

## Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung .....	1
1	Motivation und Ziel .....	2
2	Vorversuche .....	5
2.1	Materialien.....	5
2.2	Mischtechnik .....	7
2.3	Einbau des Sanierungsmaterials.....	10
2.4	Expansion .....	12
2.4.1	Vorversuche .....	12
2.4.2	Versuche mit Mikrowellen-Trocknungsgerät .....	16
2.4.3	Entwicklung eines Spezial – Mikrowellengenerators.....	21
3	In situ nahe Versuche.....	23
3.1	Sanierung nicht begehbarer Kanäle / Robotersanierung.....	23
3.2	Sanierung von Schächten .....	29
3.3	Sanierung begehbarer Kanäle .....	31
3.4	Sanierung von Hausanschlüssen.....	34
3.5	Dichtungen in Bauwerken der Abwassertechnik .....	39
4	Bewertung des Sanierungserfolges.....	43
4.1	Prüf- und Bewertungskriterien.....	43
4.2	Ergebnisse der Robotersanierung.....	45
4.3	Ergebnisse der Sanierung von Schächten .....	51
4.4	Ergebnisse der Sanierung von begehbaren Kanalrohren.....	53
4.5	Ergebnisse der Sanierung von Hausanschlüssen .....	57
4.6	Ergebnisse zu Dichtungen in Bauwerken der Abwassertechnik.....	59
5	Materialkennwerte .....	61
5.1	Druckfestigkeit.....	61
5.2	Haftzugfestigkeit.....	64
5.3	E-Modul.....	67
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	69
7	Literatur .....	71

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Altersverteilung der Kanäle im Jahr 2004 .....	2
Abbildung 2: Entwicklung der Altersverteilung der Kanäle .....	2
Abbildung 3: Materialverteilung der Kanäle .....	4
Abbildung 4: Materialverteilung der Kanäle .....	4
Abbildung 5: PUR-Komponente (grün) und Härter-Komponente (weiß), links Kleinmenge, rechts Gebinde .....	5
Abbildung 6: Mit Elektromotor angetriebene Mischhaken, links für eine Kleinmenge, rechts für ein 2500 g Gebinde .....	7
Abbildung 7: Mischer des Sanierungsfahrzeuges.....	8
Abbildung 8: Auspressvorrichtung und Abfüllplatte (rechts) .....	8
Abbildung 9: Probeversuch mit der modifizierten Zwei-Komponenten-Auspressmaschine .	9
Abbildung 10: Rohrhalbschalen in den Halterung, links Steinzeug DN 100, rechts Beton DN 200 mit Sanierungsmaterial.....	10
Abbildung 11: Einbringen des Sanierungsmaterials, links mit einer Düse, Mitte und rechts mit dem Verpressschuh .....	11
Abbildung 12: Proben mit Sanierungs- Material im Klimaschrank .....	12
Abbildung 13: Probegefäß mit expandiertem Sanierungsmaterial.....	12
Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Erwärmung des Sanierungsmaterials mit IR- Strahlung bei gleichzeitiger Bestimmung von Temperatur und Expansion .	13
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen der Temperatur im Sanierungsmaterial und seiner Expansion .....	14
Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Ermittlung der optimalen Kombination der Einsatzparameter.....	16
Abbildung 17: Temperaturverteilung bei Erwärmung mit dem Mikrowellengenerator .....	17
Abbildung 18: Geglättete Temperaturverteilung bei Erwärmung mit dem Mikrowellengenerator .....	18
Abbildung 19: Räumliches Anordnungsschema der Temperatursensoren .....	18
Abbildung 20: Längs- und Querschnitt durch den von oben mit MW erwärmten Probekörper.....	19
Abbildung 21: Test der Mikrowelle für den nicht begehbaren Kanal.....	21
Abbildung 22: Mikrowellenroboter .....	22

Abbildung 23: Sanierungsfahrzeug und Sika-Kanalsanierungsroboter.....	23
Abbildung 24: Einbau der Rohre in Stahlkästen mit Sandbettung .....	24
Abbildung 25: Lagerung auf einem Stahlträger, links Betonrohre, rechts Steinzeug- Rohrstrang.....	24
Abbildung 26: Roboter beim Einbringen des Sanierungsmaterials.....	25
Abbildung 27: Roboter beim Abfräsen von überschüssigem Sanierungsmaterial .....	25
Abbildung 28: Längsriss .....	25
Abbildung 29: Querriss .....	25
Abbildung 30: Sanierung unter "drückendem" Wasser .....	26
Abbildung 31: Sanierung bei durchfließendem Wasser .....	26
Abbildung 32: KA-TE Sanierungsroboter.....	26
Abbildung 33: Mikrowellenroboter .....	27
Abbildung 34: Druckluftpistole SVV 70 mit Verpressschuh .....	29
Abbildung 35: Gemischtes Sanierungsmaterial mit Abfüllplatte und Druckluftpistole SVV 70 .....	29
Abbildung 36: In situ nahe Sanierung von Schachtringen .....	30
Abbildung 37: Einbringen des Sanierungsmaterials in begehbarem Kanal DN 1500 .....	31
Abbildung 38: Einbringen des Sanierungsmaterials mit der Stahlschalung .....	32
Abbildung 39: Modifizierter Mikrowellengenerator in drehbarer Führung .....	32
Abbildung 40: Versuchskästen zur Sanierung von Hausanschlüssen .....	34
Abbildung 41: Absperrblase im Anschlusskanal.....	35
Abbildung 42: Sika-Roboter mit Adapter zum setzen der Absperrblase .....	35
Abbildung 43: Sika-Roboter beim Fräsen.....	36
Abbildung 44: Abfräsen der einragenden Anschlussleitung .....	36
Abbildung 45: KA-TE-Roboter mit Modul zum setzen der Schalung .....	36
Abbildung 46: Positionierung der Schalung samt Absperrblase .....	37
Abbildung 47: Verpressen des Sanierungsmaterials .....	37
Abbildung 48: Ausbau der Schalung .....	38
Abbildung 49: Sanierung nach Entfernen der Schalung .....	38
Abbildung 50: Gebinde gießfähiger Dichtstoff .....	39
Abbildung 51: Betonrohre mit Längsfugen .....	40

Abbildung 52: Einbringen des gießfähigen Dichtstoffs .....	41
Abbildung 53: Schalung für den gießfähigen Dichtstoff .....	41
Abbildung 54: Durchgeflossener Dichtstoff.....	41
Abbildung 55: Erwärmung des Dichtstoffs mittels Mikrowelle.....	42
Abbildung 56: Dichtheitsprüfung mit Härke - Prüfgerät.....	44
Abbildung 57: Ergebnis der Dichtheitsprüfung an Betonrohren mit Expansion des Sanierungsmaterials .....	46
Abbildung 58: Muffenspalt mit Fehlstelle im Sohlbereich .....	47
Abbildung 59: Undichte Muffe bei Betonrohren .....	47
Abbildung 60: Übersicht über die Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen an mit dem Kanalroboter sanierten Steinzeugrohren DN 300 .....	48
Abbildung 61: Ergebnis der Dichtheitsprüfung an Steinzeugrohren mit Expansion des Sanierungsmaterials .....	49
Abbildung 62: Unzureichend mit Sanierungsmaterial ausgefüllter Muffenspalt (Sohle).....	50
Abbildung 63: Vollständig ausgefüllter Muffenspalt .....	50
Abbildung 65: Sanierte Rohrverbindung, vor (links) und nach (rechts) der Nachbehandlung durch Abschleifen .....	53
Abbildung 66: Muffenprüfgerät DN 1500 .....	54
Abbildung 67: Ergebnis der Dichtheitsprüfungen DN 1500 (ohne Expansion) .....	55
Abbildung 68: Ergebnis der Dichtheitsprüfungen DN 1500 (mit Expansion).....	55
Abbildung 69: Undichter Hausanschluss .....	57
Abbildung 70: Unvollständig gefüllter Fugenspalt.....	58
Abbildung 71: Dichtheitsprüfung an Längsfuge .....	59
Abbildung 72: Kernbohrung durch eine Fuge mit expandiertem Dichtstoff.....	60
Abbildung 73: Spannungs-Dehnungsdiagramm (einstufige Belastung).....	61
Abbildung 74: Spannungs-Dehnungsdiagramm (3-stufig, nicht expandiert).....	62
Abbildung 75: Spannungs-Dehnungsdiagramm (3-stufig, expandiert) .....	63
Abbildung 76: Zwick-Prüfmaschine mit Haftzug-Probekörper.....	64
Abbildung 77: Übersicht über die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen .....	65
Abbildung 78: Diagramm Kraft/Stauchung 7h.....	67
Abbildung 79: Diagramm Kraft/Stauchung 24h.....	67
Abbildung 80: E-Moduli der Probekörper.....	68

## 0 Einleitung

Im Januar 2002 hatte das Institut für Baumaschinen und Baubetrieb (ibb) der RWTH Aachen als Antragsteller zusammen mit den Partnern mbc maagh bau-chemie, der AIK Flammadur Brandschutz GmbH und der Kuchem GmbH einen Forschungsantrag zur „Entwicklung und Erprobung isotrop expandierbarer Dichtstoffe in der Abwassertechnik“ beim Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes NRW eingereicht. Von der Expertenkommission Kanalisationstechnik NRW wurde der Forschungsantrag in zwei Teile geteilt, von denen der zweite Teil zunächst zurückgestellt und der erste Teil dem Ministerium zur Förderung empfohlen wurde.

Der Empfehlung folgend hat das MUNLV im Januar 2003 den ersten Teil des Forschungsvorhabens beauftragt, der die Entwicklung eines expandierenden Dichtstoffs für die Sanierung nicht begehrbarer Kanäle sowie begehrbarer Kanäle und Schächte zum Ziel hatte. Nachdem die Ergebnisse des ersten Teils im September 2004 in einem Abschlussbericht dargestellt wurden sowie ein auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse modifizierter Forschungsantrag für den zweiten Teil des Forschungsprojekts vorgelegt und von der Expertenkommission Kanalisationstechnik NRW am 1. März 2004 einstimmig zur Förderung empfohlen wurde, konnte nach Auftragserteilung durch das MUNLV im Mai 2005 der zweite Teil des Forschungsvorhabens umgesetzt werden.

Ziel des zweiten Teils des Forschungsprojekts war es, die Verfahrenstechnik zur Abdichtung schadhafter Rohrverbindungen mit dem entwickelten, expandierbaren Dichtstoff weiter zu verbessern und zu erproben. Weiterhin sollte auf Basis der im ersten Teil gewonnenen Erkenntnisse die Anwendungsmöglichkeit isotrop expandierbarer Dichtstoffe für zwei weitere Einsatzbereiche untersucht werden. So sollte der Dichtstoff zum einen dahingehend modifiziert werden, dass damit schadhafte Hausanschluss-Stutzen, die neben undichten Rohrverbindungen das häufigste Schadensbild in Kanalisationen darstellen, saniert werden können. Zum anderen sollte erreicht werden, dass mit dem modifizierten Sanierungsmaterial Dichtungen in Bauwerken der Abwassertechnik erneuert werden können. Neben den verschiedenen Modifikationen des Dichtstoffs sollte jeweils die erforderliche Verfahrenstechnik zur Verarbeitung des Dichtstoffs entwickelt und erprobt werden.

Die Ergebnisse der beiden Teile des Forschungsvorhabens werden in dem vorliegenden Bericht dargestellt.

## 1 Motivation und Ziel

Die wasserdichte Fugenausbildung ist bei allen Arten von Bauwerken eine herausragende Aufgabenstellung, insbesondere für Bauwerke zur Abwasserableitung und –behandlung. Dies gilt nicht nur für neu hergestellte Bauwerke, sondern auch für alle Anlagen im Betrieb, so dass sie regelmäßig inspiziert und gewartet werden müssen. Nach einer Umfrage zum Zustand der deutschen Kanalisation der DWA von 2004 liegt der Inspektionsgrad der öffentlichen Kanäle bei circa 80 %. Weitere Ergebnisse dieser Umfrage sind, dass 19,6 % der Kanalisation kurz- bis mittelfristig saniert werden müssen (ZK 0-2) und weitere 21,5 % langfristig sanierungsbedürftig (ZK 3) sind.<sup>1</sup> Im Vergleich zu der ATV – DVWK Umfrage von 2001 ist dies eine Steigerung von 2,6 % (ZK 0-2) bzw. sogar von 7,5 % (ZK 3).<sup>2</sup>

Der in der Umfrage ermittelte Sanierungsbedarf beruht auf optischen Inspektionen. Weitergehende Untersuchungen an Kanalisationen ergaben jedoch, dass auch von den nach optischer Prüfung als schadensfrei beurteilten Rohrverbindungen ein hoher Anteil undicht war,<sup>3</sup> so dass der tatsächliche Sanierungsbedarf vermutlich deutlich größer ist. Bei Berücksichtigung der Altersverteilung und deren Entwicklung, Abbildungen 1 und 2, ist für die Zukunft weiterhin mit einer Steigerung des Sanierungsbedarfs zu rechnen, insbesondere in den neuen Bundesländern, da dort noch über 50 % der Kanäle aus der Zeit vor dem zweiten Weltkrieg stammen.<sup>4</sup>

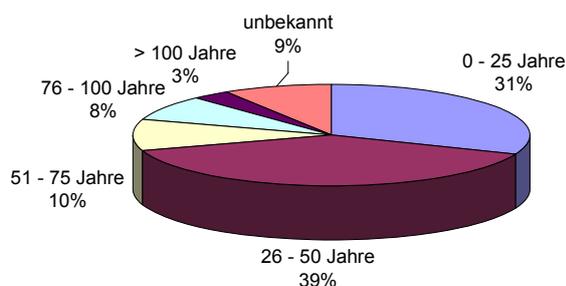


Abbildung 1: Altersverteilung der Kanäle im Jahr 2004<sup>4</sup>

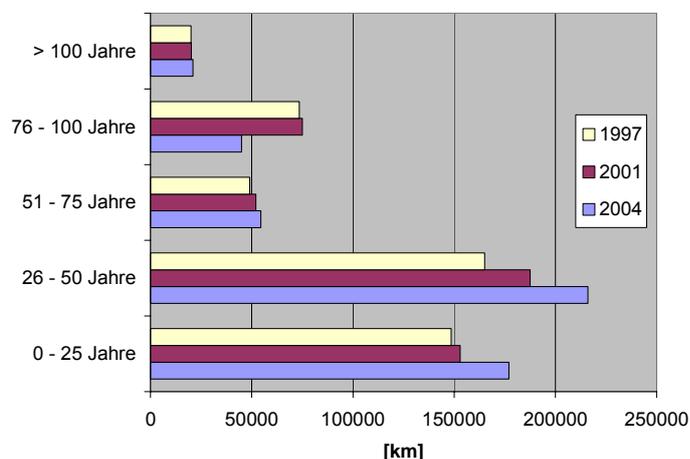


Abbildung 2: Entwicklung der Altersverteilung der Kanäle<sup>4</sup>

In Kanalisationen treten besonders häufig an den Rohrverbindungen, bei der Anbindung der Rohre an Schächte und bei der Anbindung von Seitenzuläufen/Hausanschlüssen

<sup>1</sup> Vgl.: Berger, C./ Lohaus, J., Zustand der Kanalisation 2004, 2004, S. 3 ff.

<sup>2</sup> Vgl.: Berger, C. et al, Zustand der Kanalisation 2001, 2001, S. 6.

<sup>3</sup> Vgl.: o.V., Leitfaden für die Sanierung von Kanalisationen, 1999, S. 5 ff.

<sup>4</sup> Vgl.: Berger, C./ Lohaus, J., Zustand der Kanalisation 2004, 2004, S. 3 ff.

Schäden auf, wie verschiedene Untersuchungen ergaben.<sup>5</sup> Bei Abwasserbehandlungsanlagen sind die Fugen in Behältern und Becken ein Schwachpunkt. Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, für diese Abdichtungs- und Sanierungsaufgaben einen geeigneten Fugendichtstoff zu entwickeln und zu erproben, dessen Eigenschaften mit denen werkseitig hergestellter Kompressionsdichtungen vergleichbar sind.

Die sehr ungünstigen Randbedingungen bei Kanalisationen im Betrieb, wie Unzugänglichkeit, Feuchtigkeit, Verschmutzung und unbekannte Bodenverhältnisse stellen besonders hohe Anforderungen an den einzusetzenden Dichtstoff. Im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie bereits in 1998 geförderten Forschungsvorhabens wurde am „ibb“ ein unter solchen Bedingungen einsetzbarer Dichtstoff entwickelt.<sup>6</sup> Mit diesem als isotrop expandierbaren Dichtstoff beschriebenen Werkstoff können durch die Kombination von Wasserunempfindlichkeit, Adhäsion und Expansion voneinander unabhängige Dichtwirkungen erzeugt werden, die sehr leistungsfähig sind. Ein weiterer Vorteil des Dichtstoffs auf Basis von Polyurethan ist seine hohe Elastizität. Die für die Expansion erforderliche Wärme wird durch eine exotherme Reaktion, die beim Mischen der Systemkomponenten einsetzt, erreicht. Eine Folge dieses stark exothermen Reaktionsverlaufs ist eine Topfzeit von maximal 120 s.<sup>7</sup> Entwickelt und auch in situ erprobt wurde dieser Dichtstoff für die Anwendung mit einem speziellen, in einen Packer integrierten Mischkopf mit dem MUSA-Verfahren.<sup>8</sup> Der entwickelte Dichtstoff wird von Sanierungsfirmen erfolgreich in situ eingesetzt, ist aber am Markt nicht weit verbreitet.

Im Unterschied zu dem 1998 entwickelten Dichtstoff, der nur für die Muffensanierung mit dem MUSA-Verfahren in nicht begehbaren Kanälen angewendet wird, soll der Einsatzbereich des neuen Dichtstoffs auf die zuvor erläuterten Abdichtungs- und Sanierungsarbeiten in Kanalisationen ausgeweitet werden. Eine Grundvoraussetzung dafür ist eine wesentlich längere Topfzeit von mindestens 30 Minuten. Die Verarbeitung des neuen Dichtstoffs soll bei den begehbaren Kanälen und Schächten händisch erfolgen, für die nicht begehbaren Kanäle ist die Nutzung der bestehenden Kanalrobotertechnik vorgesehen. Der Dichtstoff ist jeweils für die einzelnen Einsatzbereiche zu modifizieren und eine geeignete Misch- und Verarbeitungstechnik ist zu entwickeln bzw. die vorhandene Technik ist den Anforderungen des neuen Dichtstoffs anzupassen.

---

<sup>5</sup> Vgl.: Stein, D. / Kaufmann, O., Schadenanalyse an Abwasserkanälen, Korrespondenz Abwasser, 1993, S. 168 ff.; Berger, C./ Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation 2004, 2004, S. 6 f.

<sup>6</sup> Vgl.: o.V., Prototypische Herstellung der Dichtheit, 1998.

<sup>7</sup> Vgl.: Maagh, P., Sanierung von Rohrverbindungen, 1999, S. 68 ff.

<sup>8</sup> Vgl.: Stein, D., Instandhaltung von Kanalisationen, 1998, S. 405.

