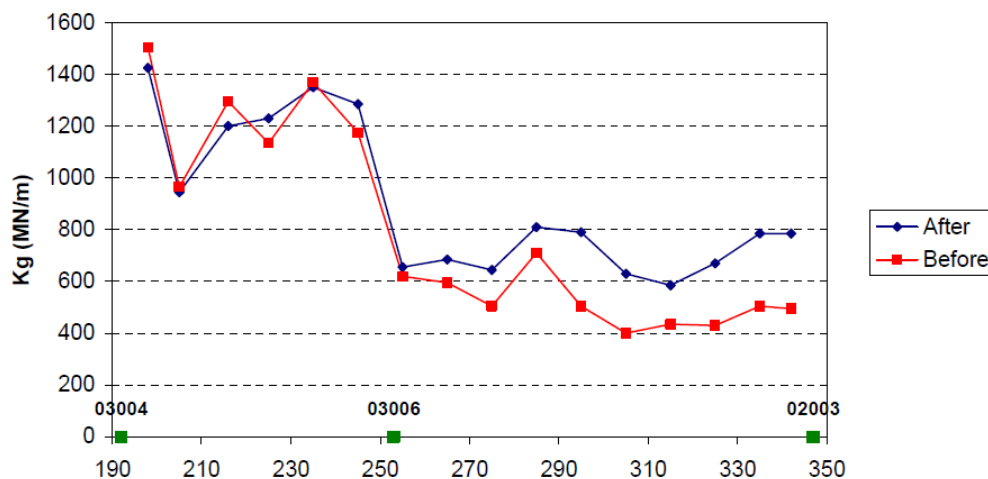
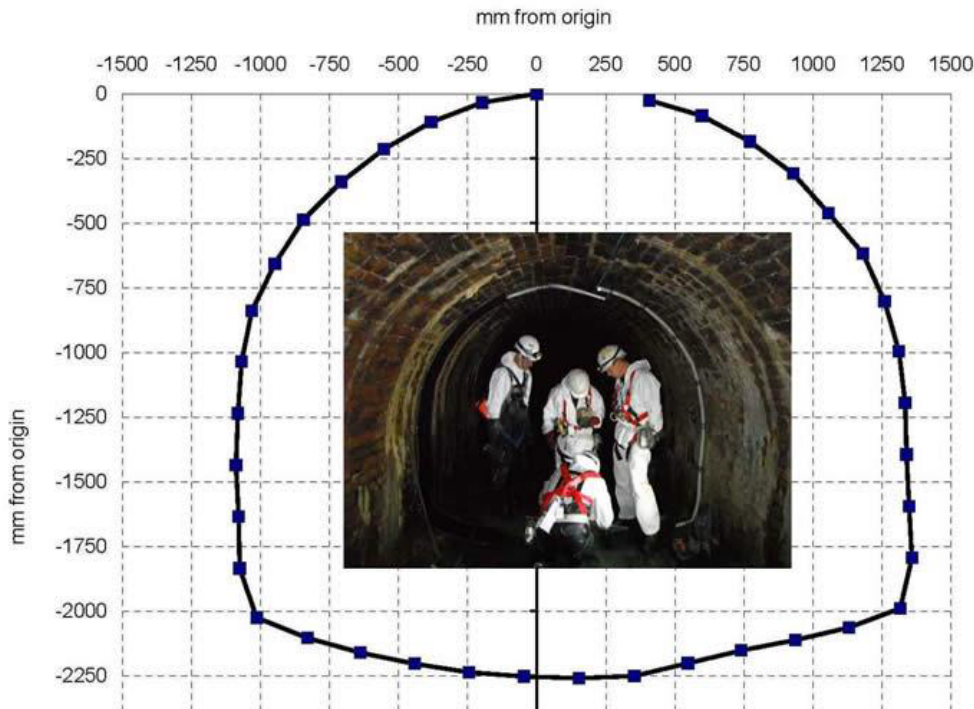


Bild 35 Gesamtsteifigkeit des „Moerriool“ nach PU-Injektion



Derzeit wird das Verformungsverhalten des Gesamtsystems über ein spezielles Monitoring-System verfolgt (SAAF – Shape Accel Array Field). Bei dieser Technik wird eine Vielzahl von Sensorelementen mit integrierten Chips kettenförmig an die Kanalwand montiert. Erfahrungen mit dieser Technik liegen bereits aus dem Bergbau vor, in London (Bild 36) wurde sie auch im Kanalbereich schon eingesetzt [23].



**Bild 36** Einsatz der SAAF-Messtechnik zum Monitoring im Londoner Kanalsystem, aus [23]

Mit den Sofortmaßnahmen konnte Zeit für die detaillierte Planung weiterer Sanierungsmaßnahmen gewonnen werden. Im weiteren Vorgehen sollen die kritischen Bereiche im Gewölbe mit Spritzbeton versteift und/oder Gerinne, Bankette und Gewölbe mit GFK-Elementen ausgekleidet werden. Darüber hinaus werden auch die Schächte durch Injektionen stabilisiert.

### 6.3 Versuchsstrecke IKT

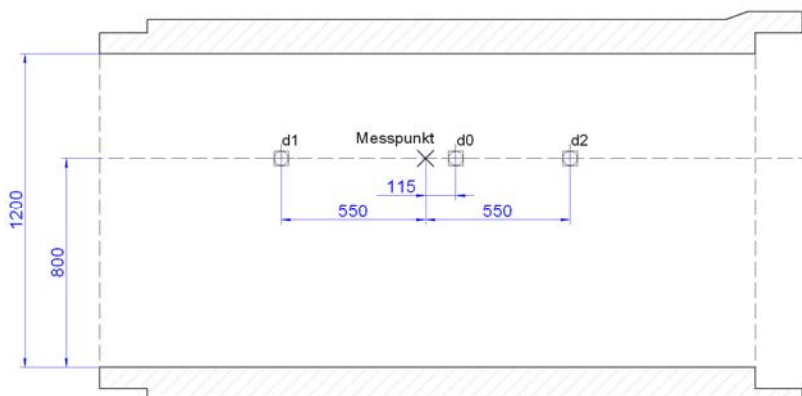
Um die Ergebnisse einer Prüfung mit dem MAC-Verfahren verifizieren zu können, wurde im IKT eine ca. 6 m lange Versuchsstrecke bestehend aus zwei Stahlbetonrohren mit Eiprofil der Nennweite DN 1200/800 aufgebaut. Stahlbetonrohre wurden verwendet, um ein Bruchversagen der Rohre zu verhindern. Durch die Verwendung von wassergefüllten Elastomerkissen konnten in Teilbereichen der Teststrecke unterschiedliche Bettungszustände reproduzierbar simuliert werden (Bild 37).

Unabhängig an welchem Messpunkt die Steifigkeit geprüft wurde, betragen die Abstände von der Mitte des Druckzylinders in horizontaler Achse zu den Wegmessmodulen  $d_1$  und  $d_2$  jeweils 550 mm und  $d_0$  115 mm. Grundsätzlich wird die Lasteinleitung in der Kämpferhöhe auf die Wandungen des Kanals aufgebracht, welche bei diesem DN

1200 / 800 Ei-Profil 800 mm zur Sohle beträgt (Bild 38 links). Die drei Teleskopstangen mit montierten Wegmessmodulen wurden an den Prüfpositionen d0, d1 und d2 verspannt, nachdem der Druckzylinder auf Kämpferhöhe ausgefahren wurde (Bild 38 rechts).



**Bild 37** Teststrecke mit Stahlbetonrohren im IKT: Bereich mit Bettungssimulation links im Bild



**Bild 38** Abstände von d0, d1 und d2 zur Druckzylindermitte (links) und Positionierung der Wegmessmodule d0, d1 und d2 (rechts)

Die Versuchsstrecke wurde intensiv zur Weiterentwicklung der MAC-Prüfeinrichtung genutzt. Ziel einer weiteren Versuchsreihe war die Optimierung der Wiederholbarkeit der Einzelmessungen. Dies ist zur Erhöhung der Sicherheit der Messungen vor Ort extrem wichtig. Genutzt werden in diesem Zusammenhang die Steifigkeitsunterschiede zwischen Muffe, Spitzende, Rohrverbindung und Rohrbettung. Zudem wies das

Rohr mit Bettungssimulation (Rohr 1) aus Vorversuchen bereits einige Längsrisse auf, welche die Gesamtsteifigkeit beeinflussten.

Für diese Versuchsreihe wurde der Bettungsdruck an Rohr 1 auf 500 mbar konstant gehalten. Gemessen wurde an jeweils drei Messpunkten in Rohr 1 und 2 (Bild 39). Die Positionierung der WMM-Teleskopstangen war analog zum Versuch „Versuchsreihen zur Rohr-Boden-Steifigkeit“. Insgesamt fanden drei Prüffahrten durch die Versuchsstrecke statt, um durch Vergleichsmessungen eine schlüssige Aussage über die Wiederholbarkeit der Einzelmessungen zu bekommen. Für diesen Vergleich wurden die exakten Prüf- und Messpositionen im Vorfeld ausgemessen und markiert (Bild 39).

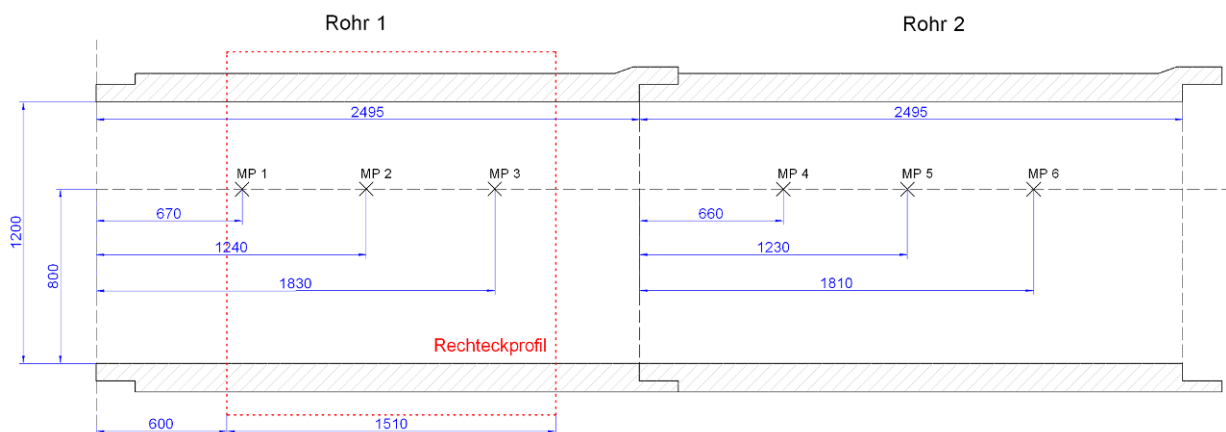


Bild 39 Positionen der Messpunkte zum Spitzende von Rohr 1 bzw. Rohr 2

Im Rahmen der Versuchsreihe wurden Einzelkomponenten der MAC-Prüfeinrichtung weiter verbessert. So konnte beispielsweise der Spiel in der Lagerung der Wegaufnahme in den Wegmessmodulen und die Fixierung an der Rohrwand deutlich verbessert werden. Auch wurde der Kugelkopf für die Lasteinleitung bezüglich der Positionierung an der Rohrwand optimiert. Bild 40 stellt die Ergebnisse der letzten Serie von drei Einzelmessungen dar.

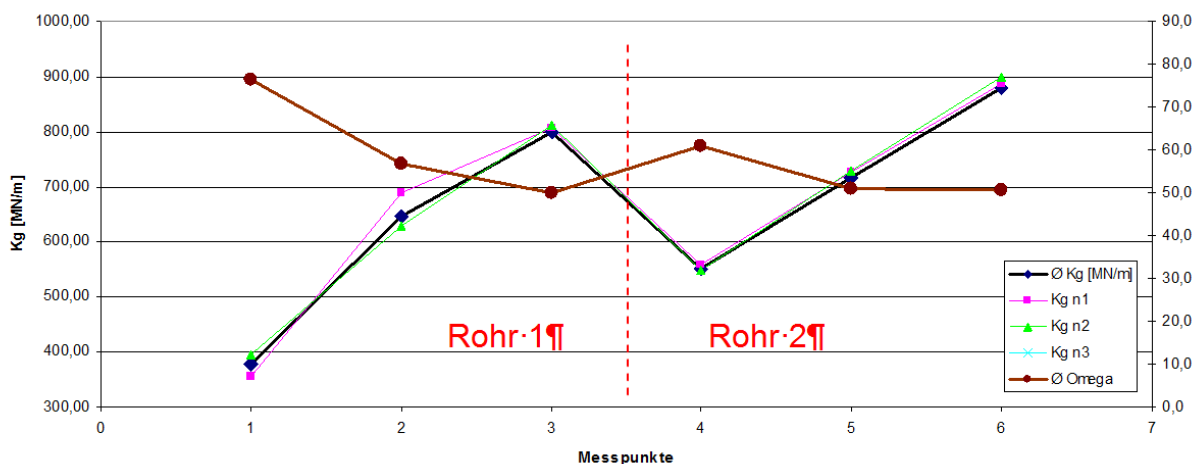
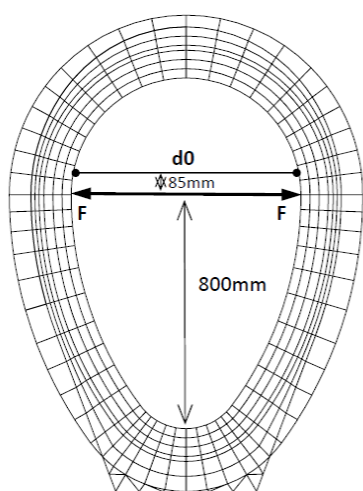


Bild 40 Steifigkeiten in der IKT-Versuchsstrecke

Aus den drei Prüfungen wurden jeweils die Mittelwerte der Steifigkeiten gebildet und der relative Fehler berechnet. Mit maximal 6,4 % wird nun eine gute Wiederholbarkeit und Linearität in den Messergebnissen erreicht. Plausibel ist auch, dass die geringste Steifigkeit an den Spitzenden und die höchste an der Muffe bzw. der Rohrverbindung auftrat.

### 6.4 Stadt Düsseldorf

In Düsseldorf wurde eine Freispiegelleitung mit Eiprofil mit dem MAC-Verfahren untersucht (Bild 41). Es handelte sich hier um einen Mauerwerkskanal, welcher in Teilbereichen einer Fugensanierung unterzogen wurde. Im Kreuzungsbereich Inselstraße/Kaiserstraße wurde das Mauerwerksprofil durch Stahlbetonrohre ersetzt.



Prüftermin	Untersuchungsschritt
05.10.2012	MAC-Messung
10.10.2012	MAC-Messung
21.03.2013	Vorinspektion
10.04.2013	MAC-Messung
24.04.2013	MAC-Messung

Bild 41 Ei-Profil DN 1200 / 800 Düsseldorf: Skizze (links) und Prüftermine (rechts)

Der fragliche Abschnitt des Kanals von ca. 230 m Länge ist über mehrere Schachteinstiege zugänglich sowie ausreichend belüftet (Bild 42). Die Vorflutsicherung erfolgte durch Absperren.

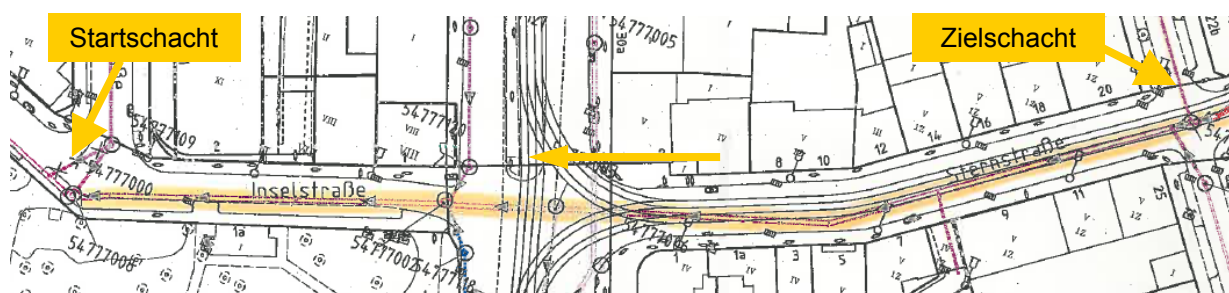


Bild 42 Katastrerauszug Haltung Düsseldorf Inselstr. / Sternstr.

Die zu prüfende Haltung verläuft unter der Inselstraße, durchläuft mit einer Länge von ca. 20 m die Hauptverkehrsader Kaiserstraße und geht über in die Sternstraße. Das gemauerte und teilweise sanierte Eiprofil lässt sich in drei Teilabschnitte unterteilen, welche nacheinander geprüft wurden (Tabelle 15). Mit der MAC-Prüfeinrichtung wurde die Haltung befahren und an 23 Messpunkten die Steifigkeit geprüft. Der 1. Abschnitt

wurde in der Vergangenheit schon einer Fugensanierung unterzogen. Im Zuge dessen wurde die Sohle mit Fliesen ausgebettet. Aufgrund der oberirdisch kreuzenden Straßenbahn und Hauptverkehrsader wurde im Kreuzungsbereich ein Beton Ei-Profil verbaut, welches in einen unsanierten Mauerwerkskanal übergeht.

Tabelle 15 *Haltungs-Abschnitte*

Abschnitt	Länge	Kanaltyp	DN	Sanierung	Strasse
1	85	Mauerwerk	1200 / 800	sanierte Fugen und Fliesensanierte Sohle	Sternstrasse
2	20	Beton	1250 / 900	-	Kreuzung Sternstr. / Inselstr.
3	125	Mauerwerk	1200 / 800	unsaniert	Inselstrasse

Die zu prüfende Haltung wurde im Vorfeld gereinigt. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde zur Belüftung der nächste Schachteinstieg in Prüfungsrichtung geöffnet. Bei der Vorinspektion zeigte sich, dass die Haltung keine sichtbaren Schäden aufweist.

Die zur Steifigkeitsprüfung eingesetzte MAC-Prüfeinrichtung sollte zunächst im zusammengebauten Zustand in die Haltung abgelassen werden (Bild 43 links). Dies gelang nicht problemlos, obwohl im Vorfeld die Maschine für einen 62,5 cm breiten Schachtkonus entwickelt wurde. Erst durch eine Reduzierung der Schlittenbreite und einer Demontage der Prüfmaschine in fünf Einzelteile – Zylinder, Schlitten, Batterie, Räder, Fahrwagen – gewährleistete einen unproblematischen Einlass (Bild 43 rechts). Die Einzelteile wurden in der Haltung wieder montiert.



Bild 43 *Herablassen der MAC-Prüfeinrichtung (links) und des Scherenarms (rechts) in die Haltung*

Bei Durchführung der Prüfung im 1. Abschnitt (Tabelle 15) wurde eine Verringerung der Kanalhöhe durch die fliesensanierte Sohle festgestellt. Da zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung die Zylinderposition in der Höhe nicht verstellbar war, griffen die Lastplatten zu hoch an der Kanalwandung an. Da dort die Wandung bereits schräg nach oben zusammenläuft, wirkte bei Krafteinleitung eine resultierende Komponente der Kraft auf den MAC-Fahrwagen. Auch rutschten die Lasteinleitungsplatten nach unten. Es konnte keine stabile Lage hergestellt werden. Die Prüfungen im 2. und 3. Abschnitt (Tabelle 15) funktionierten dagegen aufgrund der größeren Kanalhöhe sehr gut. Die Lasteinleitungsprobleme wie im Abschnitt eins waren nicht vorhanden. Um auf schwankende Kanal- und Prüfhöhen zu reagieren, wurde im Nachgang ein Elektrozyylinder montiert über den die Höhenverstellung des Scherenarms geregelt werden kann.