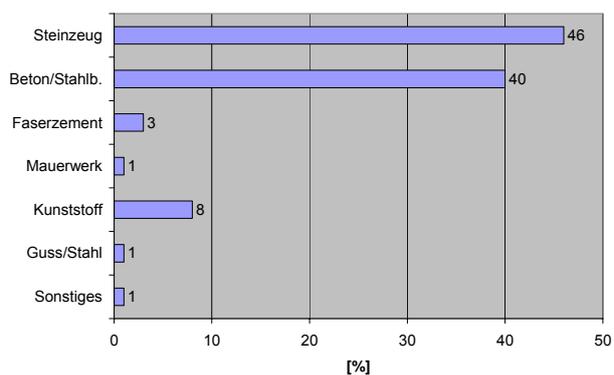


Abbildung 3: Materialverteilung der Kanäle < DN 800 [DWA 2004]

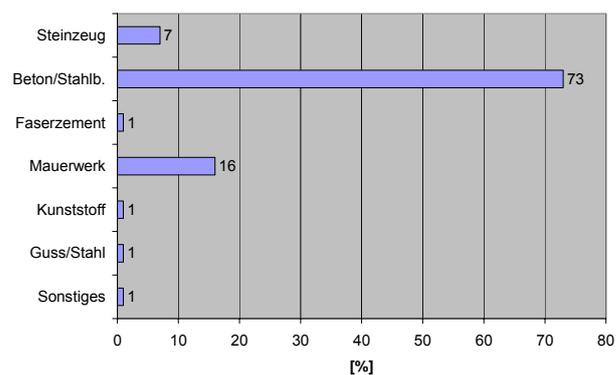


Abbildung 4: Materialverteilung der Kanäle ≥ DN 800 [DWA 2004]

Grundlage für die Entwicklung des neuen isotrop expandierbaren Dichtstoffs sollen die im Rahmen des Forschungsvorhabens von 1998 gewonnenen Erkenntnissen sein. In diesem ersten Teil des Forschungsvorhabens wird ein geeigneter isotrop expandierbarer Dichtstoff auf Basis von Polyurethan für die Sanierung von Rohrverbindungen bei begehbaren Kanälen ( $\geq$  DN 800) und Schächten sowie nicht begehbaren Kanälen ( $<$  DN 800) entwickelt. Wie in den Abbildungen 3 und 4 zu sehen ist, bestehen die Kanäle überwiegend aus Steinzeug- und Betonrohren. Daher werden für die Versuche im begehbaren Bereich Betonrohre und im nicht begehbaren Bereich Beton- und Steinzeugrohre eingesetzt.

## 2 Vorversuche

### 2.1 Materialien

Die ursprüngliche Überlegung, das im Rahmen des BMBF – Forschungsvorhabens „Prototypische Herstellung/Wiederherstellung der Dichtheit nicht begehrbarer Abwasserkanäle“<sup>9</sup> entwickelte Injektionsmaterial zu verwenden, konnte nicht realisiert werden. Die Topfzeit des Injektionssystems ließ sich aufgrund seiner sehr großen Reaktivität nicht auf die für die geplanten Anwendungen erforderliche Verarbeitungszeit von mindestens 30 min bis zu 2 h verlängern. Daher wurde mit ähnlichen Grundkomponenten ein neuer Dichtstoff entwickelt.

Basis für den neuen Fugendichtstoff bildet ein Zwei-Komponenten-Polyurethan-System. Die zwei Systemkomponenten werden im Folgenden mit PUR-Komponente und Härter-Komponente bezeichnet. Das Ergebnis nach dem Mischen der zwei Komponenten ist das Sanierungsmaterial. In die PUR-Komponente sind Mikrokugeln integriert, die zu einer irreversiblen isotropen Expansion angeregt werden können.



Abbildung 5: PUR-Komponente (grün) und Härter-Komponente (weiß), links Kleinmenge, rechts Gebinde

Die zwei Grundkomponenten des Polyurethan-Systems sind stark unterschiedlich viskos. Um eine gute Mischbarkeit zu gewährleisten, war eine Angleichung der Viskositäten erforderlich. Dabei ergab sich zunächst das Problem, dass sich die eingesetzten Füllstoffe absetzten und insbesondere die Härter-Komponente nicht ausreichend lagerstabil war. Durch Zugabe von Stabilisatoren konnte dieses Problem gelöst werden, so dass es nun-

<sup>9</sup> Vgl.: o.V., Prototypische Herstellung der Dichtheit, 1998.

mehr lediglich bei längerer Lagerung zu leichten Absetzerscheinungen der Härter-Komponente kommt, die aber problemlos durch Aufrühren beseitigt werden können. Die Expansion des Sanierungsmaterials beruht auf einer irreversiblen Ausdehnung der integrierten Mikrokugeln, für die eine Temperatur von mindestens 80 C° erforderlich ist. Bei ersten Vorversuchen stellte sich heraus, dass diese Temperatur durch die Reaktionswärme nicht erreicht wird und eine zusätzliche Energiezufuhr erforderlich ist. Für das weitere Versuchsprogramm wurde daher zunächst die Verarbeitbarkeit losgelöst von der Expansion untersucht, um parallel geeignete Verfahrenstechniken entwickeln zu können.

## 2.2 Mischtechnik

Im ersten Schritt wurde ein händisches Anmischen der zwei Komponenten in Kunststoff- oder Pappbechern mittels Holzspachtel angewandt. Aufgrund der hohen Viskosität des Materials war dieses Mischverfahren jedoch nur für Kleinmengen mit 150 g bis 200 g ausreichend. Um größere Materialmengen und Kleinmengen einfacher mischen zu können wurden durch einen Elektromotor angetriebene Mischhaken eingesetzt. Hiermit können die derzeit von der Firma AIK-Flammadur-Brandschutz GmbH hergestellten Gebinde von etwa 2500 g zuverlässig gemischt werden.



Abbildung 6: Mit Elektromotor angetriebene Mischhaken, links für eine Kleinmenge, rechts für ein 2500 g Gebinde

Bei der in situ nahen Erprobung wurde neben dem zuvor beschriebenen Mischhaken auch ein Mischer eingesetzt, der auf dem Sanierungsfahrzeug vorhanden war und im täglichen Gebrauch für Epoxidharze eingesetzt wird. In Abbildung 7 ist dieser Mischer dargestellt, mit dem ebenfalls erfolgreich 2500 g Gebinde vermengt wurden.



Abbildung 7: Mischer des Sanierungsfahrzeuges

Bei den zuvor erwähnten Mischverfahren und im Besonderen bei dem zur Verarbeitung des Sanierungsmaterials erforderlichen Umfüllen kommt es zu Luftenmischungen, die sich ungünstig auf die Verarbeitung auswirken. Deutlich reduziert wurden die Luftenlagerungen durch den Bau einer Auspressvorrichtung und das damit mögliche gezielte Befüllen des Verarbeitungsbehälters beim Einsatz eines Sanierungsroboters bzw. durch Verwendung einer Abfüllplatte bei händischer Einbringung des Materials (Abbildung 8).



Abbildung 8: Auspressvorrichtung und Abfüllplatte (rechts)

Nahezu vollständig vermieden wird dieses Problem, indem eine Zwei-Komponenten-Auspressmaschine mit statischem Mischrohr verwendet wird. Zu diesem Zweck wurde eine handelsübliche Zwei-Komponenten-Auspressmaschine, wie sie zum Mischen von Epoxid-Spachtelmasse zur Kanalsanierung benutzt wird, entsprechend dem erforderlichen

volumetrischen Mischverhältnis des PUR-Systems modifiziert. Durch das statische Mischrohr wird eine ausreichende Vermischung der zwei Komponenten gewährleistet und ein gezieltes Befüllen des Verarbeitungsbehälters ermöglicht. Bei der Wahl des statischen Mischrohres konnte ebenfalls auf ein in der Kanalsanierung gebräuchliches Produkt zurückgegriffen werden. Die modifizierte Auspressmaschine konnte bisher aber nur probe-weise eingesetzt werden, da vom Materialproduzenten noch kein geeignetes Verfahren gefunden wurde, um die zwei Komponenten in geeignete Schlauchverpackungen abzufüllen.

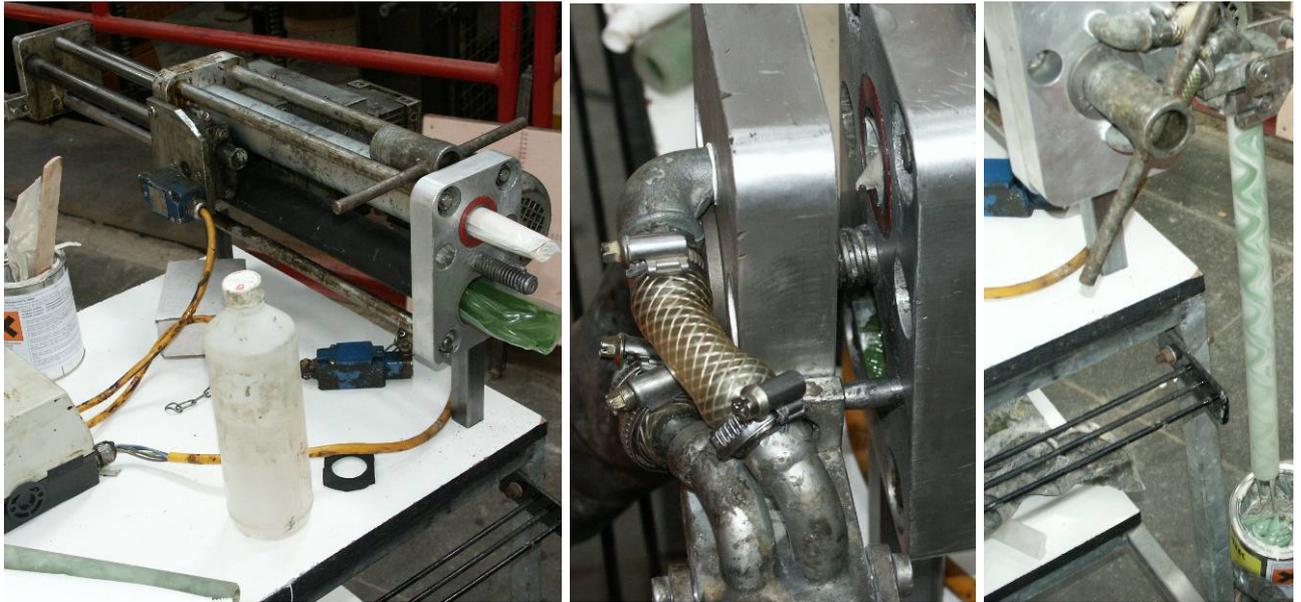


Abbildung 9: Probeversuch mit der modifizierten Zwei-Komponenten-Auspressmaschine

## 2.3 Einbau des Sanierungsmaterials

Der Fugendichtstoff soll ohne Schalung durch Verspachteln des Materials eingebracht werden. Das gemischte Sanierungsmaterial muss daher eine ausreichende Haftung am Rohrmaterial aufweisen, insbesondere darf es im Scheitel- und Kämpferbereich nicht zu einem Herausfallen oder Abrutschen des Fugendichtstoffs kommen. Um die Hafteigenschaften des Fugendichtstoffes zu testen, wurde zunächst ein Versuchsaufbau mit Rohrhalschalen aus Steinzeug und Beton verwendet. Zu diesem Zweck wurden jeweils Halterungen gebaut, die die Halbschalen im Bereich der Rohrverbindung fixieren.



Abbildung 10: Rohrhalbschalen in den Halterung, links Steinzeug DN 100, rechts Beton DN 200 mit Sanierungsmaterial

Mit diesem Versuchsaufbau konnte auch ein geeignetes Verfahren zur Einbringung des Sanierungsmaterials entwickelt werden. Im ersten Schritt wurde das gemischte Sanierungsmaterial direkt aus dem Mischbehälter mit einem Spachtel in den Muffenspalt eingebracht. Bei diesem Vorgehen konnten bereits die sehr guten Hafteigenschaften des Sanierungsmaterials festgestellt werden. Allerdings war die Klebewirkung so stark, dass das Sanierungsmaterial stärker am Spachtel als am Rohrmaterial haftete.

Im zweiten Schritt wurde das gemischte Sanierungsmaterial in eine Standard-Kunststoffkartusche umgefüllt, die mit einer Ausspritzdüse versehen und mittels einer Druckluftkartuschenpistole direkt in die Muffenspalte ausgepresst wurde. Die Durchmesser der Austrittsdüse wurden von 2 mm – dies entspricht der minimalen Öffnung der Düse - bis 14 mm – entsprechend der Austrittsöffnung an der Kartusche - variiert. Der maximal aufgebrachte Auspressdruck betrug 6 bar und war bei der kleinsten Düsenöffnung erforderlich. Mit diesem Verfahren konnte das Sanierungsmaterial erfolgreich in den Muffenspalt eingebracht

werden, so dass es auch im Kämpfer- und Scheitelbereich ohne Schalung haftete. Es war jedoch ein zweiter Arbeitsgang erforderlich, um das Sanierungsmaterial zu glätten und ggf. noch tiefer in den Muffenspalt einzudrücken.

Im dritten Schritt wurde dann ein Einbring- / Verpressschuh entwickelt, der es ermöglicht, das Sanierungsmaterial in einem Arbeitsgang einzubringen, einzudrücken und zu glätten. Der Verpressschuh kann entweder direkt und fest oder über ein kurzes Schlauchstück beweglich an der Kartusche angebracht werden. Mit diesem Einbringverfahren wurde auch in feuchten Steinzeug- und Betonrohrverbindungen eine Haftung des Sanierungsmaterials zuverlässig erreicht.

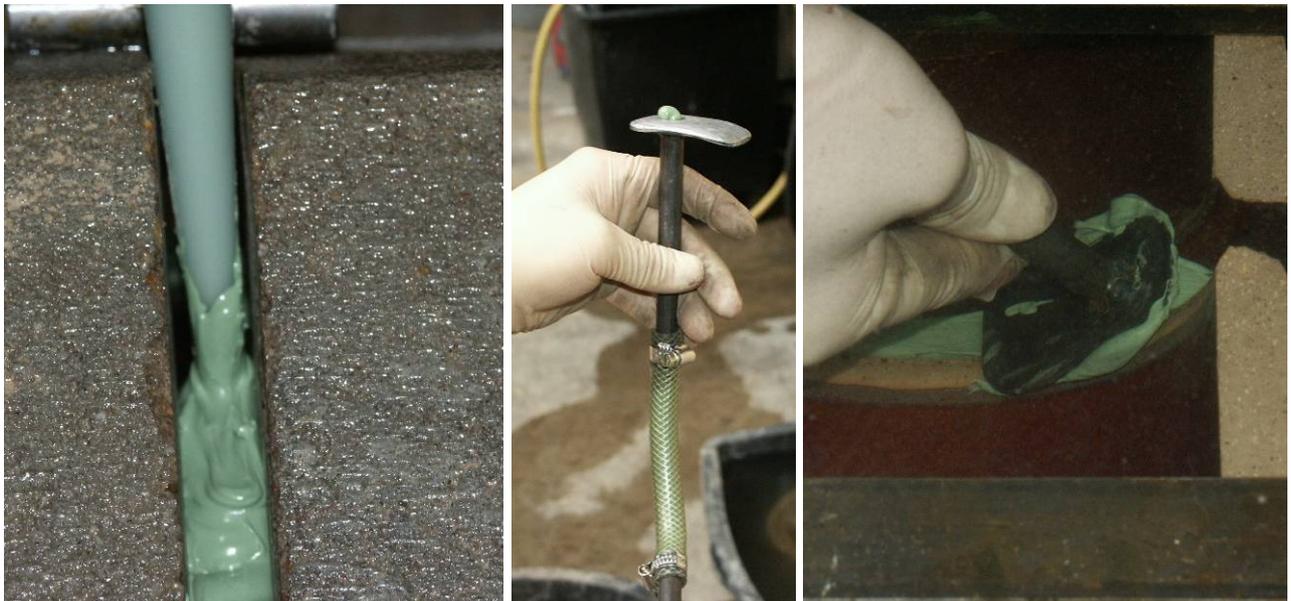


Abbildung 11: Einbringen des Sanierungsmaterials, links mit einer Düse, Mitte und rechts mit dem Verpressschuh

Die Vorversuche zum Einbau des Sanierungsmaterials wurden damit abgeschlossen, da zum einen die ausreichenden Hafteigenschaften des Materials für einen Einbau ohne Schalung nachgewiesen werden konnten und zum anderen ein geeignetes Einbringverfahren entwickelt wurde. Ferner wurde mit dieser Versuchsreihe die Auspressbarkeit des Sanierungsmaterials nachgewiesen, was eine Voraussetzung für die Verarbeitung des Materials mit der Kanalrobotertechnik ist.

## 2.4 Expansion

### 2.4.1 Vorversuche

Zunächst wurde die grundsätzliche Expandierbarkeit des Sanierungsmaterials untersucht. Dazu wurde das gemischte Sanierungsmaterial in kleine Kunststoff-Gefäße gefüllt, und diese wurden dann in einem Klimaschrank schrittweise erwärmt. Die Temperatur des Sanierungsmaterials wurde über Temperatursensoren kontrolliert. Es wurde festgestellt, dass mindestens eine Temperatur von 80 C° benötigt wird, um das Material zur Expansion zu bringen. Eine weitere Erhöhung der Temperatur führt nicht zu stärkerer Expansion. Für die weiteren Expansionsversuche wurde der Klimaschrank immer auf 95 C° vorgeheizt um sicherzustellen, dass die benötigten 80 C° im Sanierungsmaterial möglichst schnell und zuverlässig erreicht werden.

Bei den Versuchen expandierte das Sanierungsmaterial in den Probegefäßen nicht nur zur offenen Seite (oben), sondern auch in die anderen Richtungen und brachte die Kunststoff-Gefäße teilweise sogar zum Einreißen oder Aufplatzen. Um den Zeitpunkt oder Zeitraum zu ermitteln, in dem die größte Expansion erreicht werden kann, wurden Proben zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Anmischen erwärmt. Als günstigster Zeitraum für die Erwärmung erwies sich die Zeitspanne zwischen 15 Minuten und 2 Stunden nach dem Mischen des Sanierungsmaterials. Bei dieser Versuchsreihe wurde zudem als positiver Nebeneffekt der Erwärmung des Sanierungsmaterials festgestellt, dass dadurch die Aushärtung wesentlich beschleunigt wird.



Abbildung 12: Proben mit Sanierungsmaterial im Klimaschrank

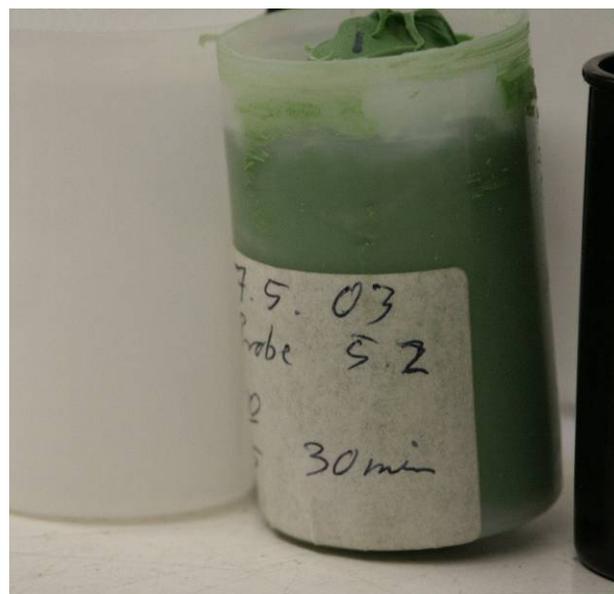


Abbildung 13: Probegefäß mit expandiertem Sanierungsmaterial

Da eine Umgebungstemperatur von über 80 C° nicht im Kanal realisierbar ist, wurde nach geeigneten Erwärmungsverfahren gesucht. Der in Betracht gezogene Einsatz von Mikrowellenstrahlung wurde nach Rücksprache mit dem Institut für Hochfrequenztechnik (IHF) der RWTH Aachen zunächst nicht weiter verfolgt. Das IHF hielt den Einsatz von Mikrowellen in einem nicht geschlossen abgeschirmten System wegen der einzuhaltenden Grenzwerte der Berufsgenossenschaften und der Strahlenschutzverordnung für kaum realisierbar. Da ein geschlossenes System im Kanal aber nicht zu verwirklichen ist, wurde der Empfehlung des IHF folgend nach Alternativen zur Erwärmung des Sanierungsmaterials gesucht.

Zuerst wurde der Einsatz von Heißluftgeräten getestet. Hierbei wurde das Sanierungsmaterial in eine mit Temperatursensoren versehene Schalung gefüllt und von der Oberseite erwärmt. Dazu musste zunächst eine Heizstufe und ein dazu passender Abstand gefunden werden, die nicht zu einer Überhitzung und damit Zerstörung des Sanierungsmaterials führen. Die Versuchsergebnisse waren unbefriedigend, weil die benötigte Zeit, um das Sanierungsmaterial bis zu einer Tiefe von nur einem Zentimeter zur Expansion zu bringen, 2 Stunden und mehr betrug. Die Wirkung der Heißluftgeräte ist außerdem nur punktuell, so dass ihr Einsatz zur Erwärmung des Sanierungsmaterials nicht sinnvoll ist.

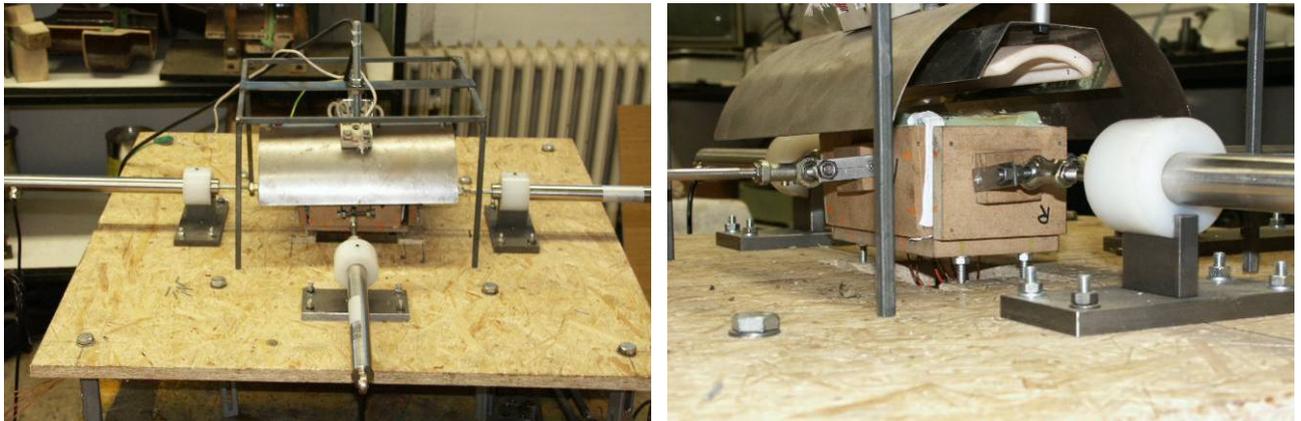


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Erwärmung des Sanierungsmaterials mit IR-Strahlung bei gleichzeitiger Bestimmung von Temperatur und Expansion

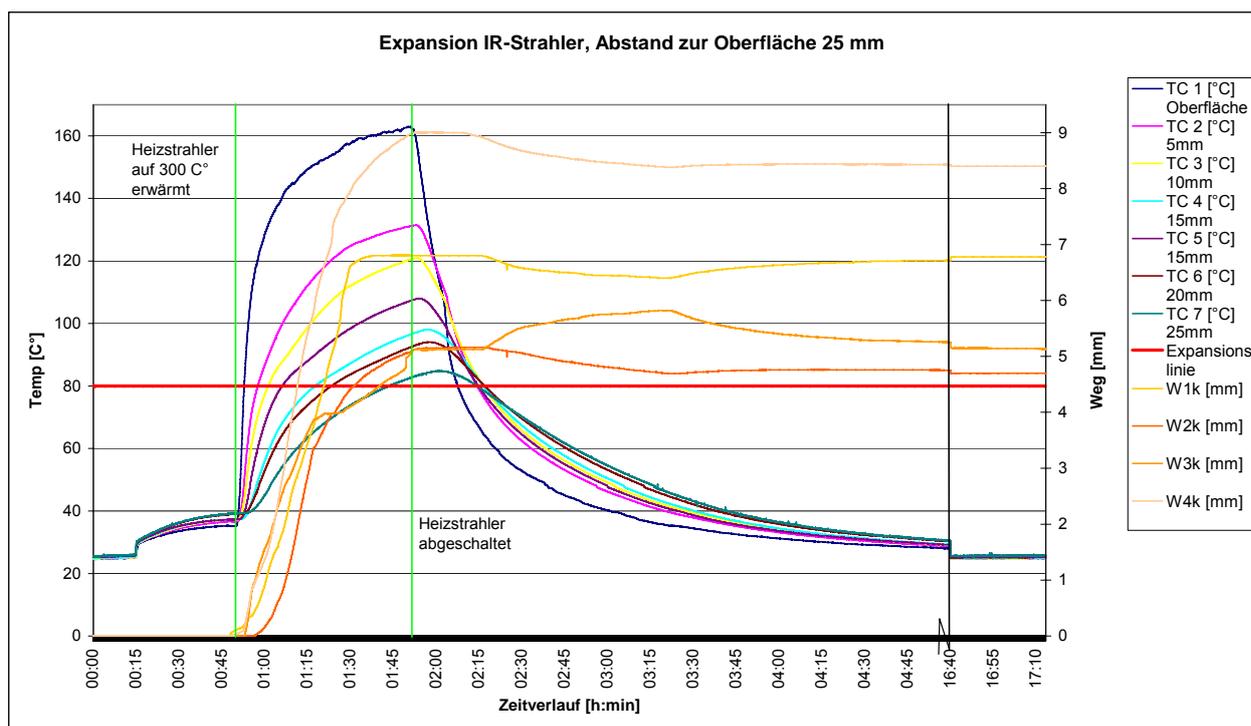


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen der Temperatur im Sanierungsmaterial und seiner Expansion

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einsatz von Infrarotstrahlung zur Erwärmung untersucht. Dabei wurde das Sanierungsmaterial wie zuvor in eine mit Temperatursensoren versehene Schalung eingebracht und von der Oberseite her mit einem Infrarotstrahler erwärmt. Bei den Versuchen zur Ermittlung der optimalen Kombination zwischen der Temperatur des IR-Strahlers und seines Abstandes von der Oberfläche des Sanierungsmaterials zeigte sich, dass sowohl eine kurzfristige Erwärmung der Oberfläche des Sanierungsmaterials über  $200\text{ C}^\circ$  als auch eine längerfristige Erwärmung über  $140\text{ C}^\circ$  zur Zerstörung des Materials führen. Bei einer Strahlertemperatur von  $300\text{ C}^\circ$  und einem Abstand von  $30\text{ mm}$  wurde mit einer Expansion bis zu einer Tiefe von  $15\text{ mm}$  innerhalb von  $20\text{ Minuten}$  das beste Ergebnis erreicht. Für die angestrebte vollständige Expansion des gesamten eingebrachten Sanierungsmaterials ist jedoch auch die IR-Strahlung nur bedingt geeignet, weil in den dazu erforderlichen Tiefen von  $20\text{ mm}$  bis  $30\text{ mm}$  selbst bei günstigsten Randbedingungen erst nach  $45\text{ min}$  bis  $60\text{ min}$  eine ausreichende Temperatur erreicht wird. Ein weiteres Problem beim Einsatz der IR-Strahlung resultiert aus der langsamen Erwärmung von der Oberfläche in die Tiefe. Entsprechend der Erwärmung erfolgt auch die Expansion des Sanierungsmaterials, so dass unmittelbar an der Rohr-Innenkante oder sogar in das Rohr hineinragendes Sanierungsmaterial zuerst expandiert. Da dieses Material seitlich nicht in der Expansion behindert wird, dehnt es sich über die Schadstelle (Muffe) hinaus aus und zieht dadurch weiteres Sanierungsmaterial aus der Schadstelle heraus. Die Dichtwirkung durch Anpressdruck kann daher nicht vollflächig oder gar nicht erzielt werden.

Da die untersuchten Erwärmungsverfahren nicht zu einem zufrieden stellenden Ergebnis führten, wurde die Überlegung zum Einsatz von Mikrowellenstrahlung wieder aufgegriffen. Die Erwärmung durch Mikrowellen basiert darauf, dass Dipole, z.B. Wasser, zum Schwingen angeregt werden und die entstehende Reibungsenergie in Wärme umgewandelt wird. Im Sanierungsmaterial befindet sich physikalisch gebundenes Wasser, das durch ein Molekularsieb an einer chemischen Reaktion gehindert ist. Um zu testen, ob mit Mikrowellenstrahlung das Sanierungsmaterial zur Expansion gebracht werden kann, wurde es in kleine Kunststoff-Gefäße gefüllt und in eine haushaltsübliche Mikrowelle mit 900 Watt Leistung gestellt. Nach maximal 6 Minuten konnte eine vollständige Expansion des Sanierungsmaterials erreicht werden, wie sie auch im vorgeheizten Klimaschrank nach ca. 15 Minuten erzielt wurde. Aufgrund dieser sehr guten Ergebnisse wurde intensiv nach einer Möglichkeit gesucht, Mikrowellenstrahlung auch außerhalb eines geschlossen abgeschirmten Systems einzusetzen.

Eine weitergehende Recherche über die Einsatzbereiche der Mikrowellentechnik erbrachte, dass durch eine Verwendung von gerichteter Mikrowellenstrahlung die anstehende Aufgabenstellung lösbar sein müsste. Bei der Trocknung von Bauwerken wird diese Technik seit kurzer Zeit bereits erfolgreich angewendet. Nach Absprache mit der Firma MTB Mikrowellen Trocknungsgeräte Bauwerkserhaltung Holzschutz, die seit einigen Jahren im Bereich Forschung und Entwicklung von Mikrowellentechnologie tätig ist, wurde ein CE-zertifizierter, zur Bauwerkstrocknung eingesetzter Mikrowellengenerator angeschafft, da dieser ohne wesentliche Modifikationen für den Einsatz in begehbaren Kanälen und Schächten geeignet schien.

## 2.4.2 Versuche mit Mikrowellen-Trocknungsgerät

Bei diesem Mikrowellengenerator handelt es sich um das in neun Stufen regelbare Modell MWG – LC 1.1 R mit einer maximalen Leistung von 1000 Watt. Für den Mikrowellengenerator wurde eine drehbare Halterung angefertigt, die es ermöglicht, ihn entlang der Rohrfuge zu bewegen. Ferner wurden zwei neue, schmaler dimensionierte Hornantennen hergestellt (375 mm x 150 mm, 195 mm x 150 mm), da die Größe der werkseitigen Hornantenne mit 395 mm mal 335 mm aufgrund der annähernd quadratischen Form nicht gut geeignet ist, um einen länglichen Bereich wie die Rohrfuge zu erwärmen. Parallel zu diesen Konstruktionen wurden einige Abschirmungselemente aus Stahlblech hergestellt, die eine freie Ausbreitung der Mikrowellenstrahlung bei Versuchen in der Institutshalle verhindern. In situ sind solche Schutzmaßnahmen nicht erforderlich, da die maximale Ausbreitung der Mikrowellen im Erdreich, nach übereinstimmender Auskunft der Firma MTB und der zuständigen Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik, bei etwa 30 cm bis 40 cm liegt.



Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Ermittlung der optimalen Kombination der Einsatzparameter

Vor dem Einsatz des Mikrowellengenerators im in situ nahen Versuchsaufbau zur Simulation begehrter Kanalrohre wurden umfangreiche Versuche zur Bestimmung der optimalen Einsatzparameter durchgeführt. Ziel war es, die am besten geeignete Kombination aus der Leistung des Mikrowellengenerators, der Größe der Hornantenne und ihrem Abstand von der zu erwärmenden Oberfläche zu ermitteln. Dazu wurde prinzipiell der gleiche Versuchsaufbau (Abbildung 16) verwendet, der schon bei der Erprobung zur Erwärmung mit Infrarotstrahlung zum Einsatz kam. In Abbildung 17 ist exemplarisch der Verlauf der Temperaturverteilung in einem Probekörper dargestellt. Durch die Mikrowellenstrahlung kann es zu Einkopplungen in die Messverkabelung der Temperaturfühler kommen, so dass die

angezeigten Temperaturen nicht den tatsächlichen entsprechen. Diese Effekte können unterschiedlich stark ausgeprägt sein. So waren sie beim Messfühler T2 extrem vorhanden, bei T3 traten sie hingegen kaum auf. Um dennoch verlässliche Aussagen über die Temperaturen innerhalb des Probekörpers treffen zu können, wurde während der Erwärmung zweimal für etwa eine Minute der Mikrowellengenerator abgeschaltet, so dass keine Einkopplungen vorhanden waren und die tatsächlichen Temperaturen angezeigt wurden.

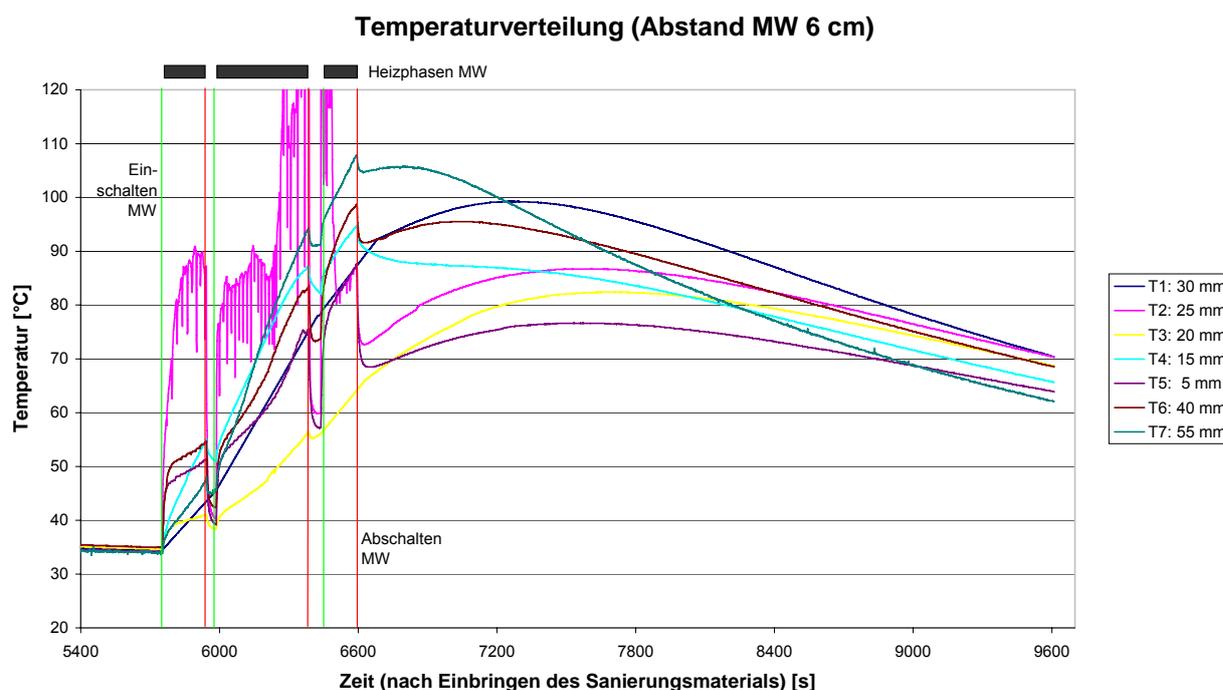


Abbildung 17: Temperaturverteilung bei Erwärmung mit dem Mikrowellengenerator

Mit den während der zwei Unterbrechungen gemessenen Daten sowie den vor und nach der Bestrahlung aufgezeichneten Daten wurde der Temperaturverlauf wie in Abbildung 18 dargestellt geglättet. Die Millimeterangaben in der Legende hinter den Temperatursensoren T1 bis T7 beziehen sich jeweils auf den Abstand der Sensoren von der Oberfläche des Probekörpers vor der Erwärmung. Mit Hilfe des Anordnungsschemas für die Temperatursensoren aus Abbildung 19 können Aussagen über die räumliche Entwicklung der Expansion des Sanierungsmaterials innerhalb des Probekörpers getroffen werden. So ist deutlich zu erkennen, dass die Erwärmung des Sanierungsmaterials nicht von der Oberfläche in die Tiefe geht, sondern vom Materialinneren und von der Unterseite ausgeht. Entsprechend erfolgt die Expansion des Sanierungsmaterials auch ab einer Temperatur von 80°C von der Mitte zum Rand. Dies bewirkt, dass das Sanierungsmaterial nicht keilförmig expandiert und gegebenenfalls in Richtung der Wärmequelle herausquillt, sondern sich vielmehr wie erwünscht direkt verspannt.