**Bild 44** Fugensanierter Mauerwerkskanal mit Fliesensanierter Sohle (links) und Positionierung der MAC-Prüfeinrichtung im Betonabschnitt (rechts)

Aufgrund der sanierten Sohle durch einen Fliesenspiegel (Bild 44 links) ließ sich die Prüfmaschine nur sehr schlecht voranschleichen. Ein ständiges Abrutschen der Räder an den Sohlwänden hatte hierbei zur Folge, dass sich die Prüfeinheit in Längsrichtung des Kanals drehte und in den Sohlbereich abzurutschen drohte. Ein Vorschleichen im unsanierten Leitungsabschnitt ohne Fliesenspiegel erwies sich im Gegensatz dazu als unproblematisch. Durch einen Wechsel von einer 4-Räder Vollgummi- auf eine 6-Räder Luftbereifung und der Montage von Griffen zum Bewegen und Lenken lies sich die Prüfmaschine leichter steuern und voranschleichen. Zusätzlich sind vorhandene Löcher in der Sohle durch die 6-Rad-Bereifung leichter zu überwinden, da immer 4 von 6 Rädern Kontakt zum Boden haben.

Bei den ersten Prüfungen kam der Scherenarm mit vormontierten Wegmessmodulen zum Einsatz. Es zeigte sich, dass die Anbringung des Wegmessmodules an der vom MAC-Inspekteur abgewandeten Seite sehr problematisch in dem kleinen Profil war. Zwar funktionierte die Scherenarmentwicklung zufrieden stellend, die im IKT-Testkanal eingesetzte Verspannungsmöglichkeit war aber aufgrund der angelegten persönlichen Schutzausrüstung (PSA) nicht zu erreichen. Bei weiteren Prüfungen wurde die Sche-

renarme durch drei Wegmess-Teleskopstangen mit vormontierten Wegmessmodulen ersetzt (Bild 44 rechts).

Der Auf- und Abbau dauerte jeweils eine Stunde. Die Radmontage wurde im Zuge dessen auf ein Minimum begrenzt. Zuvor wurde jedes Rad mit jeweils vier Schrauben fest am Rahmen montiert. Durch den Umstieg auf eine Montage mit jeweils zwei Winkeln, welche als Verbindung zwischen Rahmen und Rad dienen, reduzierte sich die Aufwand auf 45 Minuten.

Nach Abschluss der Prüfungen wurden die 23 Messpunkte über die 230 m Prüfstrecke in einem Steifigkeitsdiagramm dargestellt (Bild 45). Dem Diagramm ist eine vorläufige Zoneneinteilung von Bereichen vergleichbarer Steifigkeit sowie der Mittelwert je Zone zu entnehmen. Die Zonen lassen sich folgendermaßen beschreiben:

#### **Zone 1:**

Die Qualität des fugensanierte Mauerwerkskanal mit fliesensanierter Sohle ist durchschnittlich bis gut. Im Mittel hat der sanierte Bereich im Gegenzug zum unsanierten Mauerwerkskanal in Zone 3 an Stabilität gewonnen. Der schwächste Messpunkt dieser Zone befindet sich bei 35 m (Messpunkt 4).

#### **Zone 2:**

Die Qualität des Beton Ei-Profiles ist sehr gut an den Abszissen 85 m und 95 m. Durchschnittlich ist sie bei der Abszisse 96 m. Lediglich die Abszisse 90 m (Messpunkt 9/10) fällt aus dem Rahmen mit einer Steifigkeit von 331 KN/m. Hier ist eine Messfehler zu vermuten.

#### **Zone 3:**

Die Qualität des unsanierten Mauerwerkkanals ist durchschnittlich bis schlecht. Der schwächste Messpunkt befindet sich bei der Abszisse 205 m (Messpunkt 21) mit einer Steifigkeit von 109,5 KN/m.

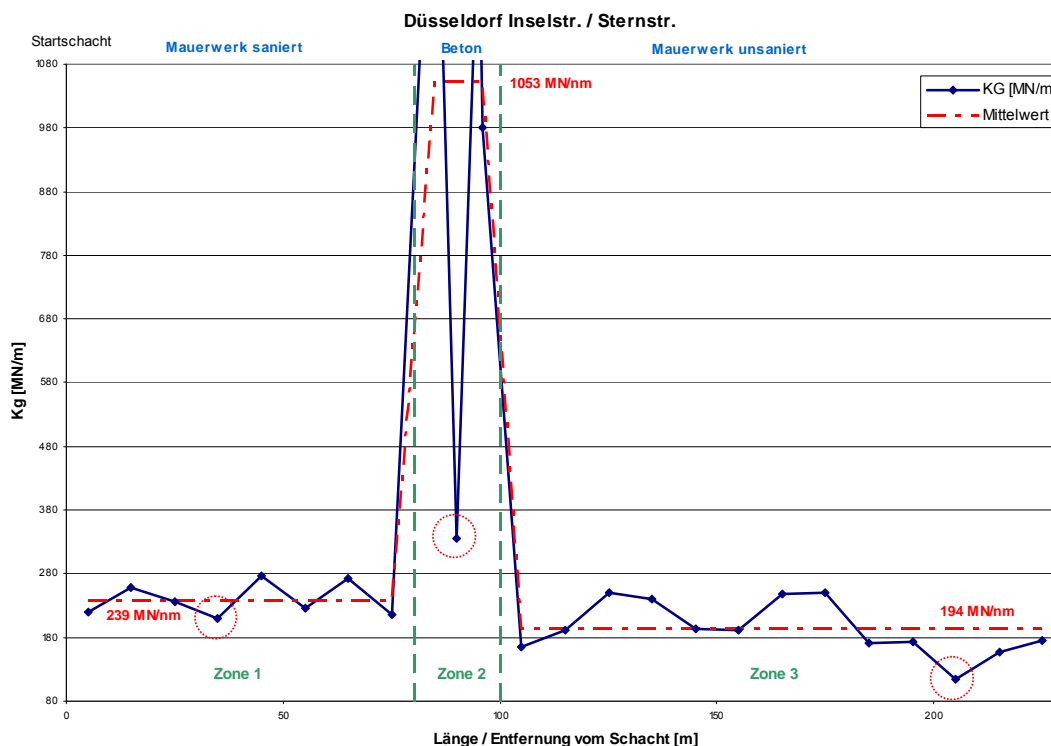


Bild 45 Steifigkeitsdiagramm der Haltung Düsseldorf Inselstr. / Sternstr.

### Schlussfolgerung:

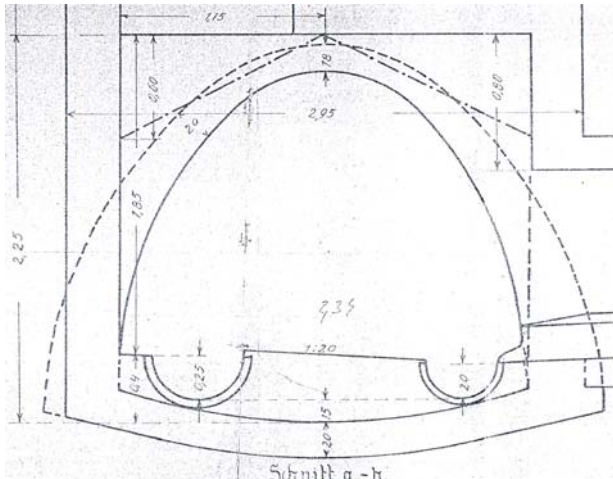
Durch die fünf Praxiseinsätze in der Haltung konnte die MAC-Prüfeinrichtung maßgeblich verbessert und weiterentwickelt werden. Der Prüfablauf wurde durch eine Vorinspektion beschleunigt, da im Vorfeld die Messpunkte markiert wurden. Somit muss das MAC-Prüfgerät nur noch zu den zu prüfenden Messpunkten geschoben werden.

Die Empfehlung weiterführender Maßnahmen orientiert sich an der Homogenität der jeweiligen Zone. An den schwächsten Messpunkten (Bild 45) sollten begleitend weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um so eine solide Aussage über die Standsicherheit der gesamten Haltung zu treffen. Für eine Abschätzung können Bohrproben an dem jeweiligen Messpunkt gezogen werden um mittels FEM-Berechnung die Ergebnisse der MAC-Prüfung zu belegen und schlussendlich eine Aussage über die Standsicherheit an dem Messpunkt zu treffen.

## 6.5 Stadt Schwerte

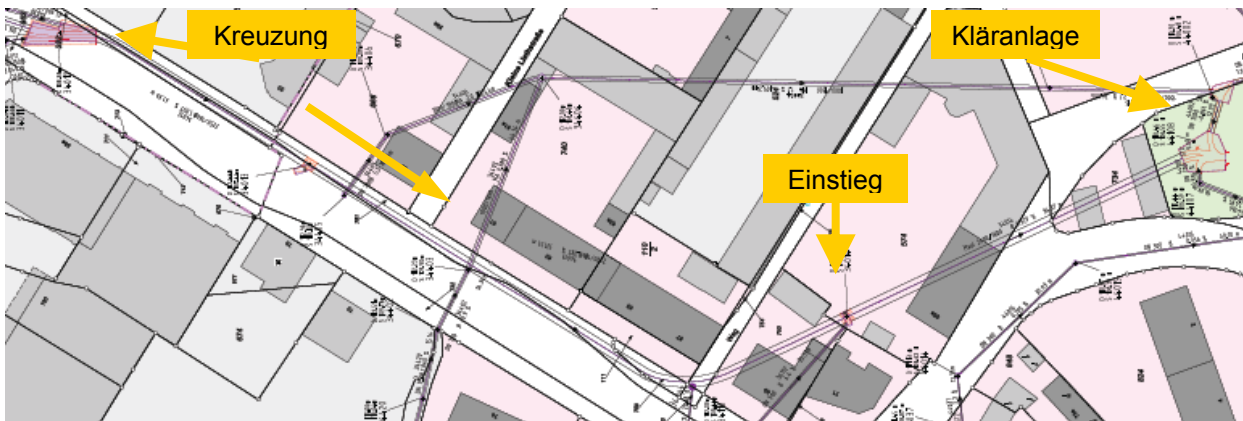
Die Stadtentwässerung Schwerte betreibt ein Beton-Maulprofil DN 2250/1860 mit einem Mittelbankett als Freispiegelleitung (Bild 46). Die zu prüfende Haltung verläuft von der Kreuzung Beckestr./Hagener Str über die Straße „Obere Meischede“ zur Kläranlage und ist 200 m lang (Bild 47). Die Leitung wurde mit dem MAC-Verfahren geprüft, um festzustellen, ob eine Sanierung notwendig ist.





Prüftermin	Untersuchungsschritt
14.11.2012	MAC-Messung
11.12.2012	MAC-Messung
13.02.2013	Vorinspektion
26.03.2013	MAC-Messung
03.04.2013	MAC-Messung
02.05.2013	MAC-Messung

**Bild 46** Maulprofil mit Mittelbankett DN 2250 / 1860 Schwerte



**Bild 47** Katastrerauszug Haltung Schwerte "Obere Meischede"

Bereits bei der Vorinspektion zeigte sich, dass das Mittelbankett große Löcher aufweist. Der Scheitelbereich zeigte in Teilen der Strecke Risse und Ablagerungen im Kämpferbereich (Bild 48). Der normale Prüfschritt betrug 10 m. An Stellen, die Risse aufwiesen wurde keine Prüfung durchgeführt.

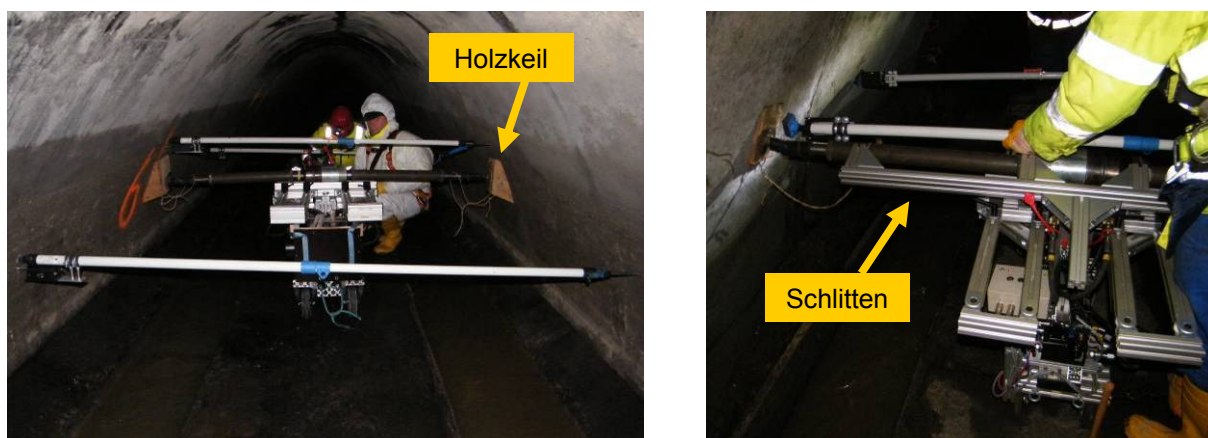


**Bild 48** Typische Schadensbilder: Rissbildung (links) und Ablagerungen (rechts)

Der Einstieg in den Schacht erwies sich in den ersten Versuchen als problematisch, da dort zu viele Auflagerringe verwendet wurden. Somit mussten die Räder für das Herablassen der Prüfeinheit abmontiert werden.

Die MAC-Prüfeinrichtung wurde in Einzelteilen in den Schacht abgelassen und in der Haltung wieder montiert. Auf dem Bankett war ein gutes Vorkommen möglich. Die sechs Räder, welche schon in Düsseldorf eingesetzt wurden, haben sich bewährt, da teilweise starke Schäden im Bankett sehr gut und schnell zu überwinden waren.

Aufgrund des Sonderprofils ergaben sich Probleme bei der Einleitung der Last in die Kanalwänden auf einer Prüfhöhe von 700 mm. Die Lastplatten rutschten wegen des Winkels langsam nach unten. Auch extra geschreinerte Holzkeile haben nicht den gewünschten Erfolg gebracht, da sie durch die aufgebrauchten Lasten sehr schnell zerplatzten, als die Lasteinleitung auf den Lastübertragungskeil nicht zu 100 % in Waage erfolgte. Ein zusätzliches Problem ergab sich durch die fehlende Wölbung im Klotz, damit dieser sich der Wandung anpasst. Somit ist dieser bei der genannten Sonderprofilproblematik mit abgerutscht, ins Fließwasser gefallen und weggeschwommen. Abhilfe schaffte ein Sicherungsseil, welches am Klotz und am Zylinder befestigt wurde. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Lasteinleitungsplatte des Druckzylinders neu konzipiert.



*Bild 49 Positionierung der MAC-Prüfeinrichtung (links), verbreiterte Auflagefläche für den Druckzylinder (rechts)*

Durch den großen Prüfquerschnitt musste der Zylinder mit Adapter verlängert werden, damit die Lasteinleitungsplatten auch Wandkontakt bekommen (Bild 49 links). Damit die Adapter der Lasteinleitungsplatten mehr Auflagefläche haben, musste der Schlitten verlängert und verbreitert werden (Bild 49 rechts), da aufgrund des Gewichtes eine leichte Verformung nach unten stattfand. Im späteren Verlauf wurden die Adapter noch einmal angepasst, da der Zylinder zuviel Hub geben musste, damit die Lasteinleitungsplatten überhaupt Druck auf die Wandungen aufbringen konnten. Dadurch wird auch der Prüfablauf beschleunigt.

Ein generelles Problem in diesem Profil war der geringe Weg des Zylinders. Damit die Fortbewegung mit eingefahrenem Zylinder ohne Wandkontakt erfolgen kann, wäre der

Einsatz eines Zylinders mit mehr Hub erforderlich, da der Innendurchmesser dieses Kanals durch Verkrustung, Sanierung oder Verformung variieren kann (Bild 48 rechts).

Bei der Positionierung der Wegmessmodul-Teleskopstangen verloren diese durch die Krümmung öfters den Halt. Durch Anspitzen der Stangen konnte dieses Problem behoben werden.

Geprüft wurde schließlich an 23 Messpunkten – vom Schacheinstieg aus fünf in Fließ- und 18 gegen die Fließrichtung. Die Prüf- und Kanalhöhe schwankt aufgrund von Ablagerungen am Scheitel sowie Unebenheiten in der Sohle. Die Steifigkeit schwankt zwischen 434 MN/m und 2429 MN/m (Bild 50). Die geprüfte Haltung wurde in drei Zonen eingeteilt (Tabelle 16) um eine fundierte Aussage zur Prüfung zu geben.

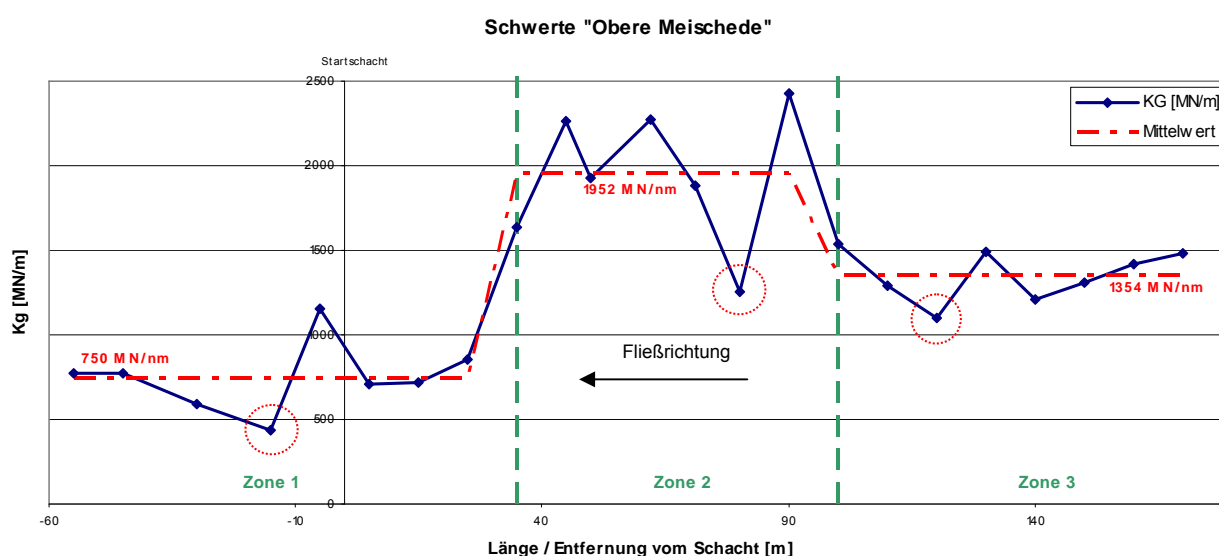


Bild 50 Steifigkeitsdiagramm der Haltung Schwerte "Obere Meischede"

Tabelle 16 Zoneneinteilung der Haltung

Zone	Anfang	Ende	Mittelwert [MN/m]	Steifigkeit
1	-55	25	750	geringe
2	35	90	1952	hohe
3	100	170	1354	mittlere

Es lässt sich eine Aussage über die Homogenität der jeweiligen Teilabschnitte treffen.

**Zone 1:**

Die Qualität des Betonrohres ist mit einer Steifigkeit von 750 KN/m durchschnittlich bis schlecht. Der schwächste Messpunkt befindet sich bei -15 m (Messpunkt 2).