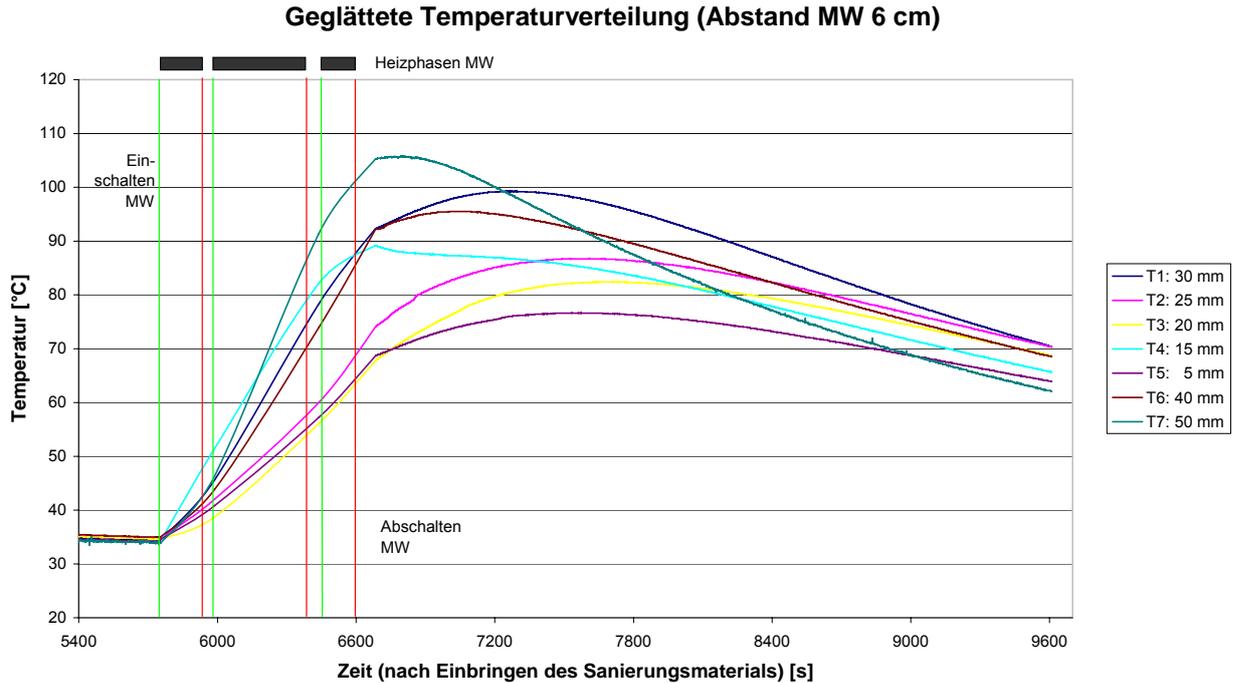


Abbildung 18: Geglättete Temperaturverteilung bei Erwärmung mit dem Mikrowellengenerator

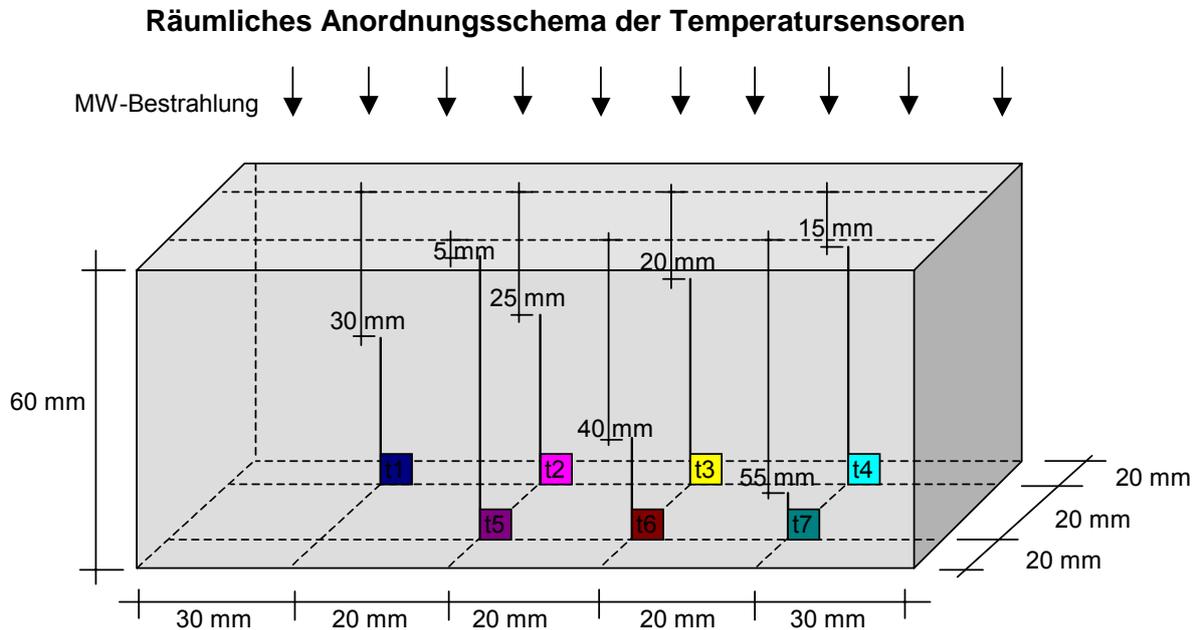


Abbildung 19: Räumliches Anordnungsschema der Temperatursensoren

Deutlich zu erkennen ist außerdem, dass nach dem Abschalten des Mikrowellengenerators die Temperaturen an den Messsensoren nicht direkt fielen, sondern im Gegenteil weiterhin noch anstiegen. Dies galt insbesondere für die in der Mitte des Probekörpers liegenden Temperatursensoren, da offensichtlich ein Temperatenausgleich zwischen den unterschiedlich erwärmten Zonen im Inneren des Probekörpers stattfand. So wurde die zur

Expansion erforderliche Temperatur von 80°C an den Sensoren T2 und T3 erst circa 5 Minuten bzw. 10 Minuten nach dem Abschalten des Mikrowellengenerators erreicht.

Abbildung 20 zeigt im Längs- und Querschnitt den Probekörper aus dem zuvor erläuterten Erwärmungsversuch mit dem Mikrowellengenerator. Zur besseren Unterscheidung von expandiertem Bereich (helleres grün) und nicht expandiertem Bereich (dunkleres grün) wurde die „Expansionsgrenze“ nachgezeichnet. Ferner wurden die Positionen der Temperatursensoren in die jeweilige Schnittebene übertragen. Die Schnitte an dem realen Probekörper bestätigen die zuvor anhand der Messdaten gewonnen Erkenntnisse. So lagen außer Sensor T5, an dem 80°C nicht erreicht wurden, alle Sensoren im expandierten Bereich. Die Temperatursensoren T2 und insbesondere T3, an denen die 80°C nur geringfügig überschritten wurden, lagen nahe an der „Expansionsgrenze“, was nochmals bestätigt, dass zur Expansion mindestens 80°C erreicht werden müssen.



Abbildung 20: Längs- und Querschnitt durch den von oben mit MW erwärmten Probekörper

Als Resultat der hier an einem Beispiel erläuterten Versuche zur Bestimmung der am besten geeigneten Kombination aus der Leistung des Mikrowellengenerators, der Größe der Hornantenne und ihrem Abstand von der zur erwärmenden Oberfläche wurde folgendes ermittelt:

Leistung des Mikrowellengenerators: Stufe 8 oder 9 (entspricht 890 – 1000 Watt)

Größe der Hornantenne: 375 mm x 150 mm

Abstand von der Oberfläche: 3 cm bis 8 cm

Beim Abstand der Hornantenne von der zu erwärmenden Oberfläche konnten innerhalb der oben angegebenen Bandbreite keine relevanten Unterschiede auf die Erwärmungsdauer und den Grad der Expansion festgestellt werden. Daher empfiehlt es sich, den Abstand möglichst klein zu wählen, um reflektierte Mikrowellenstrahlung mit der Hornantenne wieder auffangen zu können und somit die Streustrahlung gering zu halten. Bei der Größe der Hornantenne war eindeutig die Tendenz erkennbar, dass bei kleinerer Hornantenne und konstanter Leistung des Mikrowellengenerators die Erwärmungszeit abnahm. Verbunden damit war jedoch auch, dass die Größe der erwärmbaren Fläche abnahm. Für lange schmale Körper, wie Rohrfugen, hat sich daher die oben empfohlene Kombination am besten bewährt.

Für den Einsatz in nicht begehbaren Kanälen konnte die oben erläuterte Mikrowelle aufgrund ihrer Abmessungen nicht eingesetzt werden. Selbst bei einer Trennung von Mikrowellengenerator und Hornantenne wären die jeweiligen Abmessungen nicht klein genug, um in dem für die Versuche vorgesehen Durchmesser DN 300 eingesetzt werden zu können. Daher musste eine komplette Neuentwicklung einer Mikrowelle für diesen Durchmesser samt Trägereinheit vorgenommen werden.

### 2.4.3 Entwicklung eines Spezial – Mikrowellengenerators

Mit der Firma „AC-Microwave“ konnte ein Partner gefunden werden, der nach spezifischen Vorgaben eine entsprechende Mikrowelle entwickelte, die auf einer im Institut hergestellten Trägereinheit montiert wurde. Vorgabe für die Leistung der Mikrowelle war, das Sanierungsmaterial in einem etwa 15 mm breiten und 30 mm tiefen Fugenspalt eines Kanalrohres DN 300 innerhalb von 20 bis 30 Minuten zur Expansion zu bringen.

Zunächst wurde die Mikrowelleneinheit mit einer provisorischen Trägerkonstruktion auf ihre Eignung hin getestet (Abbildung 21). Aufgrund der Ergebnisse aus diesen Tests, wurde die Kühlung der Mikrowelle nochmals überarbeitet, damit auch ein Dauerbetrieb zuverlässig gewährleistet werden kann. Ferner mussten die Halterungen für die Abstützräder, die ein Aufsetzen der Mikrowelle auf dem Rohr verhindern, geändert werden, da die zunächst verwendeten durchgehenden Achsen teilweise auf dem expandierten Sanierungsmaterial aufsetzten.



Abbildung 21: Test der Mikrowelle für den nicht begehbaren Kanal

Nach den Modifikationen an der Mikrowelleneinheit wurde diese auf die im ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb gefertigte Trägereinheit angepasst. Dabei ist die Trägereinheit mit einem Elektromotor für den Fahrtrieb und einem weiteren zum Drehen der Mikrowelleneinheit ausgestattet. Letzterer lässt sich per Fernbedienung stufenlos in seiner Geschwindigkeit regeln. Die Mikrowelleneinheit kann durch zwei Druckluftzylinder angehoben werden, um die am Hohlleiter austretende Mikrowellenstrahlung mit möglichst geringem Abstand in das Sanierungsmaterial einzuleiten. Weiterhin ist eine Kamera etwa 20 cm vor dem Hohlleiter angebracht. Sie ist abnehmbar, damit der Mikrowellenroboter über einen Standardkanalschacht in eine Haltung eingesetzt werden kann und dient zur exakten Positionierung der Mikrowelle sowie zur Kontrolle der Expansion.

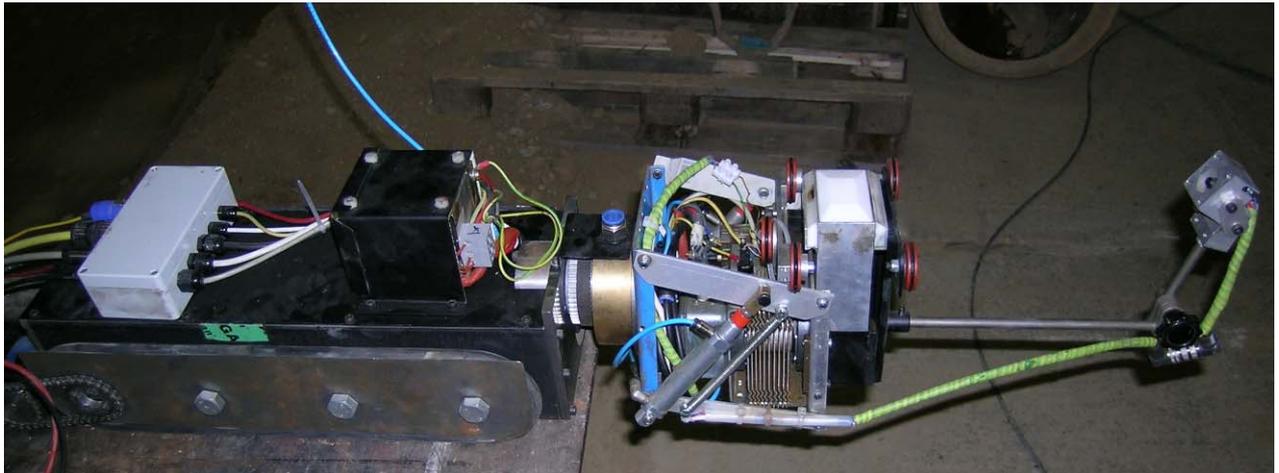


Abbildung 22: Mikrowellenroboter

### 3 In situ nahe Versuche

Ziel der in situ nahen Versuche war es, das Sanierungsmaterial selbst und insbesondere die benötigte Verfahrenstechnik so weit zu entwickeln, dass damit zuverlässig saniert werden kann. Die Entwicklung der für die Expansion des Sanierungsmaterials erforderlichen Verfahrenstechnik konnte bereits im ersten Teil des Forschungsvorhabens für begehbare Kanäle und Schächte umgesetzt werden. Für den Einsatz in nicht begehbaren Kanälen wurde diese Aufgabenstellung im zweiten Teil des Forschungsvorhabens gelöst.

#### 3.1 Sanierung nicht begehbbarer Kanäle / Robotersanierung

Für die Sanierung von nicht begehbaren Kanälen mit dem neu entwickelten Sanierungsmaterial soll die bestehende Kanalroboter-Technik genutzt werden. Dabei soll das Sanierungsmaterial verspachtelt werden, so dass die Schadstellen ohne den Einsatz von Schaltungen saniert werden können. Für das Versuchsprogramm wurden zunächst Steinzeugrohre mit Glockenmuffe und Betonfalzrohre mit Fuß der Nennweite DN 300 gewählt. Den eingesetzten Sika-Kanalroboter verwendet der Projektpartner, die Firma Kuchem, im Tagesgeschäft unverändert für Kanalsanierungen mit Epoxid-Harz.



Abbildung 23: Sanierungsfahrzeug und Sika-Kanalsanierungsroboter

Für die Sanierungsversuche wurden zwei Varianten zur Lagerung / Bettung der Rohre gewählt. Zum einen wurden sie in speziell für diese Versuchsreihe konstruierte und mit Sand gefüllte Stahlkästen eingebaut (Abbildung 24), zum anderen wurden die Rohre auf einem Stahlträger befestigt (Abbildung 25). Die Vorteile des Einbaus in den Stahlkästen sind die realitätsnahe Bettung der Rohre und die Möglichkeit, einen Grundwasserstand in den Stahlkästen zu simulieren, so dass durch die Schadstellen Wasser eindringen kann.

Der Versuchsaufbau mit dem Stahlträger wurde gewählt, um hintereinander mehrere Muffen sanieren zu können. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei den Dichtheitsprüfungen evtl. auftretende Undichtigkeiten direkt optisch von außen erkannt werden können.



Abbildung 24: Einbau der Rohre in Stahlkästen mit Sandbettung



Abbildung 25: Lagerung auf einem Stahlträger, links Betonrohre, rechts Steinzeug-Rohrstrang

Bereits beim ersten Versuch zeigte sich, dass sich das Sanierungsmaterial mit dem Sika-Kanalroboter gut verarbeiten lässt. Modifikationen an dem Roboter waren daher nicht erforderlich, lediglich für das Umfüllen des Sanierungsmaterials vom Mischbehälter in die für den Sika-Kanalroboter verwendeten Schlauchbeutel musste eine spezielle Auspressvorrichtung konstruiert werden. Das nach der Aushärtung evtl. in den Kanal ragende Sanierungsmaterial kann mit der bestehenden Frästechnik entfernt werden (Abbildung 27).



Abbildung 26: Roboter beim Einbringen des Sanierungsmaterials



Abbildung 27: Roboter beim Abfräsen von überschüssigem Sanierungsmaterial

Da Robotersanierungen sowohl bei 7 C° als auch bei 26 C° am „ibb“ erfolgreich ausgeführt wurden, konnte insoweit die Verarbeitbarkeit des Sanierungsmaterials im angestrebten Temperaturbereich von 5 C° bis 25 C° nachgewiesen werden. Die ideale Verarbeitungstemperatur liegt bei ca. 20 C°. Bei geringen Temperaturen ist das Sanierungsmaterial zähflüssiger und damit schwieriger zu verarbeiten. Bei höheren Temperaturen verkürzt sich die Topfzeit.



Abbildung 28: Längsriss



Abbildung 29: Querriss

In den Versuchen wurden verschiedene Randbedingungen variiert. So wurden neben Rohrverbindungen auch Risse (Längs- und Querrisse) saniert (Abbildung 28, Abbildung 29). Weiterhin konnte eine Sanierung im Grundwasser simuliert werden, indem der gesamte Stahlkasten mit Wasser befüllt wurde, so dass es durch die jeweilige Schadstelle in das Rohr floss (Abbildung 30). In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Sanierung bei durchfließendem Wasser vorgenommen (Abbildung 31).



Abbildung 30: Sanierung unter "drückendem" Wasser



Abbildung 31: Sanierung bei durchfließendem Wasser

Im zweiten Teil des Forschungsvorhabens wurde der neu entwickelte Mikrowellenroboter auf seine Gebrauchstauglichkeit hin getestet. Hierfür wurden wiederum Versuchsreihen mit Steinzeug- und Betonrohren in den bereits beschriebenen Versuchskästen durchgeführt. Aufgrund der schlechten Qualität der im ersten Teil des Forschungsvorhabens eingesetzten Betonrohre wurden im zweiten Teil allerdings Betonrohre mit Glockenmuffen, die den Anforderungen der FBS<sup>10</sup> entsprechen, verwendet. Ferner wurde anstelle des Sanierungsroboters der Firma Sika ein Roboter der Firma KA-TE eingesetzt, der von der Firma Kuchem ebenfalls im Tagesgeschäft in unveränderter Form verwendet wird.



Abbildung 32: KA-TE Sanierungsroboter



Bei der in situ nahen Erprobung mit nachträglicher Expansion durch eine Mikrowellenerwärmung wurde zunächst das Sanierungsmaterial, wie bei den zuvor beschriebenen Versuchen, mit dem Sanierungsroboter in die jeweiligen Schadstellen eingebracht. Nach einer entsprechenden Wartezeit, die von 90 Minuten bis zu 6 Stunden variiert wurde, begann die Erwärmung mit der Mikrowelle. Mit Hilfe der Kamera konnte der Mikrowellenroboter so positioniert werden, dass der „Kopf“ des Hohlleiters exakt unter dem Muffenspalt lag. Nach

<sup>10</sup> FBS: Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V.

dem Anheben der Mikrowelleneinheit über zwei Druckluftzylinder, war die Ausgangsposition für das Erwärmen erreicht und die Mikrowelle wurde eingeschaltet. Nach einer etwa einminütigen Verweildauer in dieser Stellung begann die Drehung der Mikrowelleneinheit entlang der Muffe. Die Geschwindigkeit konnte per Fernbedienung, in Abhängigkeit vom Expansionsfortschritt, der mittels der Kamera beobachtet wurde, gesteuert werden. Die Expansion des Sanierungsmaterials ist neben der Volumenvergrößerung, die in Abhängigkeit des Erwärmungszeitpunktes nach dem Einbringen variiert, an einer Verfärbung des Materials gut zu erkennen.



Abbildung 33: Mikrowellenroboter

Nach der in situ nahen Erprobung des isotrop expandierbaren Sanierungsmaterials in den zuvor beschriebenen Versuchen, wurden noch zwei Teststrecken, je einmal mit Steinzeug- und Betonrohren, in der Versuchsbahn des ibb hergestellt und saniert. Ziel dieser Versuche war, neben der Schaffung einer größeren Basis zur Beurteilung des Sanierungserfolges mit dem neu entwickelten isotrop expandierbaren Sanierungsmaterial, eine weitergehende Erprobung der Verfahrenstechnik und des Ablaufs der einzelnen Arbeitsschritte. Dabei stellte sich heraus, dass der Ablauf, wie er in den zuvor beschriebenen Versuchen in den Stahlkästen durchgeführt wurde, auch auf den Rohrstrang übertragen werden konnte. Auch das Herablassen des Mikrowellenroboters in den Rohrstrang, das bei diesen Versuchen als zusätzlicher Arbeitsschritt hinzukam, war in einem Schacht ab einem Durchmesser von DN 1000 möglich, wenn der Kameravorsatz abgebaut wurde. Der Vorsatz ist mit einer Steckverbindung extra dafür ausgelegt worden.

Bei den in situ nahen Versuchen in den Rohrsträngen traten jedoch Probleme mit dem Antrieb des Mikrowellenroboters auf, die dazu führten, dass der Roboter nicht immer zuverlässig bewegt werden konnte. So stellte sich bei den Versuchen heraus, dass die Antriebsräder des Roboters auf nassem Untergrund gelegentlich durchrutschten. Ein weiteres Problem lag zudem darin, dass konstruktionsbedingt nicht alle vier Räder angetrieben

werden konnten. Dies hatte bei Versätzen und Versprüngen ein Aufsetzen des Roboters zur Folge, was dann häufig zu einem Steckenbleiben führte.

Bei der Konzeption des Antriebs des Mikrowellenroboters wurde von einem durchgehenden Hartgummi-Riemen anstelle von einzelnen Rädern ausgegangen. Bei den ersten Versuchen stellte sich aber heraus, dass der Hartgummi-Riemen den Belastungen nicht standhielt und riss. Dieses Problem konnte auch mit geänderten Materialzusammensetzungen des Riemens, die nach Rücksprachen mit verschiedenen Herstellern getestet wurden und speziell vulkanisierter Verbindungen nicht vermieden werden. Daher wurde ein Wechsel vom Hartgummi-Riemen hin zu Rädern erforderlich, was zumindest bei den in situ nahen Versuchen ohne Versprünge zuverlässig funktionierte.

Bei einer Erprobung in einem öffentlichen Kanal hätten diese Randbedingungen jedoch nicht garantiert werden können, so dass im Extremfall der Mikrowellenroboter hätte geborgen werden müssen. Daher wurde auf eine Erprobung im öffentlichen Kanal verzichtet.

Die mangelhafte Traktion des Roboters ist jedoch kein grundsätzliches Problem der gewählten Verfahrenstechnik, sondern auf die spezielle Konstruktion dieses Mikrowellenroboters zurück zu führen. Der Markt bietet Roboterfahrwagen, die sich in der Praxis bewährt haben und einen zuverlässigen Antrieb gewährleisten, aber im Rahmen des Forschungsvorhabens war aus Kostengründen der Kauf eines solchen nicht möglich.

### 3.2 Sanierung von Schächten

Im Rahmen des Versuchsprogramms zur Sanierungen von Schächten wurde auf einer hierfür hergestellten Bodenplatte ein etwa 4,30 m hohes Schachtbauwerk aus Fertigteil-schachtringen DN 1000 gemäß DIN 4034 Teil 2<sup>11</sup> errichtet. Dabei wurden zunächst 6 Schachtringe mit einer Bauhöhe von 250 mm, dann einer mit 500 mm und abschließend zwei mit 1000 mm Bauhöhe aufgebaut, so dass für die Dichtheitsprüfung in der untersten Fuge eine Wassersäule von 4 m anstand. Durch Abstandhalter wurde jeweils eine Fugenbreite von etwa 10 mm bei allen 9 Fugen sichergestellt. Vor dem Einbringen des Sanierungsmaterials wurden die Schachtringe im Fugenbereich angefeuchtet.

Zum Einbringen des Sanierungsmaterials wurde zunächst auf das in den Vorversuchen entwickelte Verfahren mit einem Verpressschuh und der mit Druckluft betriebenen Kartuschenpistole zurückgegriffen. Da die nutzbaren Standard-Kunststoffkartuschen nur maximal 300 ml aufnehmen konnten und das Befüllen mit gemischtem Sanierungsmaterial aufwändig war, wurde nach einem alternativen Einbringwerkzeug gesucht. Mit der Druckluftpistole SVV 70 der Firma Beyer & Otto wurde ein Gerät gefunden, das über eine Abfüllplatte das Sanierungsmaterial aufnehmen und es dann in die Schadstelle auspressen kann. Um die Druckluftpistole einsetzen zu können, musste eine Austrittsdüse sowie ein passender Verpressschuh hergestellt und die Abfüllplatte an die verwendeten Mischbehälter angepasst werden.



Abbildung 34: Druckluftpistole SVV 70 mit Verpressschuh



Abbildung 35: Gemischtes Sanierungsmaterial mit Abfüllplatte und Druckluftpistole SVV 70

Das Sanierungsmaterial wird mit Hilfe von Unterdruck, der durch eine Venturidüse an der Druckluftpistole erzeugt wird, in die Kartusche eingezogen. Zur Erzeugung eines ausreichend starken Unterdrucks ist Druckluft von mindestens 4 bar erforderlich. Nach der Mate-

---

<sup>11</sup> Vgl.: o.V., DIN 4034-2.

rialaufnahme wird ein Schalter an der Venturidüse umgelegt, so dass die Druckluft dann zum Einbringen des Sanierungsmaterials in die Fugen genutzt werden kann. Dabei hat sich ein Druck von ca. 1,5 bar in Kombination mit einer Öffnung von 14 mm im Verpressschuh als geeignet herausgestellt. Mit der entwickelten Verfahrenstechnik kann in einem Arbeitsgang ca. 1 Liter Sanierungsmaterial verarbeitet werden.



Abbildung 36: In situ nahe Sanierung von Schachtringen

### 3.3 Sanierung begehbare Kanäle

Das Versuchsprogramm zur Sanierung begehbare Kanäle wurde mit horizontal aufgebauten Fertigteilschachtringen DN 1500 gemäß DIN 4034 Teil 2 durchgeführt. Zum Einbringen des Sanierungsmaterials in die 5 bis 25 mm breiten Fugen konnte bei den Versuchen erfolgreich die für die Sanierung von Schachtringen entwickelte Verfahrenstechnik eingesetzt werden.



Abbildung 37: Einbringen des Sanierungsmaterials in begehbarem Kanal DN 1500

Da es bei sehr nassem Rohruntergrund vereinzelt zum Abrutschen des Sanierungsmaterials im Scheitel- und oberen Kämpferbereich kam, wurde für diesen Fall eine unterstützende Schalung benötigt. Es wurden zwei Varianten erprobt.

Zum Einen wurde eine Stahlschalung hergestellt, die von innen gegen die zu sanierende Rohrfuge verspannt wurde. Durch Einfüllstutzen im Abstand von etwa 30 cm wurde das Sanierungsmaterial mit der bewährten Druckluftpistole eingebracht. Durch kleine Öffnungen mittig zwischen den Einfüllstutzen wurde kontrolliert, ob sich das Sanierungsmaterial entlang der Schalung ausbreitete und die Fuge füllte. Mit dieser Stahlschalung konnte das Sanierungsmaterial erfolgreich eingebracht werden. Allerdings war das Ausschalen und Reinigen der Schalung schwierig, weil die Schalung sehr stark an der sanierten Rohrfuge klebte und sich nur nach Erwärmung mit erheblichem Kraftaufwand lösen ließ.

Bei der zweiten Variante wurde unmittelbar nach dem Einbringen des Sanierungsmaterials mit der Druckluftpistole ein circa 20 cm breiter Streifen aus beschichtetem Karton über das eingebrachte Material im Fugenbereich gerollt. Anschließend wurde der Kartonstreifen mit einer Rolle fest angedrückt. Dies war ausreichend, um ein Abrutschen oder gar Herausfallen des Sanierungsmaterials zu verhindern. Nach dem Aushärten konnte der Karton ohne großen Aufwand entfernt werden. Darunter war eine glatte Fugenoberfläche, die nur noch geringer Nachbehandlung bedurfte. Diese Variante stellte sich somit als geeignete Mög-

lichkeit heraus, auch auf sehr nassem Rohruntergrund das Sanierungsmaterial erfolgreich im Scheitel- und Kämpferbereich einzubringen, so dass die Entwicklung und Erprobung eines geeigneten Materials sowie auch Einbringverfahrens für begehbare Kanäle erfolgreich abgeschlossen wurde.



Abbildung 38: Einbringen des Sanierungsmaterials mit der Stahlschalung

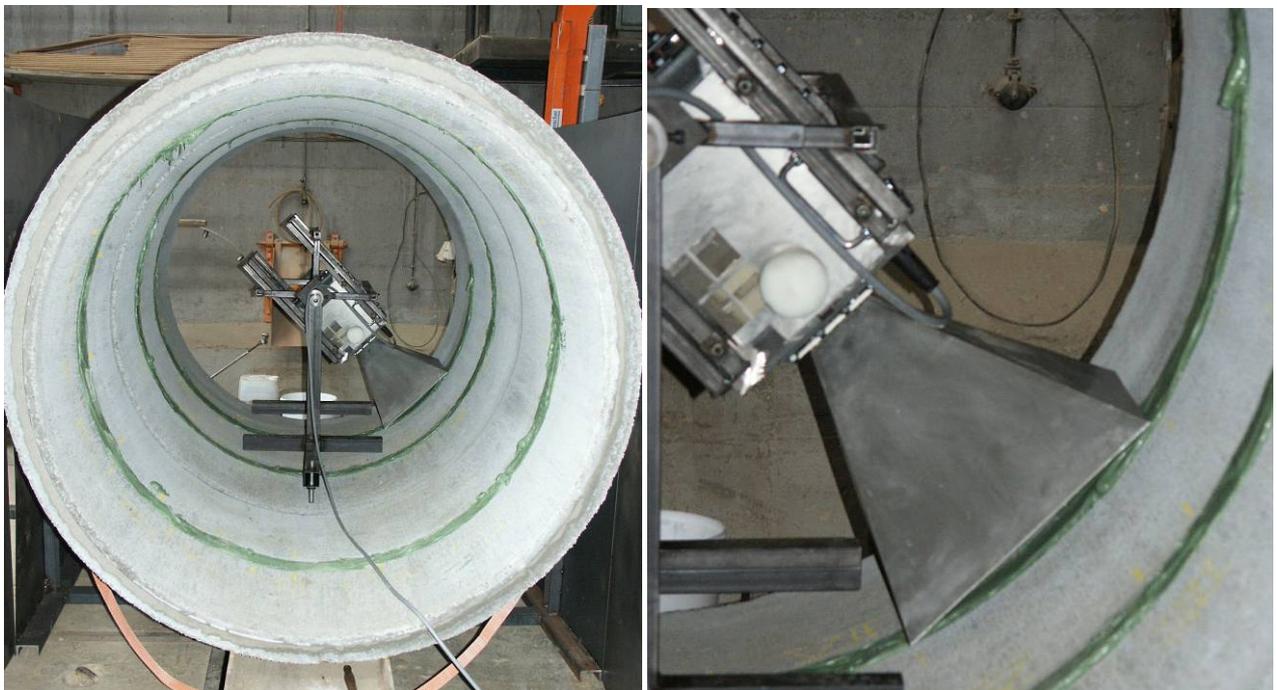


Abbildung 39: Modifizierter Mikrowellengenerator in drehbarer Führung

In der zweiten Versuchsreihe mit horizontal aufgebauten Fertigteilschachtringen DN 1500 wurde das Sanierungsmaterial wie zuvor beschrieben mit der Druckluftpistole eingebracht. Anschließend wurde es nach einer Wartezeit von etwa einer Stunde mit einem speziell für

diese Anwendung umgebauten Mikrowellengenerator erwärmt und dadurch zur Expansion gebracht.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Beschaffung des Mikrowellengenerators konnte mit dem Beginn der in situ nahen Versuche nicht bis zum Abschluss aller Vorversuche abgewartet werden. Daher wurden bei den ersten Fugen, parallel zu den Vorversuchen, mit verschiedenen Kombinationen nach der am besten geeigneten Kombination aus Leistung des Mikrowellengenerators, Größe der Hornantenne und ihrem Abstand von der zur erwärmenden Oberfläche gesucht. Mit allen gewählten Varianten konnte das Sanierungsmaterial erfolgreich zur Expansion gebracht werden. Es bestätigten sich die in den Vorversuchen gewonnen Erkenntnisse, dass mit der Kombination aus der mittelgroßen Hornantenne, mit einer Seitenlänge von 15 cm zu 37,5 cm, der Leistungsstufe 9 des Mikrowellengenerators und einem Abstand von etwa 5 cm von der Fuge die besten Ergebnisse erzielt wurden, so dass bei den weiteren Versuchen mit dieser Kombination gearbeitet wurde.

### 3.4 Sanierung von Hausanschlüssen

Die in situ nahe Erprobung der Sanierung von Hausanschlüssen vom Hauptkanal aus erfolgte mit einer modifizierten Form des bereits beschriebenen Versuchsaufbaus in den Versuchskästen. Für den Hauptkanal wurde dabei der Durchmesser DN 300 gewählt, wobei Rohre sowohl aus Steinzeug als auch aus Beton verwendet wurden. Die anzuschließenden Leitungen bestanden aus Kunststoffrohren in den Durchmessern DN 100 und DN 125. In Abbildung 40 ist der Versuchsaufbau bzw. der Einbau der Rohre dargestellt.



Abbildung 40: Versuchskästen zur Sanierung von Hausanschlüssen

Um das neu entwickelte Sanierungsmaterial einzubringen, wurden zwei verschiedene Arten erprobt. Zum einen kam der bereits beschriebene Sika-Sanierungsroboter zum Einsatz, zum anderen wurde mit einer Schalung und einem Roboter der Firma KA-TE gearbeitet. Mit dem Sika-Roboter wurde das Sanierungsmaterial verspachtelt, dabei wurde der Roboter in unveränderter Weise verwendet, wie bei den Sanierungen von Muffen und Rissen.

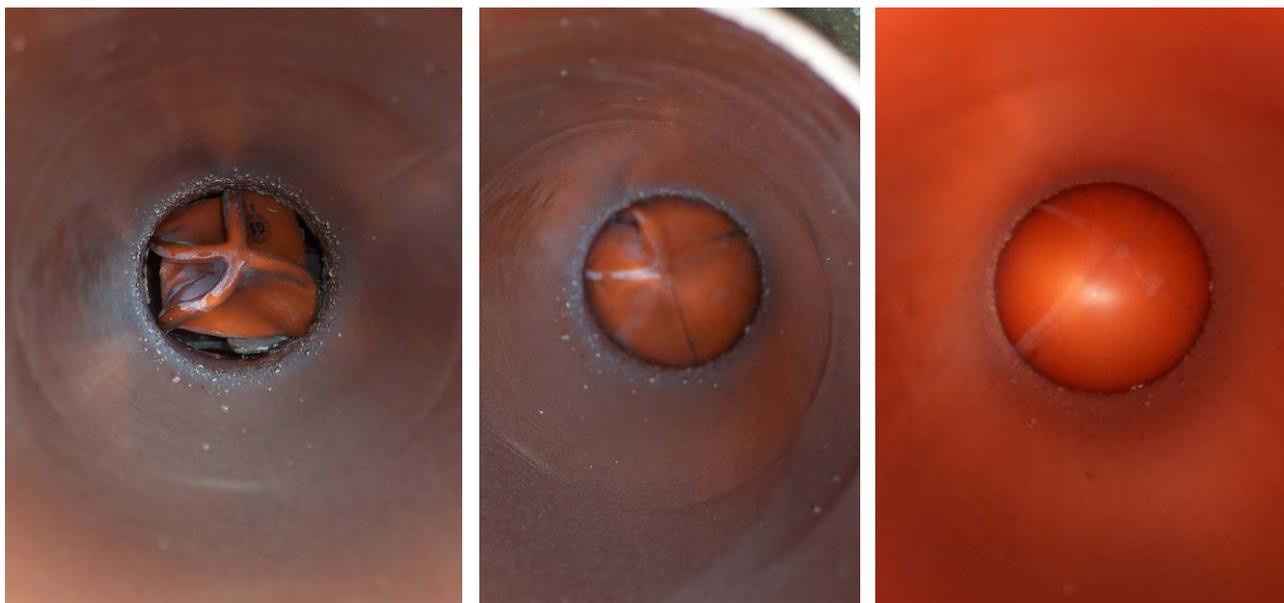


Abbildung 41: Absperrblase im Anschlusskanal

Für das Spachteln musste zuvor der Anschlusskanal mit einer Absperrblase versehen werden (Abbildung 41), um nach der Sanierung den vollen Querschnitt dieser Leitung zu gewährleisten. Dafür wurde am Sika-Roboter ein Aufsatz angebracht, mit dem die Absperrblase positioniert und aufgepumpt werden konnte (Abbildung 42). Diese Technik hat sich im Alltagsgeschäft bei der Sanierung von Hausanschlüssen bereits bewährt. Danach wurde der Roboter für den Spachtel Einsatz umgerüstet und das Sanierungsmaterial in der bereits bekannten Weise eingebracht.



Abbildung 42: Sika-Roboter mit Adapter zum setzen der Absperrblase

Nach dem Aushärten des Sanierungsmaterials wurden überstehendes Material sowie die Absperrblase, die nur für die einmalige Verwendung konstruiert ist, weggefräst. Dabei kam der bereits zuvor bei den Sanierungen in den nicht begehbaren Kanälen eingesetzte Fräsaufsatz für den Sika-Roboter zum Einsatz.



Abbildung 43: Sika-Roboter beim Fräsen

Bei der Versuchreihe mit dem KA-TE-Roboter mussten zunächst die in den Hauptkanal ragenden Anschlussleitungen abgefräst werden (Abbildung 44). Dieser Arbeitsschritt ist jedoch grundsätzlich unabhängig vom eingesetzten Verfahren, sondern vielmehr immer erforderlich, wenn Anschlussleitungen in den Hauptkanal ragen und damit potenzielle Abflusshindernisse bilden könnten. Unabhängig vom hier erforderlichen Fräsen ist beim Einsatz des KA-TE-Roboters verfahrensbedingt der erste Arbeitsschritt das Setzen einer Schalung. Diese besteht aus einer dem Durchmesser des Hauptkanals angepassten Kunststoffschale in die eine Öffnung für die Anschlussleitung integriert ist. Mit Hilfe eines Aufsatzmoduls für den KA-TE-Roboter (Abbildung 45) wurde die Schalung und im gleichen Arbeitsgang auch eine Absperrblase in der Anschlussleitung gesetzt (Abbildung 46).



Abbildung 44: Abfräsen der einragenden Anschlussleitung



Abbildung 45: KA-TE-Roboter mit Modul zum setzen der Schalung



Abbildung 46: Positionierung der Schalung samt Absperrblase

Nachdem die Schalung eingebaut war, wurde im nächsten Arbeitsschritt das Sanierungsmaterial eingebracht. Dazu wurde ein weiteres Anbaumodul am KA-TE-Roboter verwendet, das aus einem Vorratsbehälter und einem daran anschließenden Verpressschlauch mit einer auf die Einfüllöffnungen der Schalung abgestimmten Düse besteht. Die Düse wurde nacheinander in die zwei passgenauen Öffnungen der Schalung eingeführt (Abbildung 47) und es wurde jeweils so lange Sanierungsmaterial hinter die Schalung verpresst bis es an der anderen Öffnung wieder austrat. Im Anschluss wurden die Öffnungen durch davor angebrachte Schieber, die mit Hilfe der Düse verschoben wurden, verschlossen, so dass kein Sanierungsmaterial mehr austreten konnte.



Abbildung 47: Verpressen des Sanierungsmaterials

Nach der Aushärtung des Sanierungsmaterials wurde die Schalung mit dem gleichen Modul, mit dem sie zuvor eingebracht wurde, wieder ausgebaut (Abbildung 48). Bei diesem Arbeitsschritt wurde gleichzeitig auch die Absperrblase aus der Anschlussleitung entfernt.

Dazu wurde über das Ventil der Blase die Luft abgelassen und sie anschließend herausgezogen. Ein weiteres Nacharbeiten, etwa ein Planschleifen, war nicht erforderlich. Abbildung 49 zeigt exemplarisch das Resultat einer Sanierung mit einer Schalung und einem KA-TE-Roboter.



Abbildung 48: Ausbau der Schalung



Abbildung 49: Sanierung nach Entfernen der Schalung

### 3.5 Dichtungen in Bauwerken der Abwassertechnik

In diesem Teil des Forschungsvorhabens wurde geprüft, ob mit einem isotrop expandierbaren Dichtstoff auch Fugen in Abwasserbauwerken wie beispielsweise Kläranlagen zuverlässig abgedichtet werden können. Bei diesen Bauwerken werden bislang in der Regel plastische Kunststoffmassen verwendet, die sich im Laufe der Zeit aufgrund von Schwind- und Setzungsprozessen teilweise ablösen. Durch den Einsatz eines expandierbaren Dichtmaterials kann dies vermieden werden.

Für vertikale Fugen in Bauwerken der Abwassertechnik wurden keine weiteren Versuche durchgeführt, da sämtliche Anforderungen an die Gerätetechnik zum Einbringen des Dichtstoffs sowie die dafür erforderlichen Materialeigenschaften bereits bei den Versuchsreihen zur Sanierung von begehbaren Kanälen erfolgreich erprobt wurden. Um das entwickelte Sanierungsmaterial jedoch bei horizontalen Fugen einsetzen zu können, musste es zunächst modifiziert werden, da ein fließfähiges Material erreicht werden sollte, um damit eine einfache und zuverlässige Füllung der Fugen zu gewährleisten.