**Zone 2:**

Die Qualität des Betonrohres ist mit einer Steifigkeit von durchschnittlich 1952 KN/m sehr gut. Lediglich die Abzisse 80 m (Messpunkt 10) fällt aus dem Rahmen mit einer Steifigkeit von 1257 KN/m.

**Zone 3:**

Die Qualität des Betonrohres ist mit einer Steifigkeit von 1354 KN/m durchschnittlich bis gut. Der Schwächste Wert wurde bei 120 m (Messpunkt 14) aufgenommen.

**Schlussfolgerung:**

Bei den ersten Befahrungen wurden Praxiserfahrungen gesammelt, die parallel zu den Praxiseinsätzen in Düsseldorf wesentlich zur Weiterentwicklung beitragen. Die Besonderheit bestand darin, über einen großen Querschnitt sowie der Maulform hinweg zu prüfen. Schlussendlich wurde auch hier eine Vorinspektion durchgeführt, um vorweg die zu prüfenden Messstellen zu markieren und vorab optische Schäden zu dokumentieren.

In jeder der drei Zonen befindet sich ein Messpunkt, der von dem Mittelwert mehr abweicht als die anderen (Bild 50). An diesen sind weitere Untersuchungen durchzuführen, um die Standsicherheit an diesen Stellen zu überprüfen. Dafür könnten Bohrproben an dem jeweiligen Messpunkt gezogen werden, um mittels FEM-Berechnung die Ergebnisse zu kontrollieren und auch eine Aussage über die Standsicherheit zu treffen.

## 6.6 Öffentlichkeitsarbeit

Das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur hat auf der IFAT 2012 als Schwerpunkt das Thema „LARGE PIPES and SEWERS“ aufgegriffen. Es war der thematische Schwerpunkt am Stand des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur. Besonderes Interesse kam dem zerstörungsfreien Prüfverfahren mit der Bezeichnung „MAC“ zuteil.

Am Messestand erläuterte der Entwickler des Prüfprinzips Dr. Olivier Thepot vom französischen Netzbetreiber Eau de Paris die Funktionsweise der MAC-Prüfeinrichtung anhand eines 1:1-Prototypen, den IKT-Experten entwickelt haben: "Ich bin wirklich beeindruckt von den Fortschritten, die das MAC-Gerät im IKT gemacht hat. Besonders freut mich das Interesse der IFAT-Besucher am MAC-Gerät. Hoffen wir, dass es bald auch in Deutschland eingesetzt wird."



*Bild 51 Bert Bosseler, IKT, (links), demonstriert dass mit der Messtechnik der MAC-Prüfeinrichtung auch in Glasrohren Verformungen und Steifigkeiten direkt messbar sind und Olivier Thépot, Eau de Paris, (rechts) erläutert die Funktionsweise der MAC-Prüfeinrichtung anhand eines 1:1-Prototypen*

Darüber hinaus demonstrierte PD Dr. Bert Bosseler, Wissenschaftlicher Leiter des IKT, die Wirkungsweise der hochkomplexen Messtechnik am 1:1-Prototypen sowie an einem Miniatur-Modell aus Glas: "Das MAC-Verfahren liefert erstmals direkte Messwerte für die Rohr- und die Bodensteifigkeit. Messtechnisch ist dies eine besondere Herausforderung, denn wir wollen die Rohre ja keinesfalls beschädigen, und der Boden wird nur im Bereich von Mikrodeformationen beansprucht. Unsere Besucher konnten sich auf der IFAT selbst überzeugen, dass unsere Messtechnik funktioniert. Sogar in Glasrohren waren Verformungen und Steifigkeiten direkt messbar, ohne die geringste Schädigung!"

Die Diskussion mit zahlreichen Netzbetreibern zeigte ein großes Interesse am Einsatz eines solchen Messsystems. Häufig stellt sich die Frage nach der Standsicherheit von älteren Kanälen, welche mit dieser Methode weitgehend zerstörungsfrei beantwortet werden kann.

## 7 Fachliche Einordnung der Prüfergebnisse

### 7.1 Analytischer Berechnungsansatz

#### 7.1.1 Nicht gerissene Rohre (Altrohrzustand I)

##### a) Vorbemerkungen

Die Summe aus der Schalensteifigkeit  $K_0$  und der Bodensteifigkeit  $K_S$  ergibt die Gesamtsteifigkeit  $K_G$  des Systems (= MAC-Steifigkeit):

$$K_G = K_S + K_0 \quad (7.1)$$

Ziel der folgenden Untersuchungen ist, die maßgebenden Einflussgrößen

- Verhältnis der Schalen- zur Bodensteifigkeit
- Wanddicke
- Ort der Lastaufbringung
- Einfluss von Längsrissen

sowie die Ergebnisse (Verformungen) **für den einfachen Fall der Kreiszylinderschale** darzustellen. Ferner soll die Steifigkeit  $K$  und das Abklingverhalten  $\Omega$  der Sammlerwand allein und der Wand mit umgebendem Boden für den einfachen Fall durch geschlossene Formeln angenähert werden. Die Kalibrierung erfolgt durch ein räumliches FE-Modell.

##### b) Statische Modelle

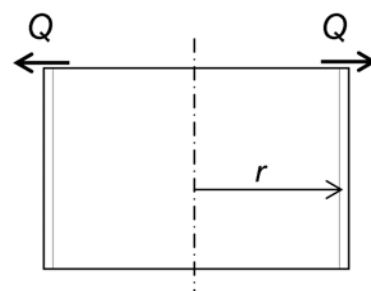
Die Differentialgleichungen der Kreiszylinderschale und des elastische gebetteten Balkens sind einander ähnlich. Diese Analogie wird im Folgenden verwendet, um das räumliche Problem der Belastung im MAC-Versuch auf das ebene Problem des elastisch gebetteten Balkens als Ersatzsystem zu überführen.

Die Verformungen eines **Kreisrohres mit rotationssymmetrischer Randlast  $Q$**  berechnen sich mit der Schalentheorie nach [24] wie folgt:

$$w(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{B} \cdot \frac{r^3}{\kappa^3} \cdot e^{-\kappa \cdot \frac{x}{r}} \cdot \cos\left(\kappa \cdot \frac{x}{r}\right) \quad (7.2)$$

mit

$$\kappa = \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{r^2}{t^2}}$$



$$B = \frac{Et^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cong EI$$

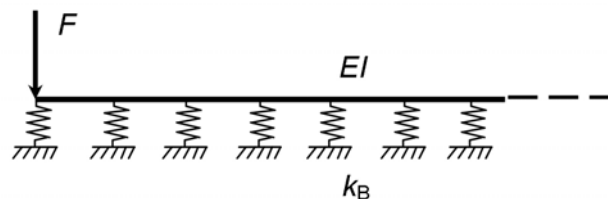
= Biegesteifigkeit,  $\mu$  = Querdehnzahl

Die Biegelinie des **elastisch gebetteten Balkens mit einer Einzellast F** am freien Rand folgt nach [25] der Balkentheorie nach der Gleichung:

$$w(x) = \frac{2F}{k_B \cdot \lambda} \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} \cdot \cos\left(\frac{x}{\lambda}\right) \quad (7.3)$$

mit

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{4EI}{k_B}}$$



$k_B$  = Federsteifigkeit der elastischen Bettung

Die beiden Gleichungen lassen sich ineinander überführen, wenn die Dehnsteifigkeit  $D$  der Schale als Federsteifigkeit des Balkens  $k_B$

$$k_B = D = Et / r^2$$

aufgefasst wird.

Wird die Schale als aufeinander folgende dehnsteife Ringe betrachtet, so stellt die Dehnsteifigkeit der Ringe die Federsteifigkeit eines in Längsrichtung der Schale angenommenen Balkens dar.

Im vorliegenden Fall liegt jedoch keine konstante Randlast  $Q$  (in kN/m) sondern zwei gegenseitige Einzellasten  $F$  (in kN) vor. Damit wird neben der Dehnsteifigkeit die geringere Biegesteifigkeit der Schale eine Rolle.

Die Einzellast kann durch eine Fourierreihe über den Umfang angenähert werden. Für das erste Reihenglied ( $m = 1$ ) gilt nach Girkmann [26] die folgende Lösung:

$$w(x) = C_1 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \cdot \cos(\beta \cdot x) \quad (7.4)$$

mit 
$$\alpha = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3 + \frac{1}{k}} + 1}$$

$$\beta = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3 + \frac{1}{k}} - 1}$$

$$k = \frac{B}{D \cdot r^2} = \frac{t^2}{12 \cdot r^2}$$

Diese Lösung mit  $m = 1$  Reihenglied reicht jedoch nicht aus, um die Verformungen und das Abklingverhalten ausreichend genau zu beschreiben.

**c) Steifigkeit und Übertragungsverhältnis des Ersatzbalkenmodells**

Die Steifigkeit des Systems ergibt sich aus dem Quotient der Kraft und der zugehörigen Verformung, also

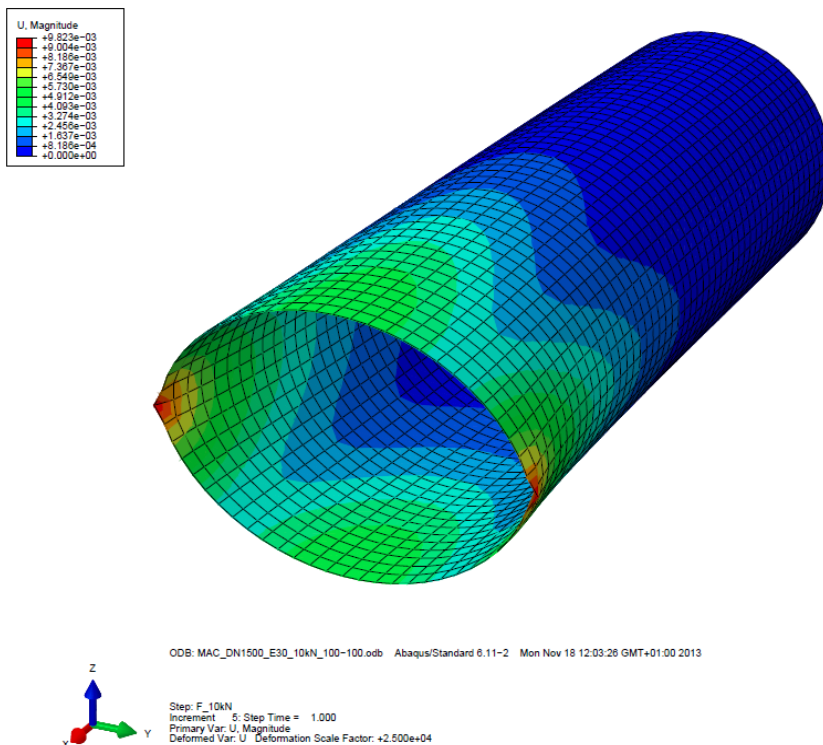
$$K = \frac{F}{w(0)} \tag{7.5}$$

Das Übertragungsverhältnis (Abklingfaktor) folgt für den Abstand  $a$  der Nebenmessungen von der Hauptmessung

$$\Omega = \frac{w(a)}{w(0)} \tag{7.6}$$

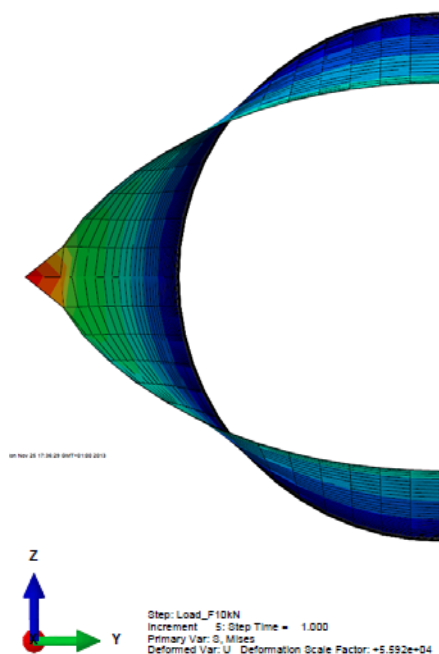
**d) Steifigkeit und Abklingfaktor des FE-Modells**

Im Folgenden werden die Ergebnisse für ein räumliches FE-Modell der gebetteten Kreiszylinderschale bei Variation der Parameter  $t$ ,  $k_B$  und Lastangriffsstelle dargestellt.

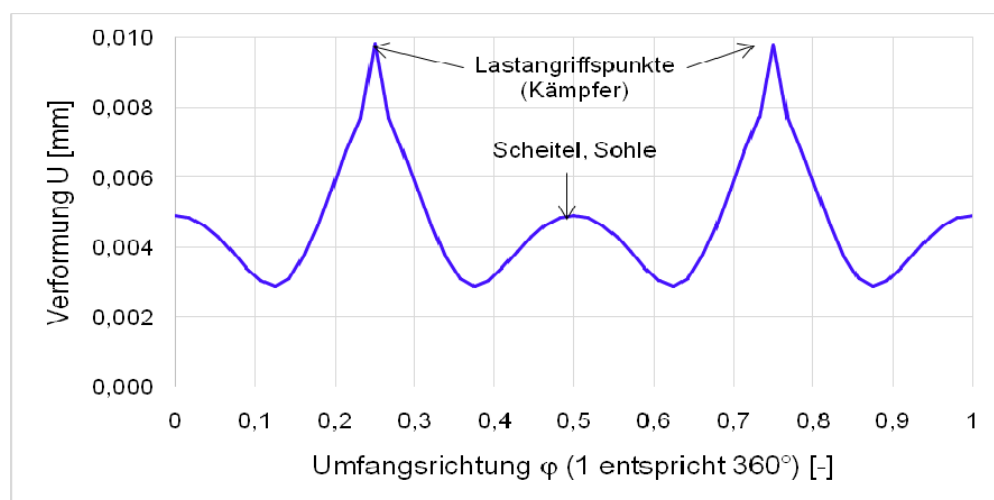


**Bild 52** *Verformungen  $U$  des Schalenmodells  $t = 225$  mm bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN in Rohrmittle (Schale in der Mitte geschnitten)*





**Bild 53** Verformungen  $U$  des Schalenmodells  $t = 225$  mm bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN in Rohrmittle (Schale in der Mitte geschnitten)



**Bild 54** Gesamtverformung  $U$  des Schalenmodells  $t = 225$  mm bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10$  kN in Rohrmittle, Darstellung in Umfangsrichtung

Aus Bild 53 und Bild 54 ist zu erkennen, dass an den Lastangriffspunkten in den Kämpfern die größten Verformungen  $\max v_y$  auftreten (y-Richtung nach Bild 53). Senkrecht zur Lastebene beträgt die Verformung nach innen  $v_z \cong 50\%$  von  $\max v_y$ , vgl. Bild 54.

Dies bedeutet, dass durch Rohrschäden in Scheitel und Sohle verringerte Steifigkeiten ebenfalls Auswirkungen auf die Ergebnisse der MAC-Prüfung haben. Ob nur örtlich begrenzte Schäden oder Schwächungen vorliegen, kann nur durch Inspektion und ggf. Kernbohrungen ermittelt werden. Solche Fälle können z.B. bei Sammlern aus Stampfbeton auftreten, wenn der Frischbeton im Scheitelbereich nur gering verdichtet wurde.

Das durch die Gleichungen (7.2) bis (7.4) beschriebene Abklingverhalten der Verformungsfunktion in Längsrichtung ist auch aus der Auswertung der FE-Berechnungen im Bild 55 bis Bild 57 zu entnehmen.

Alle Berechnungen werden für ein unendlich langes Rohr durchgeführt. Die Bettung durch Boden wird durch voneinander unabhängige Federelemente simuliert – die Verwendung von Volumenänderungen hätte aufgrund der zusätzlichen Schubspannungen zwischen den Federn etwas geringere Verformungen zur Folge.

Im Bild 55 bis Bild 57 werden die Varianten nach Tabelle 17 berechnet.

Tabelle 17 Parametervariationen für ein Rohr DN 1500 aus unbewehrtem Beton mit  $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$  und  $\mu = 0,2$

Wanddicke	Verformungsmodul des Bodens	Last in Rohrmitte	Last am Rohrende
$t$ [mm]	$E_2$ [Nmm <sup>2</sup> ]	$F = 10 \text{ kN}$	$F = 10 \text{ kN}$
225	0	Bild 55	Bild 56
	20	Bild 55	-
	200	Bild 55	Bild 56
150	0	-	Bild 57
	200	-	Bild 57

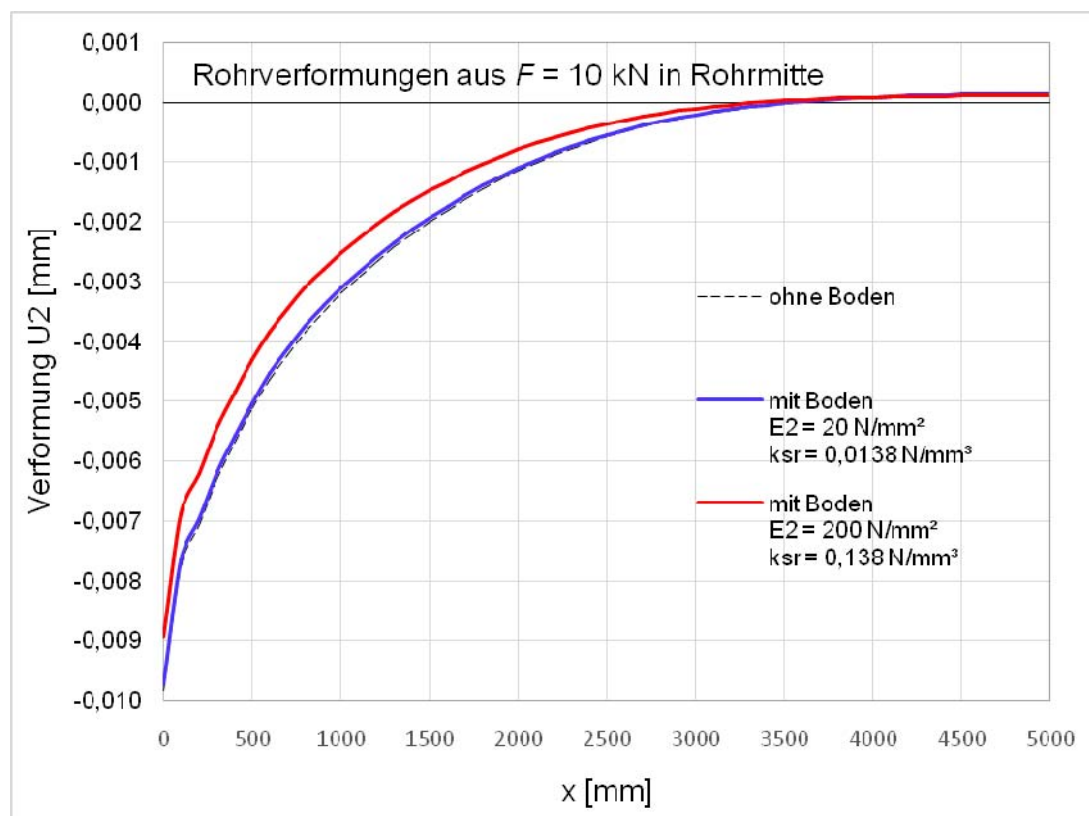


Bild 55 Verformungen  $U_2$  des Schalenmodells  $t = 225 \text{ mm}$  in Längsrichtung bei gegenseitiger Einzellast  $F$  in Rohrmitte,  $x = 0 = \text{Schalenmitte}$

Aus Bild 55 geht hervor, dass für  $E_2 = 20 \text{ N/mm}^2$  und eine Rohrwanddicke von 225 mm keine Unterschiede erkennbar sind. Dagegen treten bei einem Boden mit dem Mikromodul  $200 \text{ N/mm}^2$  etwas geringere Verformungen auf.