Abbildung 50: Gebinde gießfähiger Dichtstoff

Um einen Dichtstoff mit den zuvor dargestellten Eigenschaften zu erhalten, musste die Zusammensetzung der PUR-Komponente des bei den anderen Versuchen verwendeten Sanierungsmaterials geändert werden. Insbesondere waren Füllstoffe zu entfernen bzw. auszutauschen. Dadurch veränderte sich auch das Mischungsverhältnis mit dem Härter, wobei dieser weiterhin in unveränderter Rezeptur eingesetzt wurde. Die neue Rezeptur wurde von der Firma AIK so in einem Gebinde abgefüllt, dass sich dort oben der Härter befindet und darunter die PUR-Komponente. Die beiden Komponenten sind separat abgepackt, um eine vorzeitige Reaktion zu verhindern. Die zwischen den Komponenten befindliche Trennung enthält jedoch eine Sollbruchstelle, die durchstoßen werden kann, so dass der Härter in die PUR-Komponente läuft (Abbildung 50) und im unteren Teil des Behältnis-

ses das Material mit den bereits bekannten und erprobten Verfahren gemischt werden kann.



Abbildung 51: Betonrohre mit Längsfugen

Um den Dichtstoff zu testen, mussten geeignete Fugen geschaffen werden, die anschließend auch eine Dichtheitsprüfung ermöglichen. Die Versuche wurden daher an Betonrohren durchgeführt, in die auf der Unterseite in den Rohrfuß Längsfugen geschnitten wurden. Hier konnten Fugen unterschiedlicher Breiten (von 8 mm bis 20 mm) (Abbildung 51) und mit einer Tiefe von 130 mm hergestellt werden. Ferner wurde mit Beton der Werkstoff ausgewählt, der auch in der Praxis beim Bau von Abwasserbauwerken vornehmlich verwendet wird.

Zum Einbringen des Dichtstoffes wurde sowohl der Einsatz einer Druckluftpistole, als auch ein freies Ausfließen untersucht (Abbildung 52). Bei Fugenbreiten größer als 15 mm, was in der Regel auf Fugen in Abwasserbauwerken zutrifft, war das freie Ausfließen sehr gut möglich. Bei schmalen Fugen, insbesondere solchen mit einer Breite kleiner als 10 mm, stellte sich der Einsatz einer Druckluftpistole als zweckmäßiger heraus, da beim freien Ausfließen der Dichtstoff nicht in einen so feinen Strahl gebracht werden konnte, so dass immer ein Teil des Dichtstoffes neben die Fuge gelangte. Bei der Druckluftpistole konnte auf die bereits erprobten Geräte zurückgegriffen werden, lediglich die Größe der Abfüllplatte musste auf den Durchmesser der neuen Gebinde angepasst werden.



Abbildung 52: Einbringen des gießfähigen Dichtstoffs

Um die Versuche in der zuvor beschriebenen Weise durchführen zu können, musste mit einer Schalung gearbeitet werden, die die Fugen zum Rohrinne abdichtete (Abbildung 53). Diese Schalung war nur bei den Versuchen einzusetzen, in situ sind die Fugen nach unten durch andere Bauteile oder Erdreich begrenzt. Wie fließfähig der Dichtstoff ist zeigt Abbildung 54. Obwohl die Schalung augenscheinlich die Fuge abgedichtet hatte, reichten kleinste Fehlstellen, um den Dichtstoff ins Rohr fließen zu lassen. Dabei erfolgte das Einbringen ohne Druck nur mittels freiem Ausfließen aus dem Gebinde.



Abbildung 53: Schalung für den gießfähigen Dichtstoff



Abbildung 54: Durchgeflossener Dichtstoff

In der ersten Versuchsreihe wurde der Dichtstoff ohne Expansion erprobt, um zunächst die grundsätzliche Verarbeitbarkeit zu testen. Nachdem dies erfolgreich durchgeführt wurde, wurde der Dichtstoff in weiteren Versuchen mit der Mikrowelle zur Expansion gebracht (Abbildung 55). Dabei kam der gleiche Mikrowellenroboter zum Einsatz, der bereits bei der Erprobung des Sanierungsmaterials im nicht begehbaren Kanal eingesetzt wurde. In der Praxis könnte mit einer einfacheren Mikrowelleneinheit, ohne den Roboter gearbeitet wer-

den. Im Rahmen diese Forschungsvorhaben wurde aber aus Kostengründen auf den bereits vorhandenen Mikrowellenroboter zurück gegriffen.



Abbildung 55: Erwärmung des Dichtstoffs mittels Mikrowelle

Nach einer Wartezeit von zwei bis drei Stunden wurde der Dichtstoff mit dem Mikrowellenroboter zur Expansion gebracht. In Abbildung 55 ist deutlich die sehr starke Expansion nach einer Wartezeit von zwei Stunden zu erkennen. Daher wurde bei den weiteren Versuchen erst nach einer längeren Wartezeit mit der Mikrowellenbestrahlung begonnen. In einem Fall konnte sogar nach circa 72 Stunden noch eine – wenn auch nur geringe – Expansion erzielt werden.

## 4 Bewertung des Sanierungserfolges

Bei den durchgeführten in situ nahen Sanierungen wurden sowohl Versuchsreihen mit Expansion des Sanierungsmaterials bzw. des Dichtstoffs als auch ohne durchgeführt. In den Versuchsreihen zur Sanierung von Anschlussleitungen und von den Fugen in Schächten beruht die Dichtwirkung des Sanierungsmaterials ausschließlich auf Adhäsion.

### 4.1 Prüf- und Bewertungskriterien

Um die durchgeführten Sanierungen beurteilen zu können, mussten zunächst hierfür geeignete Kriterien festgelegt werden. Das erste Beurteilungskriterium war das optische Erscheinungsbild. Dabei wurde auf die folgenden Aspekte besonders geachtet:

- eine vollständige Füllung der Fugen bzw. der Schadstellen,
- ein fester Verbund mit dem Rohrmaterial,
- eine glatte Oberfläche.

Die vollständige Füllung der Fugen bzw. der Schadstellen konnte, solange die Rohre und Schächte im jeweiligen Versuch eingebaut waren, nur hinsichtlich der Breite kontrolliert werden. Die Fülltiefe konnte erst nach Beendigung des Versuches beurteilt werden, wenn die Schadstellen beim Ausbau der Rohre und Schächte freigelegt wurden.

Das wichtigste Kriterium zur Bewertung einer Sanierung liefert die Wasserdichtheitsprüfung. Das Dichtheitskriterium für die begehbaren und nicht begehbaren Kanäle ist nach DIN EN 1610 durch den maximal zulässigen Wasserverlust von  $0,15 \text{ l/m}^2$  Rohrinnefläche bei einer Prüfzeit von 30 Minuten definiert. Nach DIN EN 1610 ist der Prüfdruck am Rohrscheitel so einzustellen, dass er einer Wassersäule bis zur Geländeoberkante entspricht. Mindestens ist jedoch mit einem Druck von 100 mbar und höchstens mit einem Druck von 500 mbar zu prüfen.<sup>12</sup> Im Rahmen der Versuchsreihe mit dem Kanalroboter wurde als untere Grenze ein Druck von 200 mbar gewählt.

Die Auswertung der Dichtheitsprüfung wird entsprechend der folgenden Tabelle 1 vorgenommen.

---

<sup>12</sup> Vgl.: o.V., DIN EN 1610.

Tabelle 1: Dichtheitskriterien

Bewertung	Kriterium
dicht <sub>500</sub>	zulässigen Wasserverlust bei der Prüfung mit 500 mbar nicht überschritten
dicht <sub>200</sub>	zulässigen Wasserverlust bei der Prüfung mit 200 mbar nicht überschritten, bei der Prüfung mit 500 mbar überschritten
undicht	zulässigen Wasserverlust bei der Prüfung mit 200 mbar überschritten

Bei Dichtheitsprüfungen, die als dicht<sub>500</sub> bewertet wurden, wird der Prüfdruck anschließend schrittweise bis zum Versagen erhöht, so dass darüber hinaus die Bewertung „dicht“ nach DIN EN 1610 noch quantifiziert werden kann. Die Dichtheit wurde jeweils mit einem Prüfgerät der Firma Härke kontrolliert (Abbildung 56).



Abbildung 56: Dichtheitsprüfung mit Härke - Prüfgerät

Bei den Schächten wurde ebenfalls die Dichtheitsprüfung in Anlehnung an DIN EN 1610 als Bewertungsmaßstab herangezogen.<sup>13</sup> Der in der Norm geforderte Prüfdruck von mindestens 100 mbar und höchstens 500 mbar wurde bei einer Vollfüllung der Schächte mit Wasser erreicht. Hierbei wurde der Schacht zunächst gefüllt und für etwa 8 Stunden abgedeckt. Danach wurde der aufgetretene Wasserverlust bis zur markierten Füllhöhe ausgeglichen. Dies ist erforderlich, um auszuschließen, dass während der Prüfung Wasserverluste auftreten, die aus einer Wasseraufnahme der Betonringe resultieren. Bei der anschließenden Prüfung über einen Zeitraum von 30 Minuten beträgt die maximal zulässige Wasserzugabe 0,4 l/m<sup>2</sup> Innenwandfläche des Schachtes.

<sup>13</sup> Vgl.: o.V., DIN EN 1610.

## 4.2 Ergebnisse der Robotersanierung

Bei den Sanierungsergebnissen werden Beton- und Steinzeugrohre getrennt betrachtet. Ferner werden die Versuche aus dem ersten Teil des Forschungsvorhabens ohne Expansion getrennt von den Versuchen mit einer Expansion des Sanierungsmaterials aus dem zweiten Teil betrachtet. Die Ergebnisse der optischen Kontrolle beinhalten jeweils auch die beim Ausbau der Rohre gewonnenen Erkenntnisse.

### Betonrohre

Bei den durchgeführten Sanierungen wurden die Randbedingungen variiert. Der Feuchtigkeitsgrad wurde von „angefeuchtet“ bis „durchfließendes Wasser“ verändert. Die geometrischen Randbedingungen ließen sich jedoch bei den im ersten Teil des Forschungsvorhabens durchgeführten Versuchen nicht wie geplant festlegen, da die Betonfalzrohre große Maßtoleranzen aufweisen und sich Versätze und unterschiedliche Abstände der Rohrenden zwangsläufig ergaben.

Die optische Kontrolle der ohne Expansion sanierten 6 Betonmuffen ergab in allen Fällen, dass die Fugen vollständig gefüllt waren und nach dem Fräsen eine glatte Oberfläche erzielt wurde. Zwischen dem Sanierungsmaterial und den Betonrohren wurde ein fester Verbund hergestellt, so dass sich die Betonrohre beim Ausbau nur mit hohem Kraftaufwand wieder trennen ließen.

Die maximal zulässige Wasserzugabe für die an den Betonrohrverbindungen durchgeführten Dichtheitsprüfungen errechnete sich zu 0,141 l bezogen auf eine Prüfzeit von 30 min. Keine der Sanierungen ohne Expansion konnte als  $\text{dicht}_{500}$  und nur eine als  $\text{dicht}_{200}$  bewertet werden. Dies ist aber nicht zwingend auf eine nicht erfolgreiche Sanierung zurückzuführen, da durch Referenzmessungen festgestellt wurde, dass die verwendeten Rohre selbst nicht den Dichtheitsanforderungen entsprachen. Daher wurden im Rahmen der Versuche mit dem Mikrowellenroboter im zweiten Teil des Forschungsvorhabens Versuche mit Betonrohren durchgeführt, die den höheren Anforderungen der FBS<sup>14</sup> entsprachen und dementsprechend „dicht“ waren.

Im Rahmen der Versuche mit einer Expansion des Sanierungsmaterials wurden insgesamt 9 Muffen an Betonrohren saniert. Davon befanden sich 5 Muffen in der zum Abschluss der Versuchsreihe hergestellten Teststrecke in der Versuchsbahn des ibb. Die vier zuvor sanierten Muffen wurden jeweils in den Versuchskästen hergestellt. Abgesehen von den ersten beiden Muffen in den Stahlkästen wurde an den übrigen nach bestandener Dichtheitsprüfung ( $\text{dicht}_{500}$ ) eine Hochdruckspülung vorgenommen, um sie dann erneut zu prüfen.

---

<sup>14</sup> FBS: Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V.

Die Teststrecke wurde nicht als Ganzes, sondern jede Muffe wurde einzeln geprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 57 dargestellt.

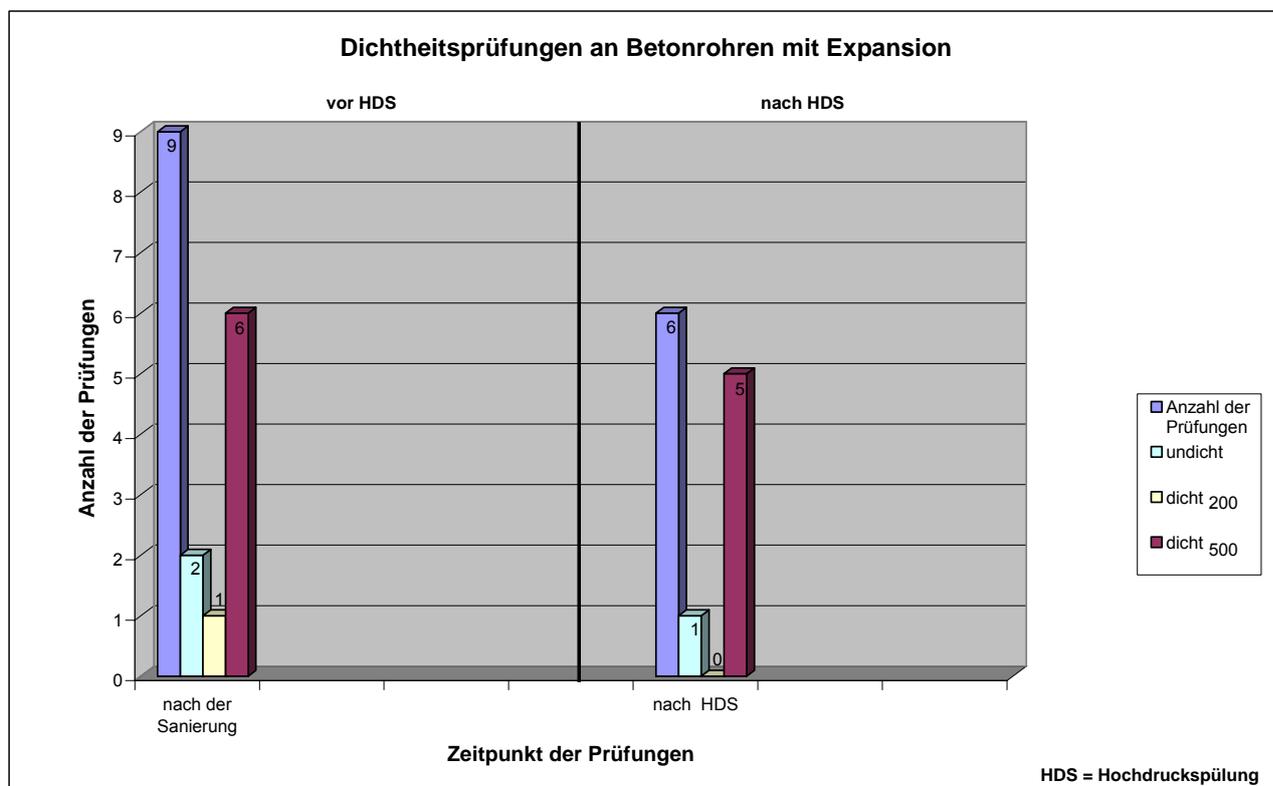


Abbildung 57: Ergebnis der Dichtheitsprüfung an Betonrohren mit Expansion des Sanierungsmaterials

Bei den zwei nach der Sanierung undichten Muffen handelt es sich zum einen um die erste mit Expansion des Sanierungsmaterials hergestellte Muffe und zum anderen um eine Muffe innerhalb der Teststrecke (Abbildung 59). Als Ursache konnte jeweils eine nur unvollständige Füllung des Muffenspalt mit dem Sanierungsmaterial ausgemacht werden (Abbildung 58). Dies resultierte bei der ersten Muffe aus einer Sandablagerung im Sohlbereich der Rohrverbindung, so dass keine ausreichende Tiefe für das Sanierungsmaterial vorhanden war. Durch vorheriges Ausfräsen der Muffe, wie es in der Praxis vor einer Sanierung durchgeführt wird, hätte dies vermieden werden können. Auch bei der zweiten undichten Muffe lag der Fehler bereits beim Einbringen des Sanierungsmaterials. Hier hatte die Aushärtungsreaktion des Sanierungsmaterials bereits begonnen, so dass es eine deutlich höhere Viskosität erreicht hatte. Dadurch war die Fließfähigkeit soweit reduziert, dass nicht mehr der komplette Muffenspalt in ausreichender Tiefe ausgefüllt wurde, sondern lediglich oberflächlich.



Abbildung 58: Muffenspalt mit Fehlstelle im Sohlbereich



Abbildung 59: Undichte Muffe bei Betonrohren

Die zunächst noch das Kriterium  $dicht_{200}$  erfüllende Muffe war bei der erneuten Dichtheitsprüfung nach der HDS ebenfalls als undicht zu bewerten. Auch diese Verbindung befand sich in der Teststrecke und als Ursache kann hier ebenfalls von einem bereits zu viskosem Sanierungsmaterial ausgegangen werden. Solche Fehler beim Einbringen des Sanierungsmaterials sollten nach einer Einarbeitungszeit des Bedieners des Sanierungsroboters nicht mehr auftreten. Bei der Teststrecke kam allerdings ein werksneuer Sanierungsroboter zum Einsatz, für den der Bediener erst noch entsprechende Erfahrungswerte sammeln musste.

Im Übrigen ist den Ergebnissen der Dichtheitsprüfung zu entnehmen, dass mit dem expandierten Sanierungsmaterial erfolgreich undichte Muffen saniert werden können und eine HDS bei vollständig ausgefülltem Muffenspalt keine negative Auswirkung auf die Dichtheit hat. Zwei Muffen waren sogar noch bei einem Prüfdruck von 800 mbar dicht. Höhere Drücke konnten aufgrund des Verschiebens der Absperrblasen nicht eingestellt werden.

### Steinzeugrohre

Bei den an Steinzeugrohren durchgeführten Sanierungen wurde der Ringspalt in der Muffe zwischen 2 mm und 20 mm variiert. Zusätzlich wurde je ein Quer- und Längsriss im Scheitelbereich saniert. Bei den Rissen wurde gegen drückendes Wasser gearbeitet, während der Feuchtigkeitsgrad bei den übrigen Versuchen von angefeuchtet bis zur Sanierung bei durchfließendem Wasser verändert wurde.

Das Ergebnis der optischen Kontrollen ergab, dass in allen Fällen zwischen dem Sanierungsmaterial und den Steinzeugrohren ein fester Verbund hergestellt wurde, nach dem Fräsen glatte Oberflächen erreicht wurden und bis auf einen Fall alle Fugen vollständig gefüllt waren. Bei der beanstandeten Muffe handelte es sich um eine von zweien mit einem Ringspalt von lediglich 2 mm. Der etwa 300 mm lange und 10 mm breite Längsriss konnte nicht saniert werden, da das Sanierungsmaterial von dem drückenden Wasser wieder heraus gespült wurde.

In der Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen von Sanierungen an einem Riss und 9 Muffen vor sowie 5 Muffen nach einer bzw. zwei Hochdruckspülungen (HDS) dargestellt. Bei diesen Versuchen wurde das Sanierungsmaterial nicht zur Expansion gebracht. Von den Muffen wurden jeweils 5 zusammen durch eine Dichtheitsprüfung des gesamten Stranges und die übrigen sowie der Riss durch Einzelprüfungen getestet. Bei der Prüfung nach der ersten HDS war eine der äußeren Muffen sichtbar undicht. Nach der zweiten HDS wurden nur noch die zuvor als dicht<sub>500</sub> bewerteten 4 Muffen zusammen geprüft.

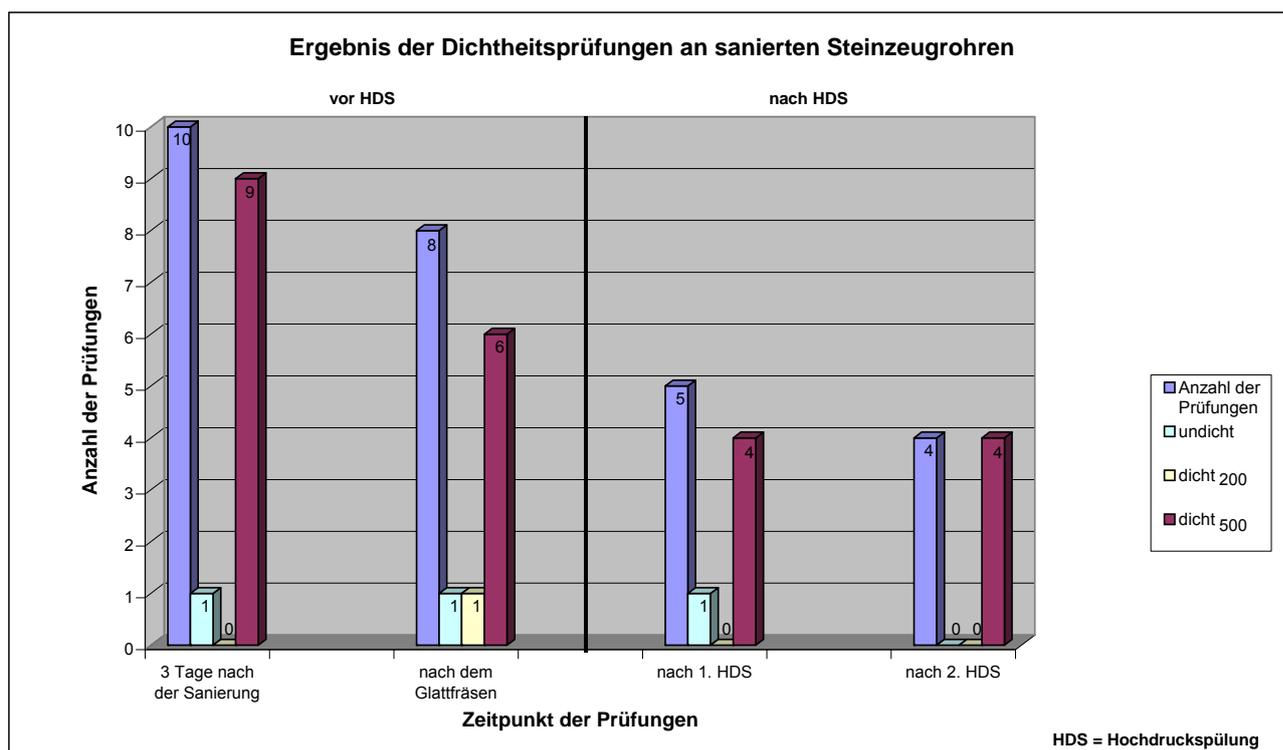


Abbildung 60: Übersicht über die Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen an mit dem Kanalroboter sanierten Steinzeugrohren DN 300

Insgesamt waren 2 Sanierungen undicht und zwar die schon bei der optischen Kontrolle beanstandete Muffe mit einem Ringspalt von 2 mm sowie eine Muffe des Rohrstranges mit einem Ringspalt von 20 mm. Letztere war jedoch nach der Sanierung zunächst dicht und erst nach den Fräsarbeiten undicht. Auf den sanierten Querriss wirkte sich der Einsatz des

Fräsroboters ebenfalls negativ aus, so dass anschließend der Wasserverlust den zulässigen Grenzwert leicht überschritt und die Sanierung nur noch als dicht<sub>200</sub> bewertet werden konnte. Die bei 3 Einzelprüfungen durchgeführte Erhöhung des Prüfdrucks ergab, dass die Abdichtung in 2 Fällen bei 700 mbar und im dritten Fall bei 800 mbar versagte.

Nachdem der Mikrowellenroboter fertig gestellt wurde, konnten im zweiten Teil des Forschungsvorhabens insgesamt 10 Muffen an Steinzeugrohren mit einer Expansion des Sanierungsmaterials getestet werden. Wie bei den Betonrohren wurden zunächst 4 Muffen in den Stahlkästen und abschließend eine Teststrecke in der Versuchsbahn des ibb saniert. Die Muffen der Teststrecke sowie die beiden der zweiten Versuchsreihe in den Stahlkästen wurden nach einer erfolgreichen ersten Dichtheitsprüfung und einer HDS nochmals geprüft. Die Ergebnisse stellt Abbildung 61 dar.

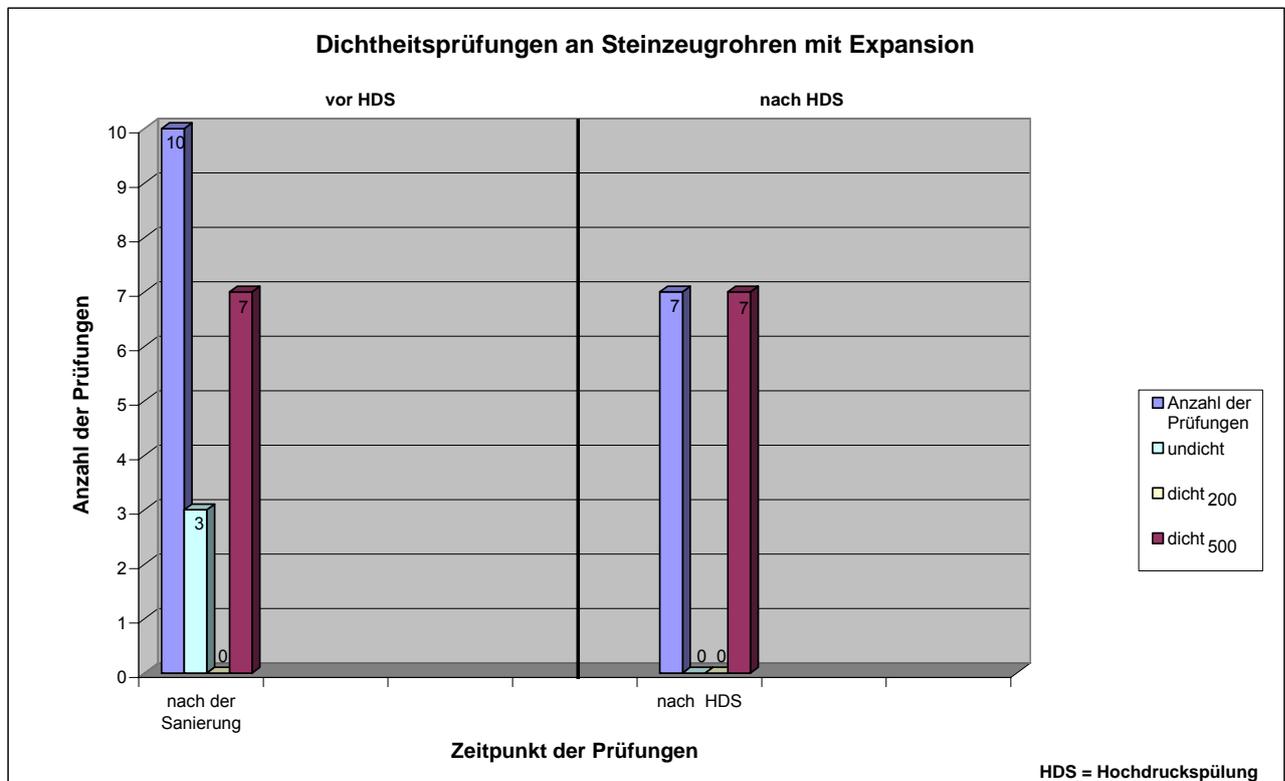


Abbildung 61: Ergebnis der Dichtheitsprüfung an Steinzeugrohren mit Expansion des Sanierungsmaterials

Die beiden zuerst sanierten Muffen sowie eine Muffe aus dem Rohrstrang erfüllten die Dichtheitskriterien nicht. Ursache war jeweils eine unzureichende Füllung des Muffenspalt mit Sanierungsmaterial, wie bei den optischen Kontrollen beim Ausbau der jeweiligen Versuche festgestellt wurde. In Abbildung 62 ist zu erkennen, dass zwar der Scheitelbereich gut mit Sanierungsmaterial ausgefüllt wurde, in der Sohle jedoch nur eine 1 bis 2 mm dicke Schicht erreicht wurde, die sich nach der Expansion abgelöst hat. Wie bei den Versuchen an den Betonrohren war auch hier der Muffenspalt im Sohlbereich mit Sand gefüllt,

so dass durch ein Fräsen vor der Sanierung das Problem hätte vermieden werden können.

An den Ergebnissen der Dichtheitsprüfung ist weiterhin zu erkennen, dass eine HDS keinen negativen Einfluss auf die Dichtheit hatte. Abbildung 63 zeigt exemplarisch einen vollständig ausgefüllten Muffenspalt, wie er bei den übrigen, dichten Muffen in der Regel vorgefunden wurde. Die hellen „Punkte“ in dem Sanierungsmaterial sind die verwendeten Abstandhalter aus Holz, um eine definierte Breite des Muffenspaltres zu erreichen. Diese sind vom Sanierungsmaterial eingeschlossen.



Abbildung 62: Unzureichend mit Sanierungsmaterial ausgefüllter Muffenspalt (Sohle)



Abbildung 63: Vollständig ausgefüllter Muffenspalt

### 4.3 Ergebnisse der Sanierung von Schächten

Die optische Kontrolle der neun, etwa 10 mm breiten Fugen zwischen den Fertigteil-schachtringen DN 1000 ergab, dass die Fugen vollständig gefüllt waren und ein fester Verbund hergestellt wurde. Die Schachtringe kommen nicht mit durchfließendem Abwasser in Kontakt, so dass die Anforderungen an die Oberfläche der sanierten Fugen nicht so hoch wie im Kanal sind. Die Fugen brauchen daher nicht durch Fräsen oder Schleifen nachbearbeitet werden.

Zur Vorbereitung der Wasserdichtheitsprüfung wurde eine Probebefüllung im Bereich der zwei untersten Fugen durchgeführt. Dabei wurde zunächst der Schacht bis ca. 50 mm oberhalb der untersten Fuge mit Wasser befüllt. Nachdem nach einer Wartezeit von ca. 2 Stunden keine Undichtigkeit festgestellt wurde, wurde der Wasserstand bis zu einer Füllhöhe von ca. 50 mm oberhalb der zweiten Fuge erhöht. Bei diesem Wasserstand trat an einer Stelle im Bereich der untersten Fuge Wasser aus. Eine Untersuchung nach Abpumpen des Wassers ergab, dass in der Schachtringwandung ein kleiner Riss vorhanden war, der möglicherweise für den Wasseraustritt verantwortlich war. Um durch die Betonschachtringe bedingte Undichtigkeiten auszuschließen, wurden die bereits eingebauten, wie auch alle weiteren Schachtringe mit einem zweikomponentigen Anstrich auf Zementbasis wasserdicht beschichtet.

Für die Wasserdichtheitsprüfung wurde das fertig gestellte Schachtbauwerk schrittweise bis zur Oberkante befüllt. Damit wirkte auf die oberste Fuge der von der DIN EN 1610 geforderte Mindestwasserdruck von 100 mbar. Entsprechend der Bauhöhe der Fertigteil-schachtringe nahm der auf die weiteren Fugen wirkende Wasserdruck um 1 mbar pro cm zu, so dass auf der untersten Fuge ein Druck von 400 mbar wirkte. Nach Füllung des Schachtbauwerks bis zur Oberkante wurde eine Nacht als Vorbereitungszeit gewartet und der aufgetretene Wasserverlust ausgeglichen, bevor die eigentliche Dichtheitsprüfung durchgeführt wurde. Entsprechend den Anforderungen der DIN EN 1610 wurde der Wasserverlust in einer Prüfzeit von 30 Minuten bestimmt. Dazu wurde das Absinken des Wasserpegels gemessen und über die bekannte Größe der Fertig-



Abbildung 64: Saniertes Versuchsschachtbauwerk mit 9 Fugen

teilschachtringe die Wasserverlustmenge errechnet. Ein Fallen des Wasserspiegels um einen Millimeter entsprach einer Wassermenge von 785 ml. Innerhalb der 30 minütigen Prüfzeit wurde ein Absinken des Wasserpegels von weniger als einem Millimeter gemessen, so dass der Wasserverlust auf der sicheren Seite liegend mit 785 ml abgeschätzt wurde.

Nach DIN EN 1610 sind die Anforderungen an eine Wasserdichtheitsprüfung für Schächte erfüllt, wenn die innerhalb der Prüfzeit auszugleichende Wassermenge nicht mehr als  $0,40 \text{ l/m}^2$  benetzter innerer Oberfläche beträgt. Für das Versuchsschachtbauwerk aus Fertigteilschachtringen DN 1000 mit einer Gesamthöhe von 4,10 m errechnet sich daraus eine maximal zulässige Wasserzugabemenge von 5,152 l. Da die ermittelte Wasserzugabemenge mit 785 ml nur etwa 15% davon betrug, wurde das sanierte Versuchsschachtbauwerk gemäß DIN EN 1610 als dicht bewertet, so dass das Abdichten der 9 Fugen mit dem zweikomponentigen PUR-Sanierungsmaterial erfolgreich war.

#### 4.4 Ergebnisse der Sanierung von begehbaren Kanalrohren

Zur Simulation von begehbaren Kanälen wurden vertikal gelagerte Betonfertigteilschachtringe DN 1500 verwendet. Die Fugenbreiten der Rohrverbindungen wurden von ca. 5 mm bis ca. 20 mm variiert. In der ersten Versuchsreihe wurden von den 5 Rohrverbindungen 4 vor dem Einbringen des Sanierungsmaterials angefeuchtet, während die erste Sanierung an trockenen Schachtringen durchgeführt wurde.

Bei drei von den fünf zunächst durchgeführten Sanierungen konnte das Sanierungsmaterial ohne unterstützende Schalung erfolgreich eingebracht werden. Eine erste optische Kontrolle ergab, dass die Fugen vollständig gefüllt waren und ein fester Verbund hergestellt wurde. Da das Sanierungsmaterial durch die Druckluftpistole mit Verpressschuh eingebracht wurde, musste die Fugenoberfläche noch nachgearbeitet werden, um eine glatte Oberfläche und damit die Vermeidung von Abflusshindernissen sicherzustellen. Im Rahmen der Versuchsreihe stellte sich als das am besten geeignete Nachbearbeitungsverfahren ein Abschleifen mit beispielsweise einem Winkelschleifer heraus. Im Einzelfall wurden besonders starke, überschüssige Materialwülste vorab mit Hilfe eines Handgeräts der Firma Fein entfernt.

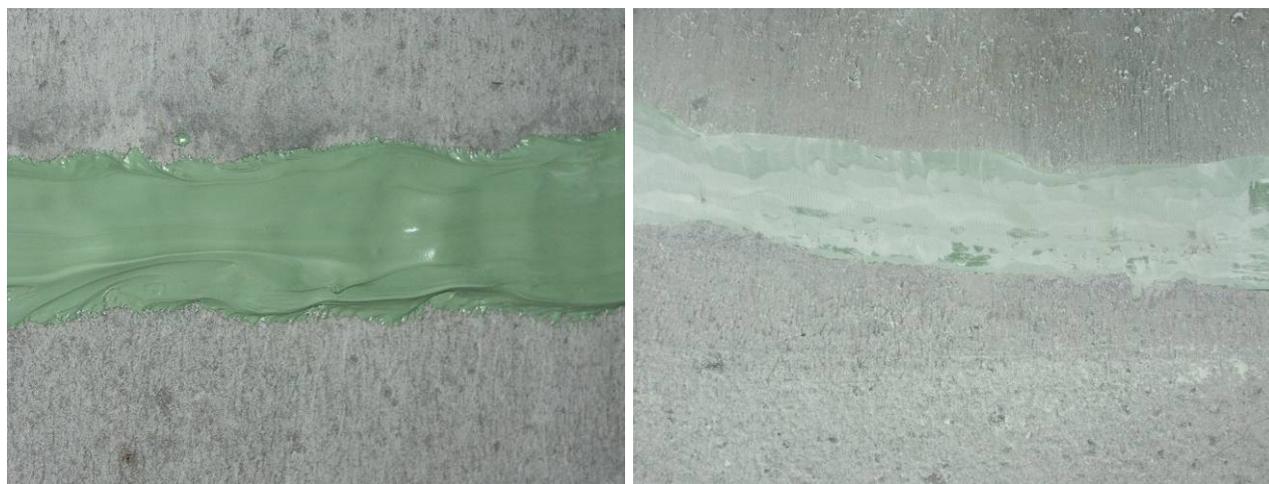


Abbildung 65: Sanierte Rohrverbindung, vor (links) und nach (rechts) der Nachbehandlung durch Abschleifen



Abbildung 66: Muffenprüfgerät DN 1500

Zur Vorbereitung der entsprechend DIN EN 1610 mit Wasser als Prüfmedium durchgeführten Dichtheitsprüfungen wurden die Betonschachtringe vorgehäst. Dadurch sowie durch eine angemessene Wartezeit wurde verhindert, dass die Versuchsergebnisse während der Prüfung durch Wasserverluste aufgrund der Wasseraufnahme des Betons beeinflusst worden wären. Die sanierten Rohrverbindungen wurden einzeln nacheinander mit einem Muffenprüfgerät (Abbildung 66) getestet. Begonnen wurde dabei jeweils mit einem auf den Rohrscheitel bezogenen Prüfdruck von 100 mbar, der nach bestandener Prüfung in 100 mbar-Schritten bis auf maximal 500 mbar gesteigert wurde. Entsprechend DIN EN 1610 ist die Prüfung bestanden, wenn die Wasserzugabemenge innerhalb der 30 minütigen Prüfdauer nicht größer als  $0,15 \text{ l/m}^2$  der benetzten inneren Oberfläche ist. Daraus resultiert für die hier einzeln geprüften Verbindungen DN 1500 eine maximal zulässige Wasserzugabemenge von  $0,707 \text{ l}$ .

In Abbildung 67 sind die Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen an den fünf Rohrverbindungen dargestellt. Zwei sanierte Rohrverbindungen waren als undicht zu bewerten. Dabei trat in einem Fall das Wasser jedoch sichtbar aus einem Riss im Rohrmaterial aus, so dass die Undichtigkeit eindeutig auf das fehlerhafte Rohr zurückzuführen war und die Prüfung damit nicht im Sinne der Versuchsreihe bewertbar war. Die übrigen Verbindungen bestanden die Prüfungen mit 100 mbar bis 300 mbar. Bei der weiteren Erhöhung der Prüfdrücke lag der gemessene Wasserverlust dann jeweils bei einer der sanierten Verbindungen über dem zulässigen Grenzwert.