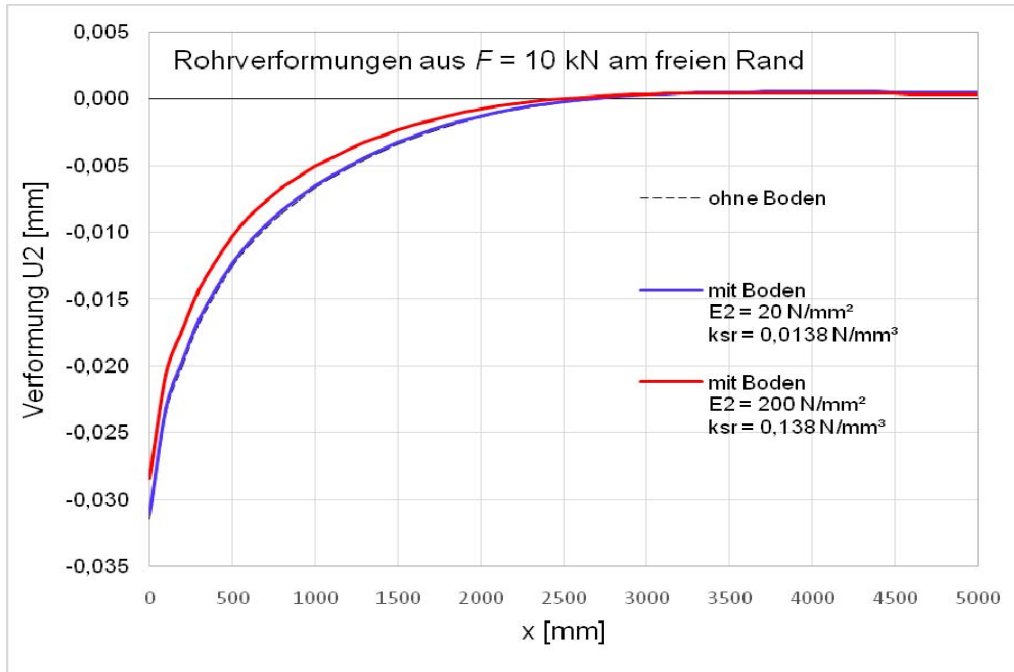


Bild 56 Verformungen  $U_2$  des Schalenmodells  $t = 225 \text{ mm}$  in Längsrichtung bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10 \text{ kN}$  am freien Rand der Rohrschale

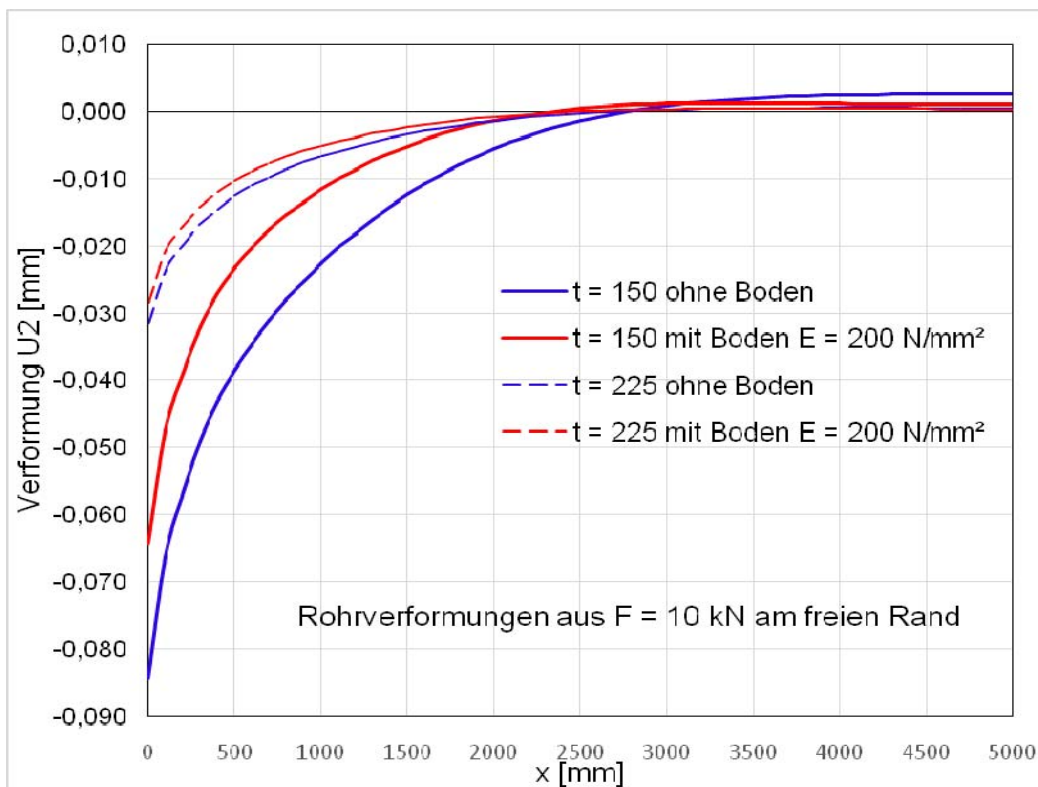


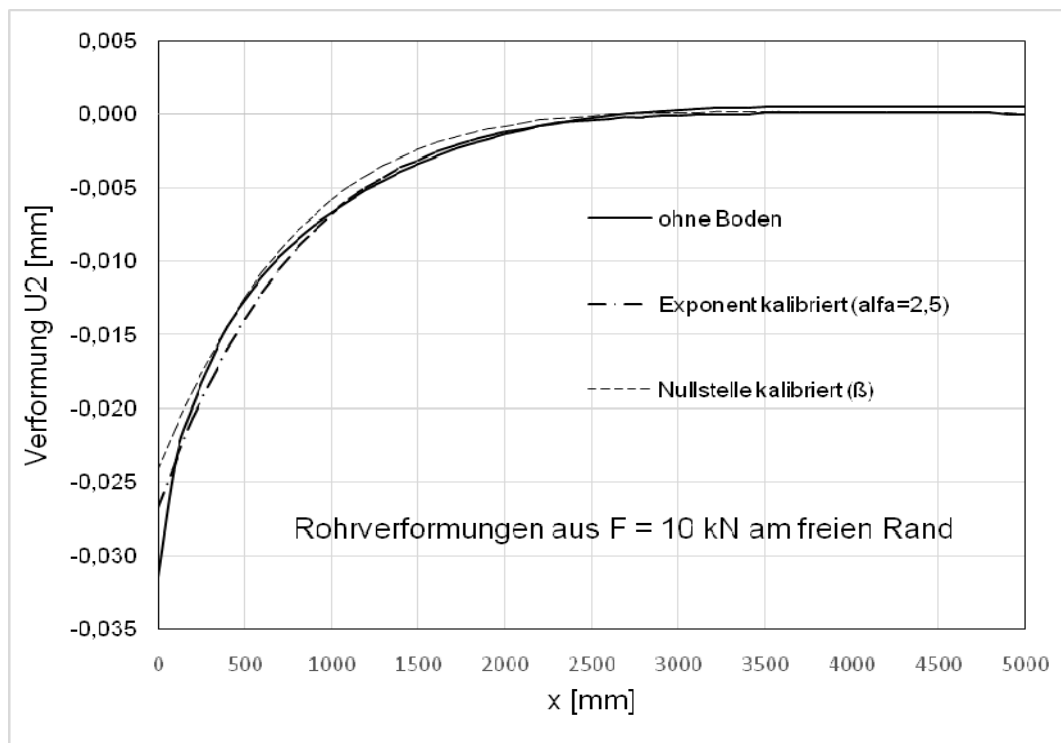
Bild 57 Verformungen  $U_2$  in Längsrichtung bei gegenseitiger Einzellast  $F$  in Rohrmitte,  $x = 0 = \text{Schalenmitte}$

Am deutlichsten ist der Unterschied für weniger steife Betonrohre mit 150 mm Wanddicke und Einzellasten am Rohrende, s. Bild 57 und Tabelle 18.

**Tabelle 18** *Verformungen an der Lasteinleitungsstelle für ein Rohr DN 1500 aus unbewehrtem Beton mit  $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$  für die Varianten nach Tabelle 17*

Wanddicke	Verformungsmodul des Bodens	Verformung unter der Last in Rohrmitte	Verformung unter der Last am Rohrende
$t$ [mm]	$E_2$ [Nmm <sup>2</sup> ]	$v_y$ [mm]	$v_y$ [mm]
225	0	0,00098	0,00843
	20	0,00097	-
	200	0,00089	0,00643
150	0	-	0,00314
	200	-	0,00284

Hinweis: Die Belastung  $F$  stellt eine Singularität dar, die Verformungen  $v_y$  unter der Last sind daher etwas zu groß, vgl. den Knick der Verformung des direkt belasteten Elementes im Bild 52 bis Bild 54. Diese Ungenauigkeit kann durch eine flächige Lasteinleitung entsprechend der MAC-Lasteinleitungsstruktur vermieden werden. Für die Vergleiche ist jedoch die Betrachtung als Einzellast ausreichend.



**Bild 58** *Verformungen  $U_2$  des Schalenmodells  $t = 225 \text{ mm}$  ohne Boden in Längsrichtung (vgl. Bild 56) bei gegenseitiger Einzellast  $F = 10 \text{ kN}$  am freien Rand der Rohrschale, Vergleich mit verschiedenen Näherungsfunktionen Gl. (7.4)*

Die Kurven aus Bild 56 und Bild 57 können durch die folgenden drei Parameter der Gleichung (7.4) angenähert werden:

- Integrationskonstante  $C_1$  = Maximalverformung unter der Last
- Argument  $\alpha$  der e-Funktion durch das Abklingverhalten
- Argument  $\beta$  der cos-Funktion durch den Nulldurchgang

Der Vergleich mit verschiedenen Näherungsfunktionen ist in Bild 58 dargestellt.

Es bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten, eine ausreichende und allgemein gültige Anpassung für Kreisprofile durch weitere FE-Berechnungen herzuleiten. Damit könnten dann FE-Berechnungen zumindest für Voruntersuchungen entfallen. Bei komplizierterer Geometrie ist jedoch eine FE-Auswertung der MAC-Ergebnisse unvermeidbar.

## 7.1.2 Längs gerissene Rohre (Altrohrzustand II und III)

### a) Vorbemerkungen

Das Verhalten längs gerissener Rohre unter einer gegenseitigen Doppelkraft  $F$  unterscheidet sich deutlich vom Verhalten nicht gerissener Rohre. Zur Erläuterung wird zunächst die Biegelinie der elastisch gebetteten Halbschale in Längsrichtung betrachtet.

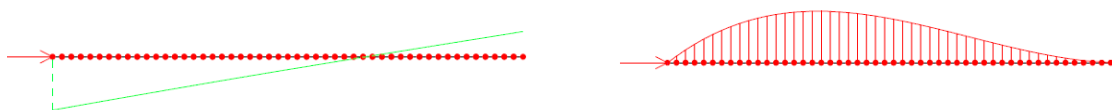
### b) Statisches Modell in Längsrichtung

Am System des elastisch gebetteten Balkens kann gezeigt werden, dass die Abklinglänge eine einzelne Rohrlänge (z. B. 2,5 m) weit überschreitet. Für das Flächenmoment einer Rohrhälfte gilt

$$I \cong 2 \cdot 0,05488 \cdot (r_a^4 - r_i^4),$$

für die Federsteifigkeit der Bettung  $k_{sr} = 0,6 \cdot E_2 / r_a$ .

Damit ist die Steifigkeit einer Rohrhälfte in Längsrichtung so groß, dass die Biegelinie nahezu geradlinig verläuft, vgl. Bild 59.



Biegelinie: max  $w = 0,08$  mm (LF 1: g)

M-Linie: min  $M = -3,63$  kNm (LF 1: g)

**Bild 59** Biegelinie und Biegemomentenlinie des elastisch gebetteten Balkens = Hälfte eines vierfach längs gerissenen Rohres DN 1500 mit 2,5 m Länge, Verformungsmodul des Bodens  $E_2 = 20$  N/mm<sup>2</sup>

Für übliche Bodenkennwerte  $E_2 \leq 20$  N/mm<sup>2</sup> ergibt sich ein nahezu geradliniger Verlauf der Biegelinie – dies gilt sogar noch bei Annahme eines Mikromoduls von 200 N/mm<sup>2</sup>. Damit folgt, dass sich gerissene Rohre unter den Einzellasten einer MAC-

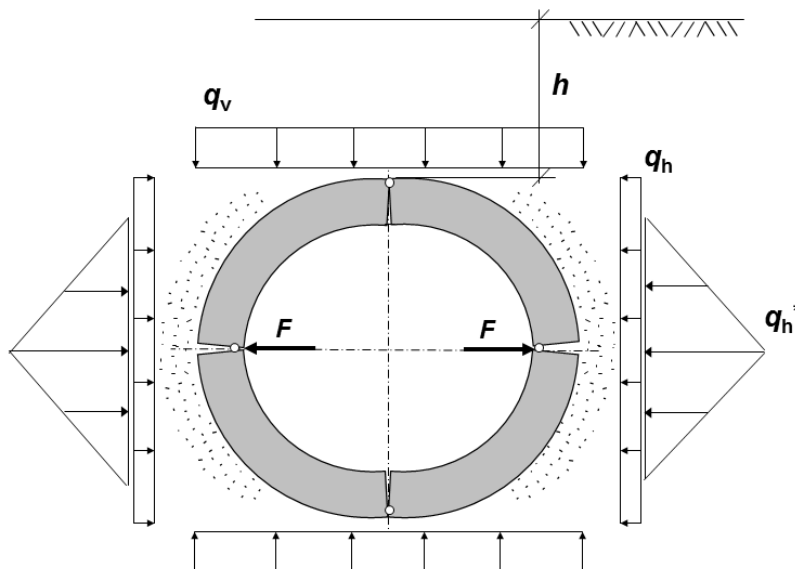
Prüfung nahezu starr verhalten. Die Messergebnisse (Haupt- und Nebenmessung) geben damit ausschließlich Auskunft über die Bodeneigenschaften.

Wird die Verformung  $\max w = 0,08 \text{ mm}$  in Bild 59 mit den Werten der Tabelle 18 verglichen, so wird deutlich, dass die Verformungen nunmehr deutlich größer sind als bei nicht gerissenen Rohren (Faktor 10 und größer). Damit kann der Verformungsmodul  $E_2$  direkt aus den gemessenen Verformungen hergeleitet werden.

Zur Herleitung von  $E_2$  kann im Folgenden das Modell in Umfangsrichtung nach DWA-A 143-2 herangezogen werden.

### c) Statisches Modell in Umfangsrichtung

Es gilt das System mit den Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$  nach DWA-A 143-2, Bild 5 und Anhang F. In diesem Lastzustand wird die gegenseitige Einzellast  $F$  ergänzt, vgl. Bild 60.



**Bild 60** Längs gerissenes Altrrohr im Boden, Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$ , Prüflast  $F$  (Hinweis: Die Koordinatenbezeichnungen weichen von Bild 52 und Bild 53 ab).

Der Last  $F$  wirken die stützenden Bodenspannungen  $q_h$  und  $q_h^*$  entgegen.

Es gelten die folgenden Annahmen:

1. Die Rohrscherben werden als starr angenommen, (vgl. Abschnitt 7.1.2b).
2. Die Prüflast  $F$  befindet sich in der Mitte der Rohrlänge.
3. Die Prüflast  $F$  ist kleiner als die Resultierende der stützenden Bodenspannung  $q_h$  und  $q_h^*$ , d.h., auch bei geringem Bettungsreaktionsdruck  $q_h^*$  bleiben die Rohrscherben in Scheitel und Sohle in Kontakt.
4. Die Rohrverbindungen ermöglichen eine freie Verformung des belasteten Rohres (gültig bei ausreichendem Spiel bzw. geringer Rückstellkraft der Dichtungselemente).

Die horizontale Gleichgewichtsbedingung zwischen der auf *eine* Rohrlänge  $L_R$  bezogenen Prüfkraft  $F$  und der Resultierenden  $R_h^*$  des Bettungsdreiecks ergibt:

$$F/L_R = R_h^* \quad (7.7)$$

Mit der Ordinate  $q_h^*$  folgt der Flächeninhalt des Bettungsdreiecks  $R_h^*$

$$R_h^* = q_h^* \cdot y_S / 2$$

und Auflösen nach  $q_h^*$ :

$$q_h^* = 2R_h^* / y_S = 2F/L_R / y_S \quad (7.8)$$

Bei der Berechnung von biegeweichen erdbetteten Rohren wird in der Regel ein lineares Federgesetz (Bettungsgesetz nach Winkler)

$$q_h^* = k_{sr} \cdot w_x \quad (7.9a)$$

mit der Federkonstanten

$$k_{sr} = S_{Bh} / r_a \quad (7.9b)$$

angesetzt, vgl. auch ATV-DVWK-A 127, Abschnitt 9.5.4.1.

Hierin ist  $S_{Bh}$  die horizontale Bettungssteifigkeit, für die nach DWA-A 143-2

$$S_{Bh} = 0,8 \cdot E_2$$

gilt. Damit folgt

$$q_h^* = 0,8 \cdot E_2 \cdot w_x / r_a$$

und nach Ersetzen von  $q_h^*$  durch Gleichung (7.7)

$$2F/L_R / y_S = 0,8 \cdot E_2 \cdot w_x / r_a \quad (7.10)$$

Auflösen dieser Beziehung nach  $E_2$  ergibt:

$$E_2 = 2F/L_R / 0,8 / w_x \cdot r_a / y_S$$

Mit der Annahme, dass der Schnittpunkt P in Bild 57 bei ca.  $45^\circ$  liegt und damit  $r_a/y_S \cong 0,707$  gilt, folgt schließlich:

$$E_2 = 3,54 \cdot F/L_R / w_x \quad (7.11)$$

Die Gleichung (7.11) zeigt, dass der Verformungsmodul des Bodens in der Leitungszone des längs gerissenen Rohres unmittelbar aus der aufgebracht Kraft  $F$  und der an der Kraffteinleitung gemessenen Verformung des Systems  $w_x$  ermittelt werden kann.

Ist bei *unnachgiebigen Rohrverbindungen* die Annahme 4 nicht erfüllt, so kann näherungsweise angenommen werden, dass die benachbarten Rohre an der Stelle der Rohrverbindung die gleiche Verformung  $w_x$  aufweisen, die dann zu den gegenüber liegenden Rohrenden auf 0 abnimmt. Für diese Annahme berechnet sich  $E_2$  nach Gleichung (7.11), indem im Nenner  $2L_R$  (statt  $L_R$ ) gesetzt wird.

#### d) Beispiel

Unter einer Prüflast  $F = 10 \text{ kN}$  wird die Verformung  $w_x = 1 \text{ mm}$  gemessen. Die Rohrlänge beträgt  $L_R = 2,5 \text{ m}$ .

Mit der Gleichung (7.11) folgt  $E_2 = 3,54 \cdot 10.000 / 2.500 / 1 = 14,2 \text{ N/mm}^2$ .

### 7.2 Beispielberechnung mit der FEM

#### 7.2.1 Allgemeines

Im Rahmen eines Praxiseinsatzes wurde das MAC-System auch in einem Kanalprofil der Stadt Schwerte eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.5). Mit den dabei gemessenen Daten wurde am Institut für Geotechnik (IGTH) in Hannover ein FE-Modell des Kanals erstellt und in einer dreidimensionalen Computersimulation die Prüfung nachgefahren. Die FE-Berechnung (vgl. [27]) soll dabei als Plausibilitätskontrolle zum MAC-Test dienen und eine Aussage zum Zustand des Kanals ermöglichen. Im Folgenden wird exemplarisch die Vorgehensweise bei einer derartigen Berechnung dargestellt.

#### 7.2.2 FE-Berechnung und weitere Untersuchungen

Mit Hilfe des dreidimensionalen FE-Programms PLAXIS 3D wurde der Kanal in Schwerte nachgebildet. Aus Symmetriegründen konnte dabei ein halbes Kanalsegment verwendet werden (Bild 61). Sämtliche für das FE-Modell verwendeten Materialien werden als isotrop und linear-elastisch dargestellt. Da es während des MAC-Tests nur zu sehr kleinen Dehnungen im Bereich von 0,01% kommt, kann davon ausgegangen werden, dass sich auch der Boden entsprechend quasi linear-elastisch verhält.

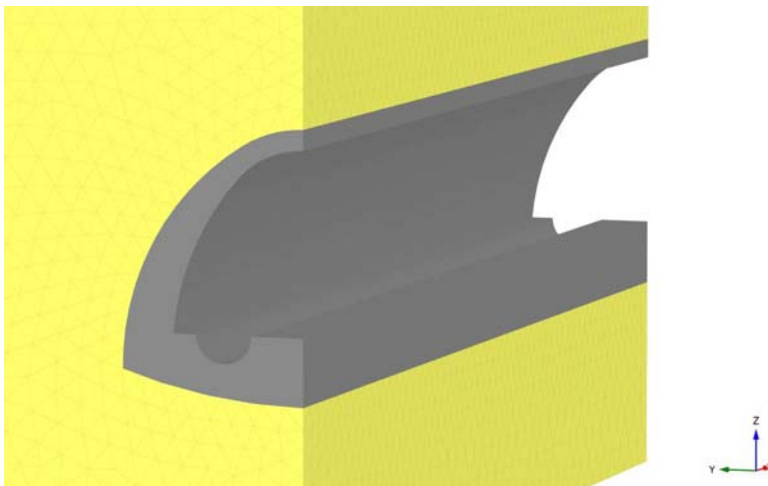
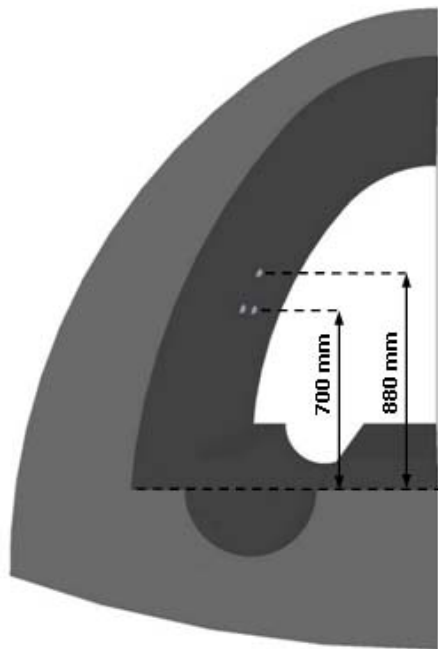


Bild 61 FE-Modell als halbes Kanalsegment

Die Abmessungen der Testkonfiguration sind Bild 62 zu entnehmen. Das erstellte Modell hat eine Länge von 10 m. Dieser Abstand ist ausreichend, um störende Randeinflüsse ausschließen zu können. Der Lasteinleitungspunkt befindet sich in der Modellmitte und die Wegmessmodule haben in Längsrichtung einen Abstand von 1,25 m.





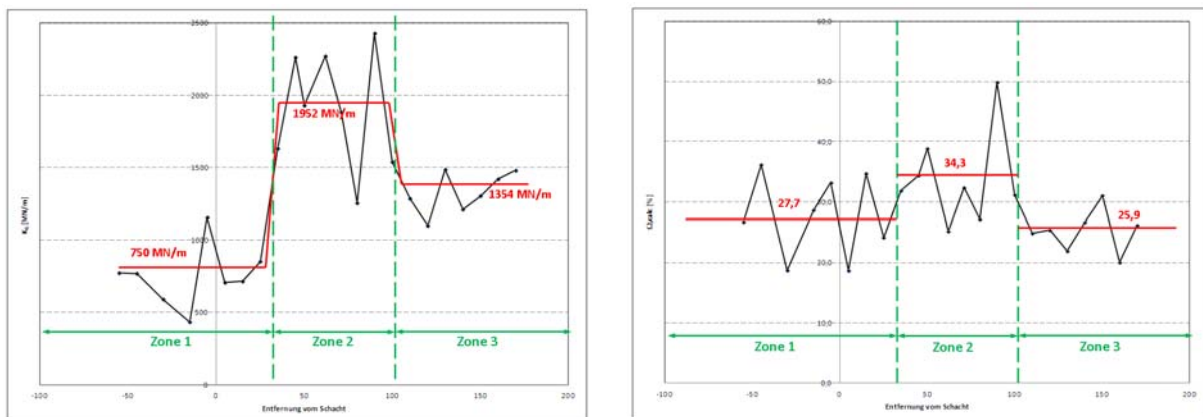
**Abmessungen:**

- Höhe des Zylinders: 700 mm
- Höhe des primären Wegaufnehmers: 880 mm
- Höhe der sekundären Wegaufnehmer: 700 mm
- Abstand der Wegaufnehmer in Längsrichtung: 1250 mm

*Bild 62 Generiertes Modell der Testkonfiguration*

Die Abmessungen der Testkonfiguration sind Bild 62 zu entnehmen. Das erstellte Modell hat eine Länge von 10 m. Dieser Abstand ist ausreichend, um störende Randeinflüsse ausschließen zu können. Der Lasteinleitungspunkt befindet sich in der Modellmitte.

Die Kanalstruktur wurde einmal als Betonschale (35.000 MPa) und als Mauerwerk (10.000 MPa) gerechnet. Der Steife-Modul des Bodens wurde dabei jeweils schrittweise von 50 auf 200 MPa angehoben. Aufgrund der extrem kleinen Dehnungen entspricht der für die Berechnungen verwendete Steife-Modul des Bodens dem Mikro-Steifemodul des Bodens. Dieser liegt im Bereich des dynamischen Steifemoduls und ist um den Faktor 5-10 größer als der „normale“ Steifemodul. Bild 63 zeigt die aus den Messwerten des MAC-Verfahrens abgeleitete Zonierung der Rohr-Boden-Steifigkeiten und Übertragungsfaktoren in Längsrichtung.



*Bild 63 Zonierung der Steifigkeiten (links) und der Übertragungsfaktoren (rechts) über die Untersuchungsstrecke anhand der MAC-Messwerte*

In Ergänzung wurden aus jeder Zone Bohrkerne entnommen, um einerseits die vorhandenen Wanddicken zu verifizieren und andererseits Druckfestigkeiten und E-Moduln des Rohrwerkstoffs als Eingangswerte für die FEM-Berechnung zu ermitteln.

### 7.2.3 Berechnungsergebnisse

#### 7.2.3.1 Steifigkeit und Übertragungsverhältnis

Die Ergebnisse des MAC-Tests und der begleitenden FE-Analyse haben gezeigt, dass sich der untersuchte Kanalabschnitt grundsätzlich in drei Bereiche mit unterschiedlicher Steifigkeit einteilen lässt, die nachfolgend bewertet werden:

Zone 2: Der Bereich mit der größten gemessenen durchschnittlichen MAC-Steifigkeit liegt in Zone 2 (von +35m bis +100m) mit 1.952 MN/m. Der E-Modul der entnommenen Kernprobe liegt bei 22.099 MN/m<sup>2</sup>. Dies ergibt eine reine Materialsteifigkeit von 1.454 MN/m. Die Überprüfung mit der FE-Analyse ergibt, dass das berechnete Übertragungsverhältnis in diesem Bereich mit 34,5% sehr gut mit den Messwerten übereinstimmt. Für Zone 2 Zone kann somit ein guter Zustand angenommen werden, der sich hinsichtlich Steifigkeit und Übertragungsverhältnis gemäß den Annahmen für einen unbeschädigten Kanal verhält und intakt zu sein scheint. Die Stelle des außergewöhnlich niedrigen Einzelwertes wurde nach einer Bohrkernentnahme als messtechnischer Ausreißer identifiziert.

Zone 3: Die durchschnittlichen MAC-Steifigkeit in Zone 3 (von +110m bis +170m) liegt mit 1.354 MN/m im mittleren Bereich der Messungen (ca. 70% von Zone 2). Das Ergebnis der Kernprobe ergibt einen E-Modul von 17.197 MN/m<sup>2</sup> für eine reine Materialsteifigkeit von 1.132 MN/m. Das Übertragungsverhältnis für diesen Bereich zeigt einen Wert von 25,9%. Die Vergleichsrechnung mit dem FE-Modell ergibt hierfür einen deutlich höheren Wert von 37%. Die Übertragung der Verformung scheint somit in Längsrichtung behindert zu sein. Der Kanal sollte daher in diesem Bereich noch einmal auf mögliche Beschädigungen überprüft werden.

Zone 1: Der Bereich mit der geringsten gemessenen durchschnittlichen MAC-Steifigkeit liegt in Zone 1 (von -55m bis +25m) mit 750 MN/m (ca. 38% von Zone 2). Auch der E-Modul der Kernprobe ist mit nur 8.579 mN/m<sup>2</sup> relativ gering. Dies entspricht einer Schalensteifigkeit von 565 MN/m. Analog zu Zone 3 liegt das gemessene Übertragungsverhältnis mit ca. 27% deutlich unter dem erwarteten Wert aus der FE-Analyse von ca. 34%, so dass die Annahme einer möglichen Beschädigung aufgrund der Verhinderung der Verformungsübertragung auch hier gilt. Einzelne Messwerte erreichen hierbei zumindest den Sollwert, während andere deutlich darunter liegen. Zone 1 sollte somit auch auf mögliche Beschädigungen überprüft werden, zumal hier die Ergebnisse der MAC-Steifigkeit noch geringer ausfallen als in Zone 3. Dies gilt in besonderem Maße für die beiden Messpunkte bei -5m und +30m mit Übertragungsverhältnissen unter 20%.

Bild 64 und Bild 65 zeigen die Gegenüberstellung der gemessenen Werte für Gesamtsteifigkeit und Übertragungsfaktor zu den auf Basis der FEM-Berechnung ermittelten Werte für Rohrsteifigkeit und Übertragungsfaktor.

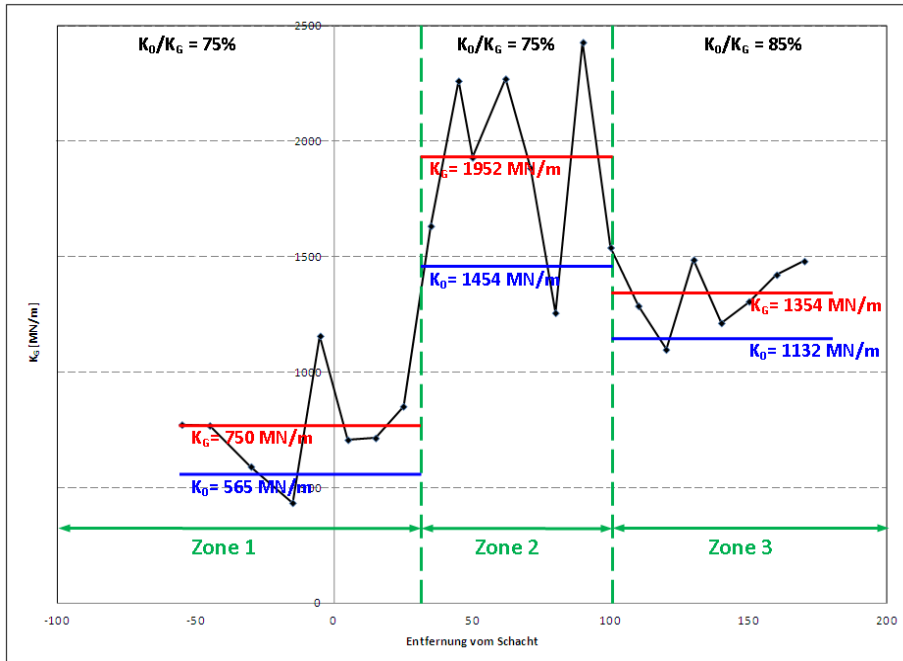


Bild 64 Steifigkeit  $K_G$  (Rohr und Boden, gemessen) und  $K_0$  (Rohr, berechnet) in den jeweiligen Zonen

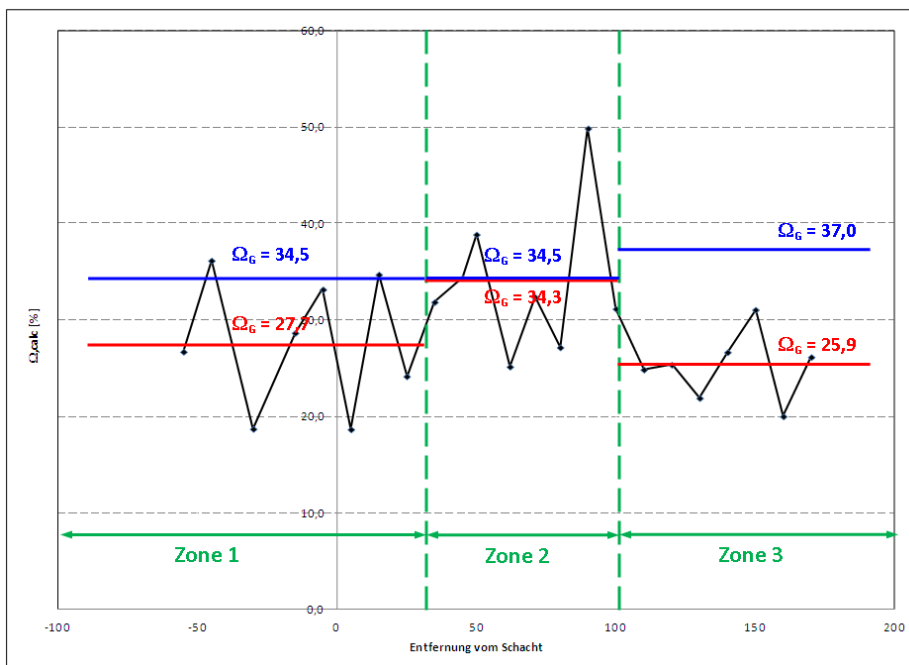


Bild 65  $\Omega_G$  gemessen (rot, unten) und berechnet (blau, oben) in den jeweiligen Zonen

Für die Zonen 1 und 3 stimmen die MAC-Ergebnisse nach Koppelung der jeweiligen Steifigkeitsverhältnisse bezüglich des erwarteten Übertragungsverhältnisses nicht mit

dem FE-Modell überein. Kleinere Werte für  $\Omega_G$  als erwartet können dabei folgende Ursachen haben:

- 1.) Der umgebende Boden ist deutlich dichter als gedacht, so dass die Querkraftübertragung reduziert ist. Dies würde sich jedoch auch in entsprechenden Steifigkeitserhöhungen bei  $K_0$  und  $K_G$  bemerkbar machen. Dies ist hier jedoch nicht der Fall, sodass diese Ursache hier ausgeschlossen werden kann.
- 2.) Die Qualität der Messergebnisse ist durch ungünstige Rahmenbedingungen während der Messung zweifelhaft, vgl. Ausreißer für  $K_0$  in Zone 2.
- 3.) Die Querkraftübertragung findet aufgrund von Beschädigungen in der Kanalwand nicht oder nur eingeschränkt statt. Die entsprechenden Abschnitte sind bei Bedarf erneut zu begehen und auf entsprechende sichtbare Schäden zu untersuchen. Dabei müssten sich die Beschädigungen theoretisch eher radial auswirken, da Längsrisse in der Schale ein eher deutlich größeres  $\Omega_G$  erzeugen, weil die Schale dann aufgrund der Belastung leichter in Längsrichtung verformbar ist.

Im vorliegenden Anwendungsfall sind also insbesondere die Plausibilität der Messwerte und die Struktur des Kanalquerschnitts näher zu betrachten.

### 7.2.3.2 Qualitätsindex

Nach der Auswertung lässt sich der Untersuchungsabschnitt prinzipiell in drei Zonen unterschiedlicher Steifigkeit einteilen. Setzt man die jeweils aus den Bohrkernen ermittelten E-Moduln in Bezug zum E-Modul bei guter Betonqualität von ca. 30.000 MPa, so ergibt sich eine maximal mögliche Schalensteifigkeit von  $K_0 = 1974 \text{ MN/m}$ . Aus den zuvor erfolgten Berechnungen ist ebenfalls das Verhältnis von  $K_0/K_G$  (ca. 75% bzw. 85%) bekannt, so dass auch das bereichsweise theoretische Maximum von  $K_G$  bei guter Betonqualität abgeschätzt werden kann. So lässt sich die gemessene MAC-Steifigkeit als prozentualer Anteil des Maximums für ein neuwertiges Kanalbauteil angeben (Bild 66).

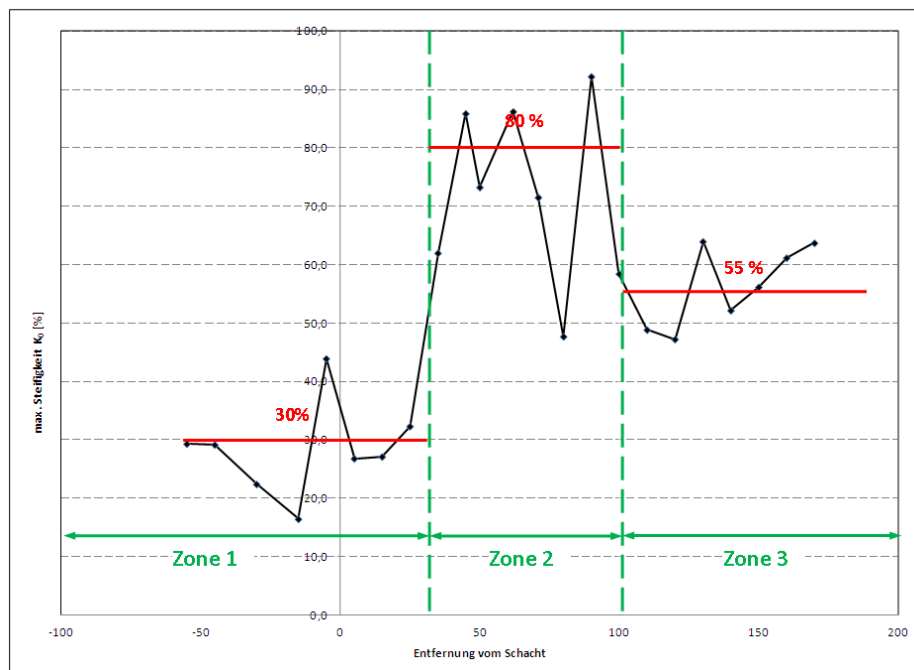


Bild 66 erreichte MAC-Steifigkeit im Vergleich zum theoretischen Maximum

Diese Auswertung gibt bereits erste Hinweise darauf, welche Bereiche des Untersuchungsabschnitts primär hinsichtlich eventuell erforderlicher Sanierungsmaßnahmen zu begutachten wären.

### 7.2.3.3 Boden

Unter Betrachtung der Steifigkeitsverhältnisse  $K_0/K_G$  und dem hierfür theoretisch benötigten Übertragungsverhältnis  $\Omega_G$ , lässt sich für alle drei Zonen der ideell vorhandene Mikro-Steifemodul des Bodens berechnen. Für die Zonen 1 und 3 beträgt dieser Wert rd.  $100 \text{ MN/m}^2$ , welches einem mitteldichten Boden entspräche. Der Mikro-Steifemodul in Zone 2 ist mit rd.  $250 \text{ MN/m}^2$  deutlich höher und lässt hier auf einen eher dichten Boden schließen.

Um genauere Aussagen über die Zusammensetzung des Bodens treffen zu können, ist es jedoch in jedem Fall erforderlich, Bodenproben in geeigneter Form zu entnehmen, um diese separat zu analysieren und die entsprechende Bodensteifigkeit im Versuch zu ermitteln bzw. zu bestätigen. Die hier ermittelten Werte ergeben sich aus den mit dem FE-Modell gekoppelten Ergebnissen und unterliegen somit idealisierten Annahmen, die sich von den tatsächlichen Verhältnissen deutlich unterscheiden können.

### 7.2.3.4 Einschränkungen des Verfahrens

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen beziehen sich auf die jeweiligen Mittelwerte der Steifigkeiten und Übertragungsverhältnisse in den drei Zonen. Abweichungen der Messergebnisse und Stichpunktproben hiervon sind normal und i.d.R. auch zu erwarten. Daher kann es zu entsprechenden Streuungen in den Ergebnissen kommen. Eine genauere Analyse erfordert eine separate Korrelation an jedem einzel-

nen Messpunkt. Dies wäre jedoch sehr aufwändig und nur in Fällen sinnvoll, bei denen die ersten Ergebnisse ohnehin auf eine starke strukturelle Schwächung hindeuten, so dass die erhöhten Kosten einer genaueren Analyse im Hinblick auf eine bevorstehende Sanierung gerechtfertigt wären.

Das Verfahren selbst dient hierbei nur als eine Überprüfung, ob die mit dem MAC-Verfahren gewonnenen Ergebnisse als plausibel angesehen werden können und mit den Ansätzen der FE-Berechnung korrelieren. Eine Aussage zur Bewertung der Standsicherheit ist dabei nicht Teil der FE-Berechnung und ist in einer gesonderten Standsicherheitsbewertung zu untersuchen. Die FE-Berechnung kann jedoch mit den Daten aus dem MAC-Verfahren ggfs. kritische Punkte entlang der Untersuchungsstrecke aufzeigen, für die eine Standsicherheitsuntersuchung sinnvoll sein könnte.

#### **7.2.4 Zusammenfassung**

In dieser Beispielrechnung wurden für die Messergebnisse eines MAC-Tests in einem Kanalabschnitt in Schwerte Vergleichsrechnungen nach der Finite-Element-Methode durchgeführt. Die gegenseitige Anpassung von Modell und Messung erfolgt anhand von Proben, die nach einer ersten Auswertung aus der Kanalstruktur entnommen wurden. Die Messergebnisse des MAC-Tests werden zunächst aufbereitet und analysiert. Mit Hilfe der FE-Methode wurden die erhaltenen Daten dann mit einem numerischen Modell verglichen und die Ergebnisse mit Hilfe der Daten aus den Proben angepasst. Die Ergebnisse zeigen, inwieweit die Ergebnisse übereinstimmen bzw. plausible Werte liefern und wie sich diese hinsichtlich der Integrität interpretieren lassen.

Die Auswertung bezieht sich auf die Steifigkeits- und Übertragungsverhältnisse zwischen Kanalwand und dem dahinter gelagerten Boden an den jeweiligen Untersuchungspunkten. Hieraus lassen sich neben der Überprüfung der Modellplausibilität auch Ansätze für die zu erwartende Lagerungsdichte des anstehenden Bodens an den jeweiligen Untersuchungsstellen ableiten, die bei Bedarf durch entsprechende Probenentnahme verifiziert werden können. Qualitative Aussagen zur Integrität der Kanalschale können über den Grad der Übereinstimmung von FE-Modell und MAC-Test getroffen werden.

### **7.3 MAC-Verfahren im Normen- und Regelwerk**

#### **7.3.1 Arbeitsblatt DWA-A 143-2**

Die neue Vorschrift DWA-A 143-2 [28] zur statischen Berechnung von Linern wurde der Fachöffentlichkeit im November 2012 als Gelbdruck mit der Aufforderung zur Stellungnahme vorgelegt [29].

Das Verfahren bei Arbeitsblättern der Deutschen Vereinigung für Wasser und Abfall e.V. (DWA) sieht – ähnlich der Vorgehensweise bei DIN-Vorschriften – ein öffentliches Beteiligungsverfahren vor, für das die Einspruchsfrist am 31. Januar 2013 endete.

Die Reaktion auf das neue Arbeitsblatt war vielfältig und betraf unter anderem auch den Abschnitt 6.4.3.2 „Berechnungsmodelle“, in den die MAC-Prüfung zunächst wie folgt Eingang gefunden hatte:

„ $E_2$  ist z. B. an einzelnen Orten durch Rammsondierungen oder kontinuierlich nach Thépot (2012) zu ermitteln. Zur Absicherung des Wertes für  $E_2$  können die abgeklungenen Verformungen des längs gerissenen Altrohrs verwendet werden, vergleiche Anhang F.“

Anmerkung:  $E_2$  ist der Verformungsmodul des Bodens in der Leitungszone der Altrohre.

Die zuständige Arbeitsgruppe ES 8.16 des DWA hat die Stellungnahmen im Laufe des Jahres 2013 intensiv diskutiert und diese Bearbeitung in der letzten Sitzung am 28. Oktober 2013 abgeschlossen.

Die aktuelle Formulierung des Abschnittes 6.4.3.2 lautet wie folgt:

„ $E_2$  ist mit geeigneten geotechnischen Untersuchungen zu ermitteln (z.B. Rammkernsondierung, Georadar, MAC-Verfahren<sup>3</sup>). Zur Absicherung des Wertes für  $E_2$  können die abgeklungenen Verformungen des längs gerissenen Altrohrs verwendet werden, vergleiche Anhang F.“

Es bleibt abzuwarten, ob damit das Beteiligungsverfahren für dieses Kapitel des Arbeitsblattes DWA-A 143-2 abgeschlossen ist.

Für den Fall, dass der Passus im endgültigen Arbeitsblatt unverändert bleibt, kann die MAC-Prüfung neben den genannten Verfahren zur Sondierung des Alrohr-Bodensystems herangezogen werden.

In der Fußnote wird als Quelle die deutsche Übersetzung der Arbeit von Dr. Thépot aus dem Jahr 2012 zitiert. Über die Quellenangabe hinaus wird zudem auf den besonderen Vorteil einer *kontinuierlichen Messung* aus dem Rohrrinneren hingewiesen. Viele von Eau de Paris durchgeführte Messungen zeigen, dass die Qualität der Altleitung innerhalb einer Haltungslänge stark schwanken kann und damit eine Identifikation der kritischen Bereiche von hoher Bedeutung für die Sanierungsplanung und Standsicherheit ist.

Mit dem zweiten Satz des oben wiedergegebenen Auszugs aus dem Arbeitsblatt DWA-A 143-2 wird auf einen weiteren Vorteil hingewiesen, der sich aus der *Kenntnis des Verformungsmoduls*  $E_2$  bei längs gerissenen Altrohren ergibt: Mit Hilfe der Last-Verschiebungskurven im Anhang F ist ein rechnerischer Nachweis des Alrohr-Bodensystems für Alrohrzustand II oder III möglich.

### 7.3.2 Grenzlasten nicht gerissener Altrohre

*Altrohre ohne Längsrisse* sind nach Arbeitsblatt DWA-A 143-2 dem *Alrohrzustand I* zuzuordnen. Ist eine rechnerische Überprüfung der Standsicherheit der Altrohre nach

---

<sup>3</sup>) Von THÉPOT (2012) wird eine kontinuierliche Messung des Bettungsreaktionsdruckes aus dem Rohrrinneren beschrieben.

Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 erforderlich, so sind Informationen zur Steifigkeit des Bodens ( $E_2$ ) und der Festigkeit der Sammlerwand ( $\sigma_{bZ}$ ) erforderlich.

Eine mögliche Ursache für das Versagen von Rohre durch statische Überlastung ist die Konzentration von Bodenlasten auf dem Rohrscheitel (Konzentrationsfaktor  $\lambda_R$ ). Diese ist wiederum von der Steifigkeit des Bodens in der Leitungszone abhängig (vgl. die relative Ausladung  $a$  und die wirksame Ausladung  $a' = a \cdot E_1/E_2$ ). Durch die MAC-Prüfung wird der aktuelle Bodenzustand als Steifigkeit  $K_S$  ermittelt.

Eine weitere mögliche Ursache für das Versagen ist eine verringerte Qualität der Rohre, sei es durch Vorschädigung oder durch betrieblich bedingte Materialschwächung oder Materialermüdung. Mit den Ergebnissen der MAC-Prüfung wird der aktuelle Zustand als Rohrsteifigkeit  $K_0$  ausgewertet. Diese korreliert mit der Festigkeit, die für den Spannungsnachweis nach Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 benötigt wird.

Während Rammkernsondierungen und Kernbohrungen nur an einzelnen und meist zufälligen Stellen Aufschlüsse liefern, können durch die MAC-Prüfung Informationen zu den beiden Steifigkeiten  $K_S$  und  $K_0$  kontinuierlich gewonnen werden. Mit diesen Werten ist dann ein wesentlich genauerer Nachweis der Standsicherheit nach ATV-DVWK-A 127 möglich.

### 7.3.3 Grenzlasten gerissener Altröhre

#### a) Gleichgewichtsbeziehungen

Der Anhang F des Arbeitsblattes DWA-A 143-2 enthält Diagramme, mit denen die Standsicherheit *längs gerissener Altröhre* im Boden überprüft wird. Dieser Fall ist dem *Altrohrzustand II oder III* zuzuordnen.

Den Diagrammen liegt das System nach Bild 67 zugrunde, vgl. DWA-A 143-2, Bild 5.

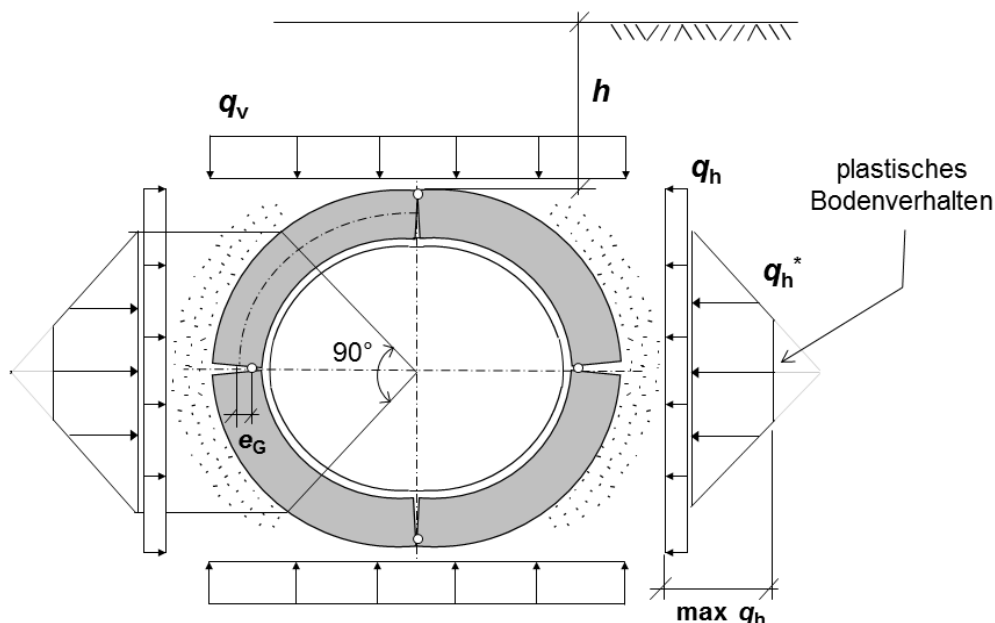


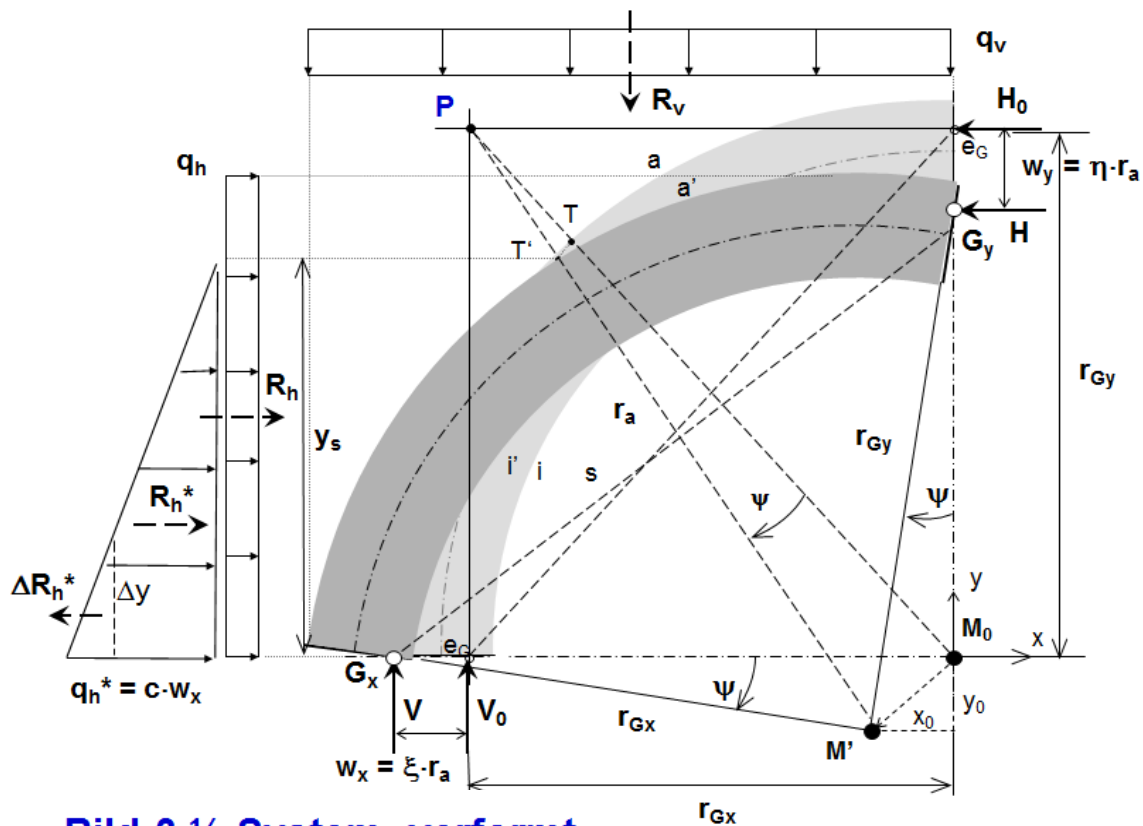
Bild 67 Längs gerissenes Altrohr im Boden mit Liner, Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$



Im Bild 67 ist die exzentrische Lage der Drehpunkte (Gelenke) der Rohrscherben in Scheitel, Kämpfern und Sohle zu erkennen. Die Exzentrizität zur Mittellinie des Altröhres wird mit  $e_G$  bezeichnet. Mit Hilfe von  $e_G$  kann der Zustand der Druckzonen in den Kämpfern beschrieben werden, vgl. DWA-A 143-2, Tabelle 12.

Bedingt durch die Kinematik der vier Rohrscherben ist der Bettungsreaktionsdruck  $q_h^*$  dreieckförmig verteilt, vgl. Bild 67. Ferner ist dargestellt, dass der Bettungsreaktionsdruck  $q_h^*$  bei Überschreiten des passiven Erddrucks durch  $\max q_h$  begrenzt wird, so dass eine trapezförmige Verteilung verbleibt.

Aufgrund der doppelten Symmetrie des Systems genügt es, einen Viertelkreis zu untersuchen, vgl. Bild 68.



**Bild 68** Viertelssystem im verformten Zustand, Bodenspannungen  $q_v$ ,  $q_h$  und  $q_h^*$ , Auflagerreaktionen in den Druckzonen V (Kämpfer) und H (Scheitel)

Die Gleichgewichtsbedingungen  $\Sigma V = 0$ ,  $\Sigma H = 0$  und  $\Sigma M = 0$  ergeben folgenden Beziehungen für die Vertikalverschiebung  $\eta = w_y / r_a$  und die auf  $E_2$  bezogene Bodenspannung  $q_{v,d}$ :

$$\frac{q_{v,d}}{E_2} = \frac{0,8 \cdot \xi \cdot \eta S \cdot \left( \rho_{Gy} - \frac{\eta S}{3} - \eta \right)}{(1 + \xi) \cdot (2\rho_{Gx} - 1 + \xi) - K_2 \cdot (1 - \eta) \cdot (2\rho_{Gy} - 1 - \eta)} \quad \text{(Gleichung 7.12)}$$

Hierin sind die Größen  $\rho_{Gx}$  und  $\rho_{Gy}$  die auf  $r_a$  bezogenen Abstände der Gelenke in der Altrohrwand, wobei gilt

$$r_{Gx} = r_i - e_{Gx}$$

und

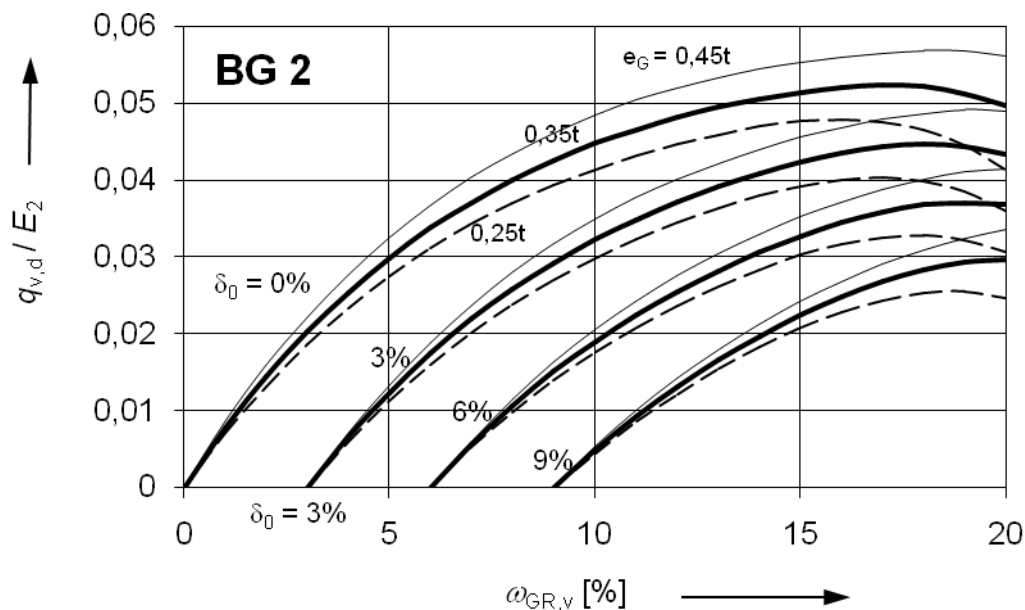
$$r_{Gy} = r_i + e_{Gy}$$

Bei in der Praxis üblicher Weise gleich groß angenommener Exzentrizität  $e_G$  entfällt in den beiden Gleichungen der Index  $x$  bzw.  $y$ .

Auf der rechten Seite der Gleichung (7.12) befinden sich ausschließlich Größen, die entweder bekannt oder von der Scheitelverformung  $\eta = w_y / r_a$  des Systems abhängig sind. Alle Größen sind einheitenfrei, wodurch eine Übertragbarkeit auf alle Nennweiten möglich ist.

Auf der linken Seite die Gleichung wird die Bodenspannung mit der Einheit N/mm<sup>2</sup> durch den Verformungsmodul  $E_2$  mit derselben Einheit dividiert. Die Bodenspannung ist als „design“-Wert aufzufassen.

**b) Last-Verschiebungskurven, Standsicherheitsnachweis**



*Bild 69 Last-Verschiebungskurven des Viergelenkringes für vertikale Bodenspannungen  $q_{v,d}$ , Bodengruppe G2,  $K_2 = 0,3$ , Anfangsverformung  $\delta_0$*

Bild 69 zeigt die Auswertung der Gleichung (7.12) für die Bodengruppe G2 (schwach bindiger Boden), Diagramme für weitere Bodengruppen sind dem Arbeitsblatt DWA-A 143-2 zu entnehmen.

Die Gesamtverformung  $\omega_{GR,v}$  ist die Summe aus Anfangsverformung  $\delta_0$  (z. B. bedingt durch Auflockerungen) und der elastischen Verformung des Systems. Ist  $\delta_0$  unbekannt so darf nach DWA-A 143-2  $\delta_0 = 3\%$  angenommen werden.

Die Kurven weisen Maxima auf, mit deren Hilfe folgende Aussagen möglich sind:

1. Das Maximum liefert den Wert  $\max(q_{v,d}/E_2)$  bzw. bei bekanntem Verformungsmodul des Bodens  $E_2$  die kritische Bodenspannung  $\max q_{v,d}$  direkt.

- Die zu  $\max q_{v,d}$  gehörende Gesamtverformung  $\omega_{GR,v}$  ist die Grenze für rechnerisches Versagen des Systems. Da diese Verformungen bei der Zustandserfassung in der Regel gemessen werden, kann damit der Abstand zu einer kritischen Situation (drohender Einsturz) erkannt werden.
- Der Einfluss der Anfangsverformung  $\delta_0$  und der Gelenkexzentrizität  $e_G$  ist aus Bild 70 ablesbar: Größere Anfangsverformungen und kleinere Gelenkexzentrizitäten verringern die kritische Bodenspannung  $\max q_{v,d}$ .

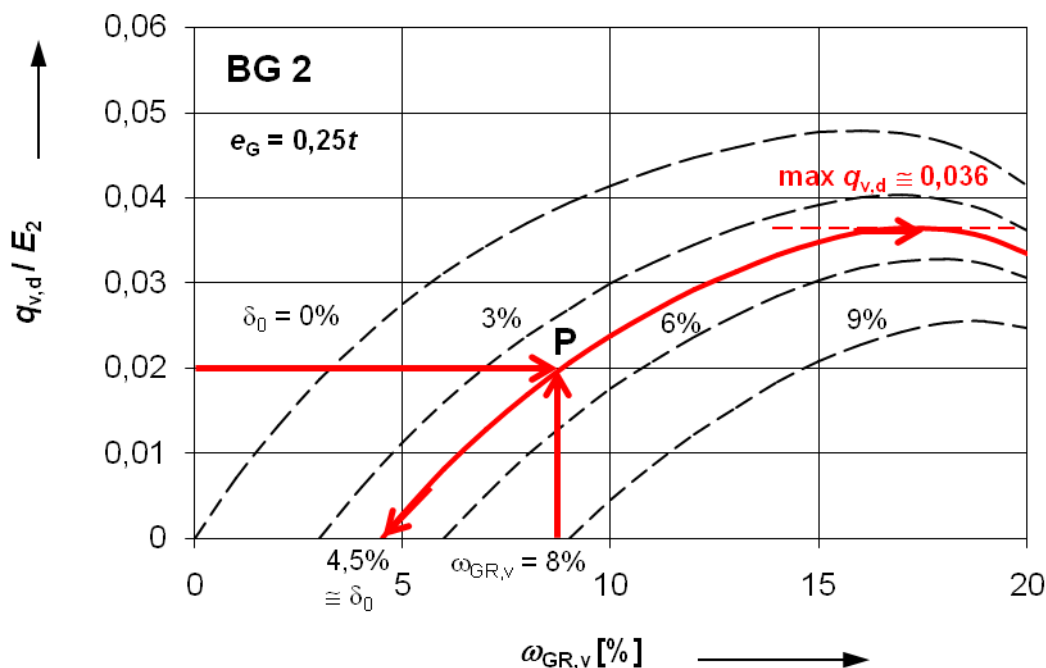


Bild 70 Last-Verschiebungskurven des Viergelenkringes für vertikale Bodenspannungen  $q_{v,d}$ , Bodengruppe G2,  $e_G/t = 0,25$ ,  $K_2 = 0,3$

Ist der Verformungsmodul  $E_2$  des Bodens bekannt, so können durch die Gleichung (7.12) eindeutige Last-Verschiebungsbeziehungen des gerissenen Systems beschrieben werden.

Werden im Bild 69 beispielhaft nur die Kurven für  $e_G = 0,25t$  betrachtet, so verbleiben die gestrichelten Linien im Bild 70. Mit bekannten Werte für  $E_2$  und  $q_{v,d}$  und der gemessenen Gesamtverformung wird der Schnittpunkt P im Diagramm ermittelt. Die Eintragung einer zu den benachbarten Kurven parallelen Kurve durch P führt zu folgenden Ergebnissen:

- Auf der horizontalen Achse wird die Anfangsverformung  $\delta_0$  ermittelt.
- Als Maximum wird der Wert  $\max q_{v,d}/E_2$  abgelesen.
- Ist  $E_2$  bekannt, so folgt die kritische Scheitelbelastung  $\max q_{v,d} = (\max q_{v,d}/E_2) \cdot E_2$ .

Aus der Gleichung

$$\max q_{v,d} = 0,75 \cdot \gamma_B \cdot \max h_d$$

folgt die kritische Überdeckung

$$\max h_d = 1,33 \cdot \max q_{v,d} / \gamma_B \quad (\text{Bodenwichte } \gamma_B = 20 \text{ kN/m}^3)$$

bzw. mit dem Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_F$  die zulässige Überdeckung

$$\text{zul } h = \max h_d / \gamma_F$$

Bei oberflächennahen Rohrleitungen ist  $\max q_{v,d}$  mit der Bodenspannung  $p_T$  aus der Verkehrslast zu vergleichen.

### c) Beispiel für den Nachweis des Systems mit gerissenen Altrohren

Gegeben ist die Scheitelbelastung  $q_v = 100 \text{ kN/m}^2$  und der Verformungsmodul des Bodens  $E_2 = 5 \text{ N/mm}^2$ .

Die gemessene Gesamtverformung beträgt  $\omega_{GR,v} \cong 8\%$ . Mit  $q_v = 0,10 \text{ N/mm}^2$  folgt  $q_v / E_2 = 0,10 / 5 = 0,02$ .

Mit den Werten für  $\omega_{GR,v}$  und  $q_v / E_2$  folgt nach Bild 70 die Anfangsverformung  $\delta_0 \cong 4,5\%$  und das Maximum  $\max q_{v,d} / E_2 \cong 0,036$ .

Die Maximallast beträgt  $\max q_{v,d} = 0,036 \cdot 5 = 0,180 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ kN/m}^2$ .

Die kritische Überdeckung folgt mit

$$\max h_d = 1,33 \cdot \max q_{v,d} / \gamma_B = 1,33 \cdot 180 / 20 = 12,0 \text{ m}$$

und bei einem Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_F = 1,35$  die zulässige Überdeckung:

$$\text{zul } h = \max h_d / \gamma_F = 12,0 / 1,35 = 8,9 \text{ m.}$$

## 8 Standsicherheitsanalyse

### 8.1 Konzept

Die Instandhaltung von Großprofilen ist in der Regel arbeitsaufwändig, kostenintensiv und mit hohen Erfolgsrisiken verbunden. Die Ergebnisse aus der vorhergehenden 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, da nur die unmittelbare Kanalinnenoberfläche in Augenschein genommen wird. 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 dann stichprobenartig Wanddicken und Materialeigenschaften ermittelt werden.

Die Erkundung des umgebenden 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 eingesetzt. Daher kann eine solche Vorgehensweise zu erheblichen Fehleinschätzungen hinsichtlich des baulichen Zustands und des aktuellen Sanierungsbedarfs führen. Eine zuverlässige Beurteilung der Standsicherheit basierend auf den beschriebenen unzureichenden Informationen ist daher kaum möglich.

Das MAC-Prüfgerät bietet nun die Möglichkeit, weit mehr Informationen über das Rohr-Boden-System bei gleichbleibendem oder geringerem Aufwand für Kernbohrungen und Bodenproben zu gewinnen. In einer Haltung können zahlreiche Einzelprüfungen in konstanten Abständen durchgeführt werden, womit Änderungen in der Steifigkeit des Rohr-Boden-Systems über die gesamte Haltungslänge sichtbar gemacht werden. Durch die Messungen besteht damit die Möglichkeit, eine Haltung in Zonen gleicher Rohr-Boden-Steifigkeit einzuordnen. Sofern erforderlich können anschließend zielgerichtet nähere Untersuchungen zu den Materialeigenschaften und den Wanddicken des Sammlers durchgeführt werden.

Anhand der MAC-Prüfung können in Verbindung mit Ergebnissen von gezielten Bohrkern- und Bodenuntersuchungen statische Berechnungen durchgeführt werden, mit denen bei biegesteifen Rohren auf die Lastverteilung zwischen Boden und Rohr geschlossen werden kann (Konzentrationsfaktor der Bodenspannungen in Rohrscheitelenebene). Bei längs gerissenen und damit biegeweichen Rohren liefert die MAC-Prüfung den Verformungsmodul des Bodens und damit die horizontale Bettungssteifigkeit.

Damit können Sanierungsmaßnahmen zielgerichtet auf die Schwachstellen in einer Haltung ausgerichtet werden, z. B. durch eine Spritzbetonauskleidung zur statischen Ertüchtigung des Sammlers oder durch Bodeninjektionen zur Verbesserung der seitlichen Bettung. Die dann nicht allein auf einer optischen Inspektion von Innen beruhenden Beurteilungen erhalten so eine deutlich höhere Aussagekraft und die auf dieser Basis durchgeführten Standsicherheitsberechnungen eine erheblich bessere Datengrundlage.

Schließlich kann eine zweite MAC-Prüfung auch zur Qualitätssicherung ausgeführter Sanierungsarbeiten herangezogen werden. Durch Vorher-Nachher-Vergleiche der Systemsteifigkeit an den Stellen der ersten Prüfung ist eine direkte Kontrolle der Wirksamkeit einer Sanierung möglich.

Die Vorgehensweise bei der Standsicherheitsanalyse mit dem MAC-Verfahren kann in folgende Schritte unterteilt werden:

### 1. **Vorinspektion**

Im Rahmen einer Begehung werden der Zustand des Kanals erfasst und Auffälligkeiten dokumentiert. Auf dieser Basis wird zunächst das Messintervall für die MAC-Prüfung festgelegt. Die Informationen aus der Vorinspektion sind zudem für die Anpassung der Gerätetechnik erforderlich. Des Weiteren können auch Sofortmaßnahmen eingeleitet werden, wenn schon die optische Inspektion auf eklatante Schäden hinweist.

### 2. **Beurteilung der Gleichförmigkeit des Rohr-Boden-Systems in Längsrichtung (MAC-Prüfung)**

Es wird eine MAC Prüfung in den aus (1) ermittelten Messintervallen durchgeführt. Auf Basis der Steifigkeitsergebnisse wird der Kanal in Bereiche ähnlicher Rohr-Boden-Steifigkeiten eingeteilt. Abhängig von der Güte der vorliegenden Planunterlagen folgt eine erste Einschätzung von Standsicherheitsrisiken.

### 3. **Qualifizierung von Standsicherheitsrisiken durch Berechnung des Rohr-Boden-Systems (ABC-Zonierung)**

Zone A: Mit den vorliegenden Planunterlagen und ggf. Berechnungen nach der Finite-Element-Methode (FEM) lässt der Nachweis nach Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 [7] eine ausreichende rechnerische Standsicherheit des Sammlers erwarten. In diesem Fall besteht zu diesem Zeitpunkt kein Anlass für weitere Untersuchungen, wie beispielsweise Bohrkernentnahmen.

Zone B: Der Nachweis der Standsicherheit nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 [7] auf Basis der Ergebnisse der FEM und der vorliegenden Planunterlagen ergibt keine ausreichende Sicherheit nach Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 [7]. Ein Standsicherheitsproblem kann nicht ausgeschlossen werden. In diesem Fall liefern Bohrkernentnahmen weitere Erkenntnisse insbesondere zu den Materialeigenschaften. In der Folge können Risikobetrachtungen und weitere Maßnahmen, wie z. B. regelmäßige Inspektionen, Verformungsmessungen und/oder MAC-Prüfungen, sinnvoll sein.

Zone C: Der Nachweis der Standsicherheit nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 [7] auf Basis der Ergebnisse der FEM und der vorliegenden Planunterla-

gen gelingt nicht. Ein Standsicherheitsproblem ist dann sehr wahrscheinlich. Weitere Erkenntnisse zu den Eigenschaften von Rohr- und Bodenmaterial durch Bohrkernentnahmen und Rammkernsondierungen sind erforderlich. Zudem sollten weitere Analysen hinsichtlich der Sanierungsfähigkeit und der Bestimmung von Sanierungszonen in Anlehnung an DWA-A 143-2 [28] erfolgen.

#### **4. Sanierungsanalyse und Einteilung in Sanierungszonen S123**

Sofern Abschnitte des Kanals der Standsicherheitszone C zugeordnet wurden oder künftig werden (ggf. bei Veränderungen in Zone B), ist folgende Einteilung in Sanierungszonen in Anlehnung an das Merkblatt ATV-M 127-2 bzw. das Arbeitsblatt DWA-A 143-2 [28] vorzunehmen:

Zone S1: Altrohrzustand II – „Längsrisse, daher biegeweich“

In dieser Zone ist das Altrohr-Boden-System noch tragfähig, und der Nachweis eines Sanierungssystems ist bei Ansatz von Bettungsreaktionskräften möglich. Eine Auskleidung oder Beschichtung sollte zur Dauerhaftigkeit bezüglich Wasserdichtheit oder Bodeneinbruch ausgewählt werden.

Zone S2: Altrohrzustand III – „Längsrisse, daher biegeweich plus Auskleidung“

In dieser Zone ist das Altrohr-Boden-System allein nicht mehr tragfähig, und das Sanierungssystem muss einen Beitrag zur Standsicherheit liefern. Daher sollte eine Auskleidung mit dem Ziel der statischen Ertüchtigung ausgewählt werden.

Zone S3: Bodenverbesserung/Bodennachweis notwendig

In dieser Zone sind die Alrohre nicht mehr tragfähig und können auch keinen ausreichenden Beitrag mehr zur Standsicherheit liefern. Es wird wie eine Art „Kiesbettung“ für das Sanierungssystem betrachtet. In diesem Fall muss das Sanierungssystem sämtliche Lasten übernehmen. Durch Bodenverbesserung mittels Injektionen kann zudem eine mittragende Wirkung erzielt werden. Ein rechnerischer Nachweis ist nach Arbeitsblatt DWA-A 143-2 [28] (Altrohrzustand IIIa) möglich. Sind die vorstehend genannten Maßnahmen nicht ausreichend, so ist der Kanal in offener oder geschlossener Bauweise zu erneuern.

#### **5. Verfahrensauswahl für die Sanierung**

Auf Basis der Sanierungsanalyse und der Einteilung in Sanierungszonen können dann in Frage kommende Sanierungssysteme ausgewählt, ausgeschrieben und ausgeführt werden. Begleitend können verschiedene Sanierungsvarianten berechnet werden.

#### **6. Sicherung der Qualität von Sanierungsmaßnahmen**

Im Anschluss an eine Sanierung kann die Qualität der Ausführung mithilfe einer zweiten MAC-Prüfung erfasst und ggf. ein weiterer Standsicherheitsnachweis geführt werden. Hierdurch bietet sich erstmalig die Möglichkeit, statische Sanierungen nicht nur anhand von Materialprüfungen in begrenzter Zahl sondern ganzheitlich am Rohr-Boden-System zu kontrollieren.

Die im Rahmen der Standsicherheitsnachweise ermittelten Anforderungen an das Sanierungsverfahren sind für die anschließende Verfahrensauswahl von maßgebender Bedeutung. Hier ist zu entscheiden, inwieweit durch die Sanierungsmaßnahme ein Beitrag geleistet werden soll, um die Tragwirkung, die Schutzwirkung sowie die Dichtwirkung über die angestrebte Nutzungsdauer zu gewährleisten.

Zur Wiederherstellung der Tragwirkung muss das Material geeignet sein, einen fortgeschrittenen Substanzverlust auszugleichen. Ein ausreichender Verbund bzw. eine hohe Haftzugfestigkeiten zum Untergrund sind z. B. bei Mörtel erforderlich, um neu aufgebrachtes und vorhandenes Material als gemeinsames Tragsystem ansehen zu können. Eine Schutzwirkung des Materials kann als Korrosionsschutz gegenüber dem im Kanalsystem transportierten Medium gefordert sein, die Materialbeständigkeit ist hierdurch bedingt. Hinsichtlich der Dichtwirkung ist der Widerstand der Gesamtkonstruktion gegen Innendruck bzw. äußeren Grundwasserdruck zu unterscheiden. Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit stellt sich insbesondere die Frage nach der Beständigkeit der vorgenannten Trag-/Schutz- und Dichtwirkung unter mechanischen und biologisch-chemischen Angriffen. Damit wird deutlich, dass das Sanierungsziel und das konkrete Anforderungsprofil für jede Sanierungsmaßnahme gesondert festzulegen sind, und diese die Verfahrensauswahl maßgeblich beeinflussen können.

Durch die große Bandbreite der Bedingungen für die Sanierung von Großprofilen bei gleichzeitig vielfältigen Sanierungsverfahren und -materialien ist eine pauschale Empfehlung von Verfahren oder Materialien für die denkbaren Anwendungsfälle nicht möglich. Hier sind die planenden Ingenieurbüros gefordert, die anhand der notwendigen Voruntersuchungen geeignete Sanierungsmaßnahmen auswählen müssen.

## 8.2 Nachweise

Die Verfahrensschritte für den Nachweis der Standsicherheit sind Bild 71 und Bild 72 zu entnehmen. Dabei muss zwischen Rohren ohne Längsrisse (Altrohrzustand I) und mit Längsrissen (Altrohrzustand II oder III) unterschieden werden. Wie bereits im Abschnitt 7 festgestellt, bewirkt die gleiche Last bei MAC-Prüfungen deutlich unterschiedliche Verformungen: Während bei Altrohrzustand I die Steifigkeit der Sammlerwand ( $K_0$ ) maßgebend ist, ist diese bei den Altrohrzuständen II und III *im Vergleich zum Boden* in der Regel so groß, dass im Wesentlichen die Bodensteifigkeit ( $K_S$ ) gemessen wird.

Dieses abweichende Verhalten führt zu unterschiedlichen Nachweisarten: Bei ungerissenen Rohren ergibt die MAC-Prüfung mit der anschließenden FE-Auswertung die beiden Wert  $K_0$  und  $K_S$  (letzteren als Mikromodul des Bodens) während bei längs gerissenen Altrohren aufgrund der deutlich größeren Verformungen eine Bodensteifigkeit in der Nähe des Verformungsmoduls ( $E_2$ ) resultiert.

Die darauf folgende statische Berechnung ungerissener Rohre (Bild 71) basiert auf dem bewährten Verfahren nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127. Hierbei ist der Verformungsmodul  $E_2$  in der Leitungszone von großer Bedeutung, da er die Konzentration der Bodenlasten  $q_v$  auf dem Rohrscheitel maßgebend beeinflusst (vgl. die Schritte wirksame relative Ausladung  $a' = a \cdot E_1/E_2$  und Konzentrationsfaktor  $\lambda_R$ ). Er ist



aus dem Mikromodul (vgl. FE-Auswertung) abzuschätzen und ggf. durch gezielte Rammkernsondierungen abzusichern. Bisherige und weitere zukünftige Projekte werden die Erfahrungen bezüglich des Zusammenhanges zwischen Mikromodul und Verformungsmodul des Bodens weiter vertiefen.

Bei einem Spannungsnachweis nach ATV-DVWK-A 127 wird zudem die Biegezugfestigkeit des Werkstoffes der Sammlerwand benötigt. Dieser Wert kann aus der Beziehung zwischen E-Modul des Sammlers und Festigkeit abgeschätzt und durch zusätzliche gezielte Kernbohrungen abgesichert werden.

Bei gerissenen Altrohren wird der Bettungsreaktionsdruck in der Leitungszone, der für die Standsicherheit gerissener Systeme entscheidend ist, direkt gemessen. Da sich die Altrohr-Viertelstücke im Vergleich zum Boden nahezu biegestarr verhalten, wird durch die MAC-Prüfung in der Regel der Mittelwert über die Länge eines Einzelrohres als konstante Steifigkeit gemessen. Sind jedoch örtlich begrenzte Hohlräume im Boden vorhanden, so werden sich diese durch Schiefstellungen der Rohrscherben bemerkbar machen, was ebenfalls durch die Nebenmessung bei der MAC-Prüfung erkannt werden kann.

Mit Hilfe der vergleichsweise einfachen Auswertung von  $E_2$  aus der gemessenen Verformung (vgl. Abschnitt 7.3) ist dann die weitere Nachweisführung der Standsicherheit nach Anhang A6 des Merkblattes ATV-M 127-2 (zukünftig Arbeitsblatt DWA-A 143-2, Anhang F) möglich, vgl. Abschnitt 7.3.3b und das Beispiel 7.3.3c.

Ergibt die Berechnung z.B. die Notwendigkeit, das System mit einem Liner zu ertüchtigen, so wird das Gesamtsystem Liner-Altrohr-Boden nach ATV-M 127-2 für Altrohrzustand III nachgewiesen. Bei diesem Nachweis ist der mit der MAC-Prüfung ermittelte Verformungsmodul  $E_2$  eine erforderliche Eingangsgröße.

Als letzter Arbeitsschritt kann der Erfolg der Ertüchtigung des Systems durch eine erneute MAC-Prüfung kontrolliert werden (vgl. Bild 71 und Bild 72).

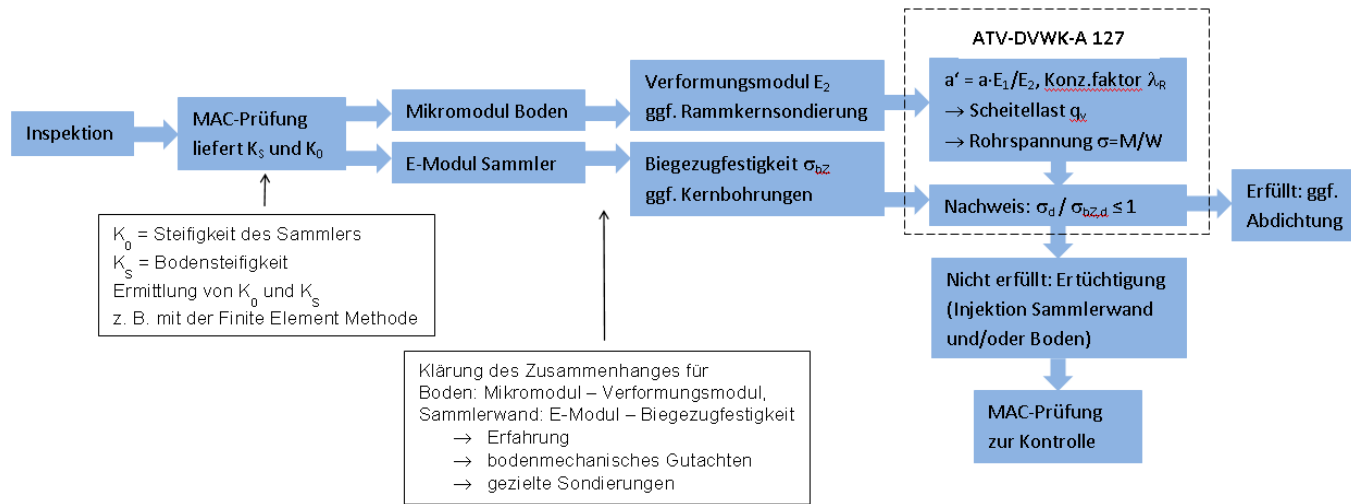


Bild 71 Vorgehensweise Altrohrzustand I

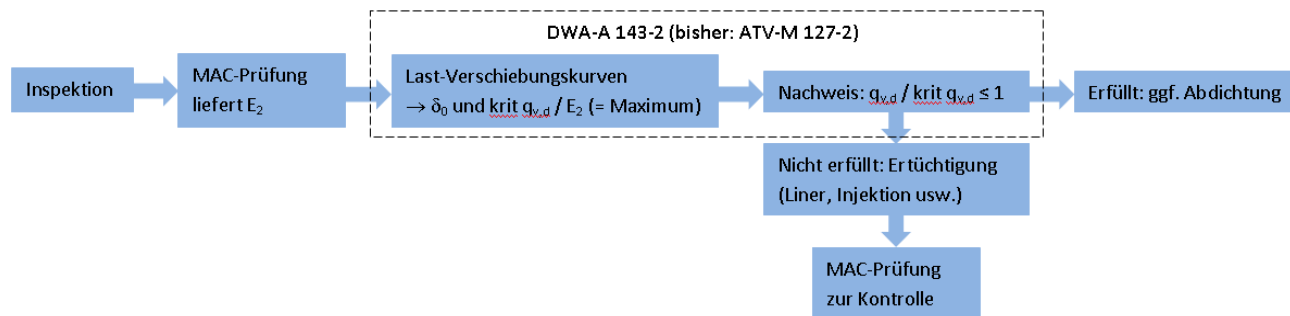


Bild 72 Vorgehensweise Altrohrzustand II und III

## 9 Zusammenfassung und Fazit

Von schadhafte Abwasserkanälen geht ein hohes Gefährdungspotential für die Umwelt aus. Durch undichte Abwasserkanäle können im Abwasser enthaltene Schadstoffe in die Umwelt gelangen und die Schutzgüter Boden und Grundwasser verunreinigen (Exfiltration). Auch die Infiltration von Grundwasser birgt Risiken. Einerseits wird der Fremdwasseranteil im Kanal erhöht und dadurch das Abwassersystem hydraulisch überlastet, andererseits wird ggf. Bodenmaterial in den Kanal mit eingespült, so dass sich Hohlräume in der Leitungszone bilden können. Die Standsicherheit des Kanals ist dadurch möglicherweise nicht mehr gewährleistet, so dass im Extremfall mit einem Einsturz des Bauwerks und somit noch gravierendere Konsequenzen für die Umwelt zu rechnen ist. Den Großprofilen kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, da diese in der Regel große Abwassermengen führen. Zudem befinden sich Großprofile häufig am Ende von Entwässerungsnetzen und somit meist auch in entsprechender Tiefenlage unterhalb des Grundwasserspiegels.

Im Rahmen eines IKT-Verbundprojektes unter Beteiligung mehrerer größerer Kanalnetzbetreiber zum Thema „Reparatur von Großprofilen“ wurde deutlich, dass besonders die Zustandserfassung und -beurteilung des Abwasserkanals vor der Sanierung für die Projektbeteiligten von großem Interesse ist. Vor allem die Standsicherheitsbeurteilung des Sanierungsobjektes steht häufig zur Diskussion und erscheint in der Umsetzung problematisch. Bisherige Erfahrungen der beteiligten Netzbetreiber mit Ingenieurbüros oder Statikern lassen vermuten, dass statische Nachweise oder Beurteilungen besonders im Fall älterer Abwasserkanäle aufgrund fehlender Angaben häufig nicht erbracht werden können. Ein Grund sind fehlende Eingangsinformationen z.B. über die Bodenbeschaffenheit in der Leitungszone oder den Wandaufbau des schadhafte Abwasserkanals besonders bei älterem Mauerwerk. Infolgedessen kann auch die Auswahl eines geeigneten Sanierungsverfahrens mit Unsicherheiten verbunden sein. Mit Blick auf die hohe Umweltrelevanz und vor dem Hintergrund des derzeitigen und zukünftigen Sanierungsbedarfs gewinnen die Schadenserkennung und die Auswahl geeigneter Sanierungsverfahren für Großprofile aber immer mehr an Bedeutung. Nach einer DWA-Umfrage [1] aus dem Jahr 2009 sind ca. 17 % des deutschen Kanalisationsnetzes kurz- bzw. mittelfristig sanierungsbedürftig.

Für die optische Inspektion von Großprofilen kann auf die ZTV – Inspektion großer Kanäle [12] Bezug genommen werden, welche von einer Arbeitsgruppe deutscher Netzbetreiber mit Unterstützung durch das IKT erarbeitet wurde. In dieser ZTV werden Anforderungen an Unternehmen, Vorbereitungsmaßnahmen, Inspektionsdurchführung und –auswertung gestellt. Diese ZTV kann als Vertragsbestandteil bei der Vergabe von Inspektionen genutzt werden. Es finden sich des Weiteren Anforderungen an die Personalqualifikation, die Ausstattung, die Arbeitssicherheit, Reinigungsmaßnahmen und die Durchführung und Auswertung sowie Datenverarbeitung im Rahmen der Inspektion selbst. Die Zustandserfassung kann nach dem Kodiersystem der DIN EN 13508-2 [30] in Verbindung mit dem DWA M 149-2 [31] erfolgen. Erforderlichenfalls

kann im Sinne einer höheren Verständlichkeit auch der Auftraggeber Kurzbezeichnungen zur Zustandsbeschreibung vorgeben.

Die optische Inspektion oder Inaugenscheinnahme liefert hier allerdings nur unzureichende Informationen über den Zustand der inspizierten Haltung, da nur die unmittelbare Kanalinnenoberfläche in Augenschein genommen wird. 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 dann stichprobenartig Wanddicken und Materialeigenschaften ermittelt werden.

Die Erkundung des umgebenden 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 eingesetzt. Daher kann eine solche Vorgehensweise zu erheblichen Fehleinschätzungen hinsichtlich des baulichen Zustands und des aktuellen Sanierungsbedarfs führen. Eine zuverlässige Beurteilung der Standsicherheit basierend auf den beschriebenen unzureichenden Informationen ist daher kaum möglich.

Das MAC-Prüfgerät bietet nun die Möglichkeit, weit mehr Informationen über das Rohr-Boden-System bei gleichbleibendem oder geringerem Aufwand für Kernbohrungen und Bodenproben zu gewinnen. In einer Haltung können zahlreiche Einzelprüfungen in konstanten Abständen durchgeführt werden, womit Änderungen in der Steifigkeit des Rohr-Boden-Systems über die gesamte Haltungslänge sichtbar gemacht werden. Durch die Messungen besteht damit die Möglichkeit, eine Haltung in Zonen gleicher Rohr-Boden-Steifigkeit einzuordnen. Sofern erforderlich können anschließend zielgerichtet nähere Untersuchungen zu den Materialeigenschaften und den Wanddicken des Sammlers durchgeführt werden.

Anhand der MAC-Prüfung können in Verbindung mit Ergebnissen von gezielten Bohrkern- und Bodenuntersuchungen statische Berechnungen durchgeführt werden, mit denen bei biegesteifen Rohren auf die Lastverteilung zwischen Boden und Rohr geschlossen werden kann (Konzentrationsfaktor der Bodenspannungen in Rohrscheitelsebene). Bei längs gerissenen und damit biegeweichen Rohren liefert die MAC-Prüfung den Verformungsmodul des Bodens und damit die horizontale Bettungssteifigkeit.

Damit können Sanierungsmaßnahmen zielgerichtet auf die Schwachstellen in einer Haltung ausgerichtet werden, z. B. durch eine Spritzbetonauskleidung zur statischen Ertüchtigung des Sammlers oder durch Bodeninjektionen zur Verbesserung der seitlichen Bettung. Die dann nicht allein auf einer optischen Inspektion von Innen beruhenden Beurteilungen erhalten so eine deutlich höhere Aussagekraft und die auf dieser

Basis durchgeführten Standsicherheitsberechnungen eine erheblich bessere Datengrundlage.

Schließlich kann eine zweite MAC-Prüfung auch zur Qualitätssicherung ausgeführter Sanierungsarbeiten herangezogen werden. Durch Vorher-Nachher-Vergleiche der Systemsteifigkeit an den Stellen der ersten Prüfung ist eine direkte Kontrolle der Wirksamkeit einer Sanierung möglich.

Die Vorgehensweise bei der Standsicherheitsanalyse mit dem MAC-Verfahren kann in folgende Schritte unterteilt werden:

1. Vorinspektion
2. Beurteilung der Gleichförmigkeit des Rohr-Boden-Systems in Längsrichtung (MAC-Prüfung)
3. Qualifizierung von Standsicherheitsrisiken durch Berechnung des Rohr-Boden-Systems (ABC-Zonierung)
4. Sanierungsanalyse und Einteilung in Sanierungszonen S123
5. Verfahrensauswahl für die Sanierung
6. Sicherung der Qualität von Sanierungsmaßnahmen

Die im Rahmen der Standsicherheitsnachweise ermittelten Anforderungen an das Sanierungsverfahren sind für die anschließende Verfahrensauswahl von maßgebender Bedeutung. Hier ist zu entscheiden, inwieweit durch die Sanierungsmaßnahme ein Beitrag geleistet werden soll, um die Tragwirkung, die Schutzwirkung sowie die Dichtwirkung über die angestrebte Nutzungsdauer zu gewährleisten.

Zur Wiederherstellung der Tragwirkung muss das Material geeignet sein, einen fortgeschrittenen Substanzverlust auszugleichen. Ein ausreichender Verbund bzw. eine hohe Haftzugfestigkeiten zum Untergrund sind z. B. bei Mörtel erforderlich, um neu aufgebrachtes und vorhandenes Material als gemeinsames Tragsystem ansehen zu können. Eine Schutzwirkung des Materials kann als Korrosionsschutz gegenüber dem im Kanalsystem transportierten Medium gefordert sein, die Materialbeständigkeit ist hierdurch bedingt. Hinsichtlich der Dichtwirkung ist der Widerstand der Gesamtkonstruktion gegen Innendruck bzw. äußeren Grundwasserdruck zu unterscheiden. Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit stellt sich insbesondere die Frage nach der Beständigkeit der vorgenannten Trag-/Schutz- und Dichtwirkung unter mechanischen und biologisch-chemischen Angriffen. Damit wird deutlich, dass das Sanierungsziel und das konkrete Anforderungsprofil für jede Sanierungsmaßnahme gesondert festzulegen sind, und diese die Verfahrensauswahl maßgeblich beeinflussen können.

Durch die große Bandbreite der Bedingungen für die Sanierung von Großprofilen bei gleichzeitig vielfältigen Sanierungsverfahren und -materialien ist eine pauschale Empfehlung von Verfahren oder Materialien für die denkbaren Anwendungsfälle nicht möglich. Hier sind die planenden Ingenieurbüros gefordert, die anhand der notwendigen Voruntersuchungen geeignete Sanierungsmaßnahmen auswählen müssen.

## 10 Literatur

- [1] Berger, C.: Falk, C.: Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2009.
- [2] Thépot, O.: The Mac testing device for the mechanical assessment of man entry sewers, Paper 2C-2; International No-Dig 2001, Berlin, 2011.
- [3] Frank, R. and Thépot, O.: Mesure du module en petites déformations d'un sol autour d'une conduite enterrée, Revue Canadienne de Géotechnique, Volume 37, N°4, pp. 909-917, 2000.
- [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] Thépot, Olivier : Experimentelle Beurteilung der Standsicherheit von begehbaren Sammlern mit dem MAC-Prüfsystem. 3R, Ausgabe 3-4, 2012.
- [6] Biarez and Hicher: Elementary mechanics of soil behaviour, saturated and remoulded soils. A. Balkema, 1994.
- [7] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen, 3. Auflage, Hennef, 08/2000.
- [8] ATV-M 127-2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren, 2. Auflage, Hennef, 01/2000.
- [9] Falter, B.: Designing liners for fully deteriorated sewers. Proceedings No-Dig Conference 2009, Toronto, Ontario, 19/03 – 03/04/2009.
- [10] ASTM-Standard F 1216-09: Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube.
- [11] Schmale, K.: Vorbereitung und Umsetzung von Standsicherheitsuntersuchungen von Großprofil-Leitungen mit dem MAC-Verfahren. Masterarbeit, 06/2013.
- [12] ZTV – Zusätzliche Technische Vertragsbedingung "Inspektion großer Kanäle", 2011. Download unter [www.ikt.de/down/11\\_04\\_ztv-inspektion-grossprofile.pdf](http://www.ikt.de/down/11_04_ztv-inspektion-grossprofile.pdf).
- [13] 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.
- [14] DWA Merkblatt M 149-5 (2010): Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 5: Optische Inspektion, 12/2010.
- [15] DWA-Arbeitsbericht: Erstellung von Explosionsschutzdokumenten für abwassertechnische Anlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 09/2005.

- [16] BGR 104: Explosionsschutz-Regeln. Arbeitskreis Explosionsschutz der DGUV, 02/2013.
- [17] DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz. Beuth Verlag, 10/2010.
- [18] VDI Richtlinie 2263: Staubbrände und Staubexplosionen. Verein Deutscher Ingenieure, 05/1992.
- [19] DIN 19569-10: Kläranlagen – Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen. Beuth Verlag, 06/2006.
- [20] TRBA 220: Sicherheit und Gesundheit bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen in abwassertechnischen Anlagen. Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe –ABAS-, 12/2010.
- [21] BGR 126: Arbeiten in umschlossenen Räumen von abwassertechnischen Anlagen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Carl Heymanns Verlag, 09/2008.
- [22] Laurentzen, Erik: Standsicherheitsbewertung bei Sanierung von Großprofilen am Beispiel des Projektes MOERRIOL. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium, 2013.
- [23] Literatur zum Kanaleinsatz des SAAF – Shape Accel Array Field in London: <http://www.geo-observations.com/News/index.html>.
- [24] Pflüger, A.: Elementare Schalenstatik. 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 1967.
- [25] Schneider, H.-J.: Bautabellen für Ingenieure. 20. Aufl. Werner-Verlag, Düsseldorf, 2012.
- [26] Girkmann, K.: Flächentragwerke. 6. Aufl. Springer-Verlag, Wien, New York, 1974.
- [27] Achmus, M.; Klameth, M.: Numerische Simulation eines MAC-Tests anhand der Messergebnisse in Schwerte. Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover (IGtH), 11/2013.
- [28] DWA-A 143-2 (Gelbdruck): Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren. Hennef, 11/2012.
- [29] Falter, B.; Wagner, V.: Linderdimensionierung nach DWA-A 143-2 – Gelbdruck der 2. Auflage des Merkblattes ATV-M 127-2. 3R H. 3, S. 26-35. 2013.
- [30] DIN EN 13508-2: Zustandserfassung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. Teil 2: Kodiersysteme für die optische Inspektion. Beuth Verlag, 09/2003.
- [31] DWA - M 149-2: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, 11/2006.