**Ergebnis Dichtheitsprüfung (ohne Expansion)**

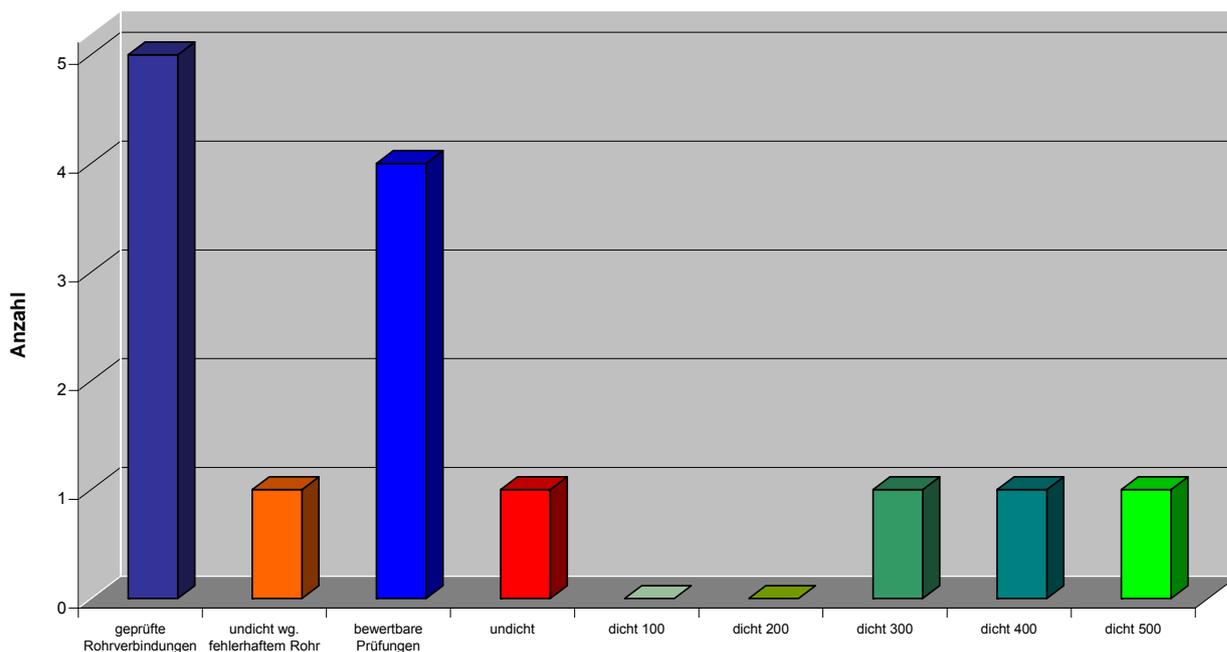


Abbildung 67: Ergebnis der Dichtheitsprüfungen DN 1500 (ohne Expansion)

Bei der zweiten Versuchsreihe zur Simulation begehrbarer Kanäle wurde das Sanierungsmaterial nach dem Einbringen mit dem Mikrowellengenerator erwärmt und zur Expansion gebracht. Die Dichtheit der vier sanierten Rohrverbindungen wurde ebenfalls, wie zuvor beschrieben, nach DIN EN 1610 geprüft.

**Ergebnis Dichtheitsprüfung (expandiert mit MW)**

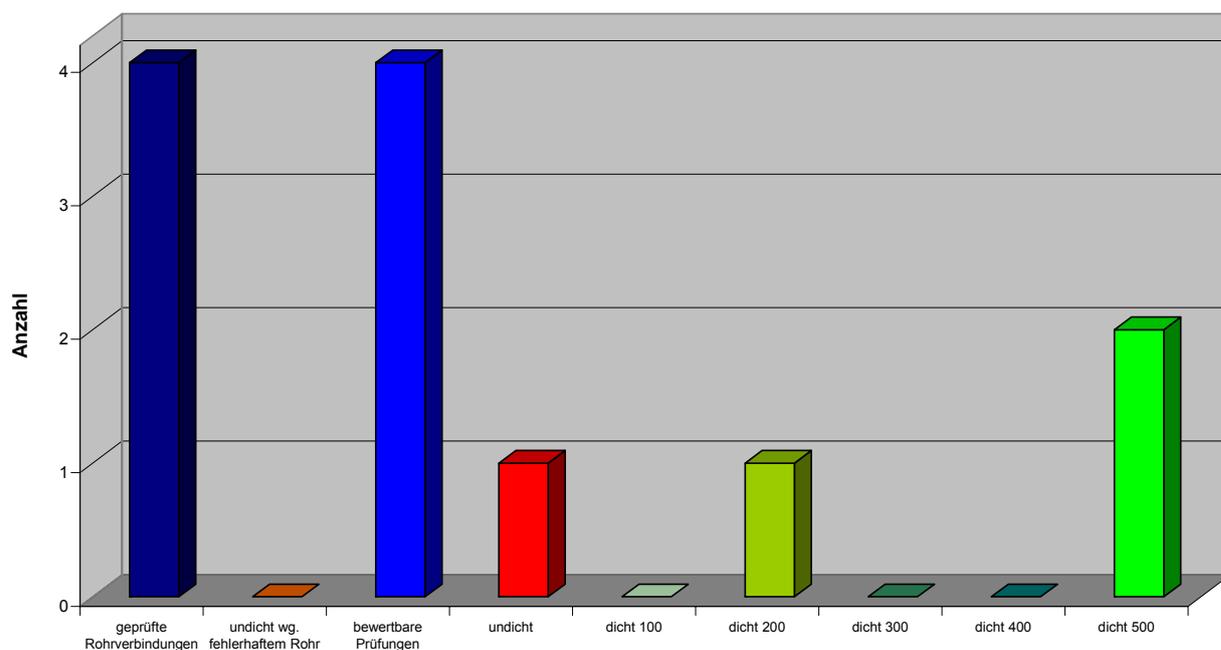


Abbildung 68: Ergebnis der Dichtheitsprüfungen DN 1500 (mit Expansion)

Bei dieser Versuchsreihe wurde vor der Versuchsdurchführung eine wasserundurchlässige Zementschlämme auf die Schachtringe aufgebracht, um durch fehlerhaftes Rohrmaterial hervorgerufene Undichtigkeiten zu vermeiden. Dem in Abbildung 34 dargestellten Ergebnis der Dichtheitsprüfungen ist zu entnehmen, dass eine Rohrverbindung undicht war, eine weitere bei einem Prüfdruck von mehr als 200 mbar versagte und zwei einem Prüfdruck von 500 mbar widerstanden.

Der Vergleich mit den Ergebnissen der Dichtheitsprüfungen der Versuchsreihe ohne Expansion zeigt zwar, dass bei den expandierten Dichtstoffen ein signifikant besseres Ergebnis erzielt wird, aber dennoch auch hiermit nicht alle Rohrverbindungen dem maximalen Prüfdruck von 500 mbar standhalten. Dieses unbefriedigende Ergebnis relativiert sich allerdings, wenn die Umstände der Sanierungen genauer betrachtet werden. Bei der undichten Muffe handelt es sich um die erste der vier ausgeführten Sanierungen, bei der naturgemäß auch die Erfahrungen und Fertigkeiten mit dem Umgang der neuen Dichtstoffe noch nicht vorliegen. Bei der über 200 mbar undichten Rohrverbindung wurde festgestellt, dass die eingebrachte Materialmenge zu gering war und daher nur teilweise der Muffenspalt verfüllt war.

Zudem zeigte sich bei den als  $\text{dicht}_{500}$  bewerteten Rohrverbindungen, dass nicht nur der zulässige Grenzwert eingehalten wurde, sondern dass, im Unterschied zur Versuchsreihe ohne Expansion, gar keine Wasserverluste eintraten.

## 4.5 Ergebnisse der Sanierung von Hausanschlüssen

Im Rahmen der Versuche zur Sanierung von Hausanschlüssen wurden insgesamt 12 Anschlüsse hergestellt. Davon wurden vier mit dem Sika-Roboter durch spachteln sowie acht mit einem KA-TE-Roboter und dem Einsatz einer Schalung saniert. Die Versuche wurden jeweils zur Hälfte mit Steinzeug- und Betonrohren als Rohrwerkstoff des Hauptkanals durchgeführt. Beim Prüfen der Dichtheit stellten sich die glatten Innenflächen der Kunststoffrohre als problematisch heraus, da hier die Absperrblasen immer wieder verrutschten. Sie mussten daher mechanisch gesichert werden.

Bei der ersten Versuchsreihe mit dem Sika-Roboter erfüllten drei der vier Sanierungen das Dichtheitskriterium  $\text{dicht}_{500}$ . Die Ursache für den als undicht zu bewertenden Versuch ist in Abbildung 69 deutlich zu erkennen. Das Kunststoffrohr lag auf einer Seite direkt an dem Betonrohr an, so dass kein Ringraum für das Sanierungsmaterial vorhanden war. Bei einer optischen Kontrolle mittels Kamerabefahrung vor der Sanierung, wie sie in der Praxis vorgenommen wird, hätte dies erkannt werden können und durch einen Fräsroboter hätte ein entsprechend ausreichender Ringraum geschaffen werden können.



Abbildung 69: Undichter Hausanschluss

Bei den ersten vier Sanierungen mit dem KA-TE-Roboter und einer Schalung konnten die beiden Versuche mit Steinzeugrohren nicht erfolgreich abgedichtet werden. In beiden Fällen wurde der Ringspalt um das Kunststoffrohr nicht vollständig mit Sanierungsmaterial geschlossen (Abbildung 70). Da dies die ersten Versuche mit dem neu entwickelten Material und der entsprechenden Verfahrenstechnik waren, fehlten dem Bediener Erfahrungswerte, so dass die Sanierungen zu früh bzw. bei einem noch zu geringen Gegendruck beendet wurden. Die beiden Versuche mit Betonrohren erfüllten das Kriterium  $\text{dicht}_{500}$ .

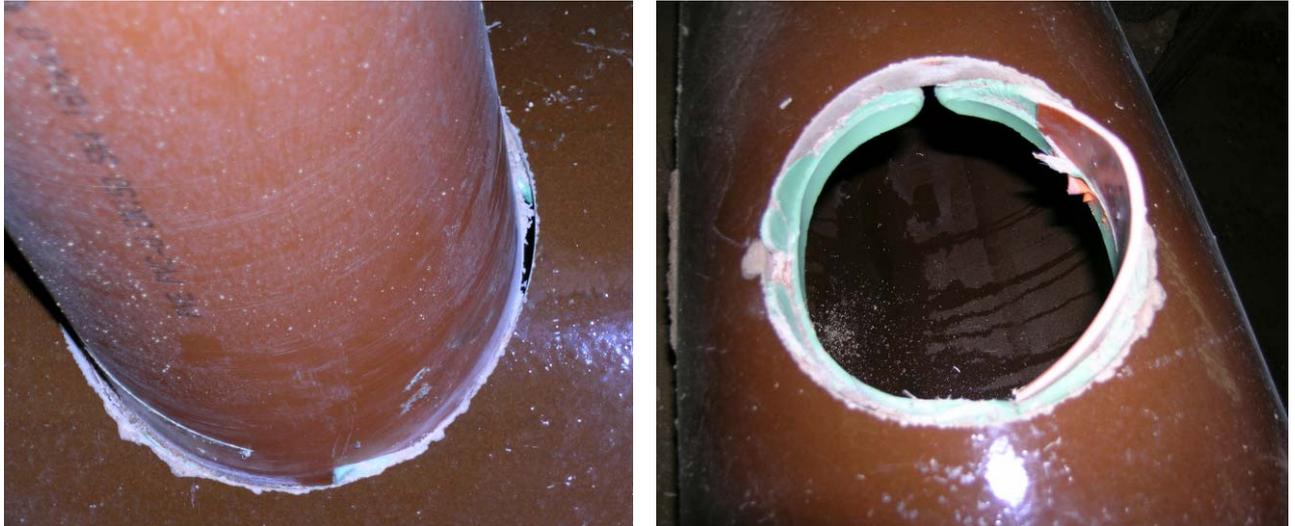


Abbildung 70: Unvollständig gefüllter Fugenspalt

In der zweiten Versuchsreihe erfüllten sowohl die Anschlüsse an Beton- als auch an Steinzeugrohren das Dichtheitskriterium  $\text{dicht}_{500}$ . Abschließend lässt sich festhalten, dass bei einer vollständigen Füllung des Ringspaltens um das anzuschließende Rohr zuverlässig mit dem Sanierungsmaterial und der erprobten Verfahrenstechnik saniert werden kann. Um dies zu gewährleisten ist ein Ringraum von mindestens 5 mm, besser 10 mm erforderlich, der ggf. durch Einsatz eines Fräsroboters vor der Sanierung herzustellen ist. Weiterhin benötigt der Bediener des Sanierungsroboters etwas Erfahrung im Umgang mit dem Sanierungsmaterial.

## 4.6 Ergebnisse zu Dichtungen in Bauwerken der Abwassertechnik

Die mit dem modifizierten Dichtstoff abgedichteten Längsfugen in den Betonrohren wurden, wie die Versuchsreihen an den nicht begehbaren Kanalrohren, einer Dichtheitsprüfung mit Hilfe des bereits beschriebenen Prüfgerätes der Firma Härke unterzogen (Abbildung 71). Hierzu wurde jeweils vor und hinter dem zu prüfenden Rohr ein weiteres angebracht. Dieser Rohrstrang musste durch einen Spannungsgurt gesichert werden, da ansonsten der im Inneren aufgebaute Prüfdruck zu einem Auseinanderrutschen der Rohre führte. Bei dieser Prüfanordnung hätte eventuell austretendes Wasser direkt festgestellt werden können.



Abbildung 71: Dichtheitsprüfung an Längsfuge

Innerhalb der ersten Versuchsreihe wurden drei Längsfugen ohne Expansion des Dichtstoffes abgedichtet. Alle erfüllten die Anforderungen  $dicht_{500}$  und darüber hinaus mussten die Dichtheitsprüfungen bei 800 mbar abgebrochen werden, da die Absperrblasen verrutschten. Weiterhin waren die Fugen vollständig gefüllt und der Dichtstoff haftete sehr gut, so dass der Dichtstoff nur schwer sowie in einem Fall überhaupt nicht aus den Fugen entfernt werden konnte.

Im zweiten Schritt wurde der Dichtstoff mit dem Mikrowellenroboter zur Expansion gebracht. Bei der anschließenden Dichtheitsprüfung erfüllten auch diese das Kriterium  $dicht_{500}$ . Abbildung 72 zeigt eine Kernbohrung durch eine abgedichtete und expandierte Fuge. An den Farbunterschieden ist zu erkennen, dass der Dichtstoff bis in eine Tiefe von circa 42 mm zur Expansion gebracht werden konnte.



Abbildung 72: Kernbohrung durch eine Fuge mit expandiertem Dichtstoff

## 5 Materialkennwerte

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen zur Druckfestigkeit, zum E-Modul sowie zur Haftzugfestigkeit des Sanierungsmaterials durchgeführt. Die Prüfungen zur Ermittlung dieser Materialkennwerte wurden auf einer Zwick Materialprüfmaschine durchgeführt mit der Zug, Druck und Torsionsmessungen mit einer maximalen Kraft von 100 kN möglich sind.

### 5.1 Druckfestigkeit

Die Probekörper für die Druckfestigkeitsversuche wurden in einer rechteckigen Schalung (40 mm x 40 mm x 160 mm) mit planparallelen Oberflächen hergestellt. Aus einer Schalung wurden dann jeweils zwei etwa 80 mm lange Probekörper gewonnen. Ebenso wurden die Probekörper hergestellt, die zur Expansion gebracht wurden, wobei vor der Erwärmung durch den Mikrowellengenerator die seitlichen Schalungen voneinander gelöst oder ganz entfernt wurden. In einer ersten Versuchsreihe wurden die Probekörper kraftgesteuert mit einer Kraft von 250 N/min um 12,5% bzw. 25%, bezogen auf ihre Ausgangsdicke, gestaucht. In Abbildung 35 ist ein weitgehend linearer Spannungs-Dehnungsverlauf zu erkennen.

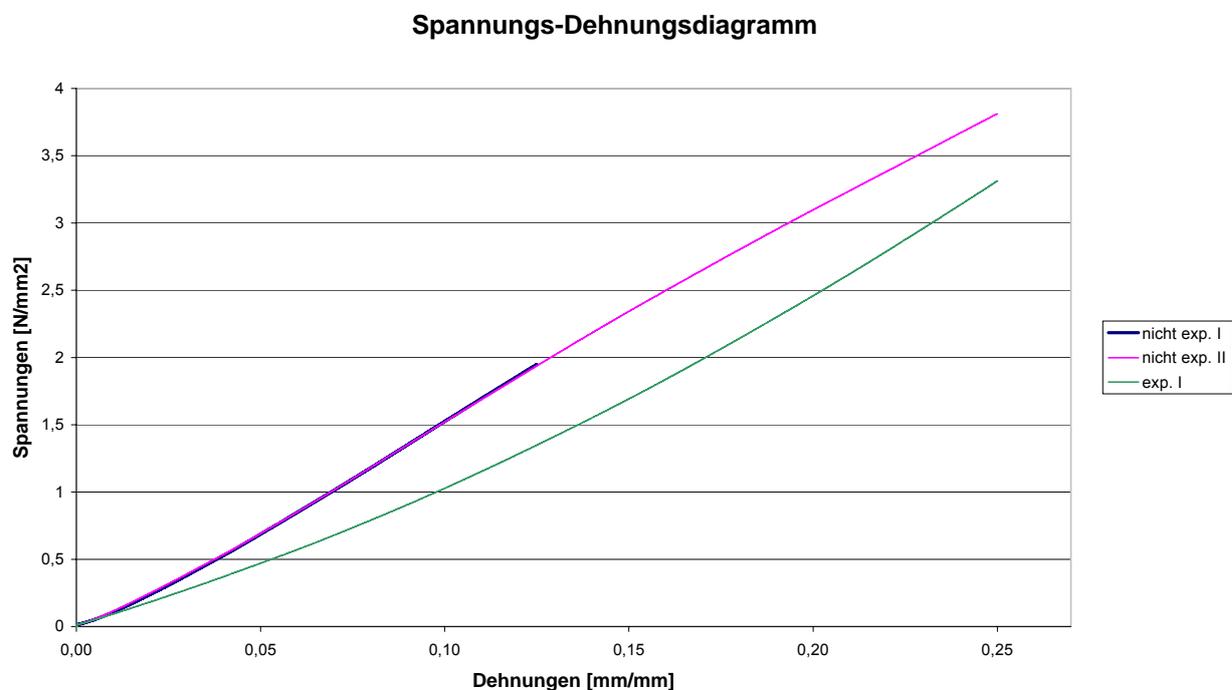


Abbildung 73: Spannungs-Dehnungsdiagramm (einstufige Belastung)

Dabei waren die bei gleicher Dehnung vom nicht expandierten Sanierungsmaterial aufgenommenen Spannungen jedoch um etwa  $0,5 \text{ N/mm}^2$  höher im Vergleich zum expandierten

Sanierungsmaterial. Nach der Entlastung ist in keinem Fall eine plastische Verformung zurückgeblieben, so dass in diesem Bereich ein linear-elastisches Werkstoffverhalten zu beobachten war.

In einer zweiten, umfangreicheren Versuchsreihe wurde ein dreistufiger Belastungszyklus mit der Zwick-Prüfmaschine angefahren. Die Stufen wurden wegdefiniert auf 10 mm, 15 mm und 20 mm festgelegt, was 25%, 37,5% und 50% der Probekörperhöhe im Ausgangszustand entsprach. Im Vergleich zu der ersten Versuchsreihe wurde die Laststeigerung auf 2000 N/min erhöht, weil die Versuche sonst nicht innerhalb eines vertretbaren Zeitraumes durchführbar gewesen wären. Aus verfahrenstechnischen Gründen war eine vollständige Entlastung der Prüfkörper nach den einzelnen Belastungen nicht möglich. Das Entlasten wurde kraftgeregelt auf eine minimale Kraft von 500 N begrenzt, was einer Spannung von  $0,3125 \text{ N/mm}^2$  entsprach.

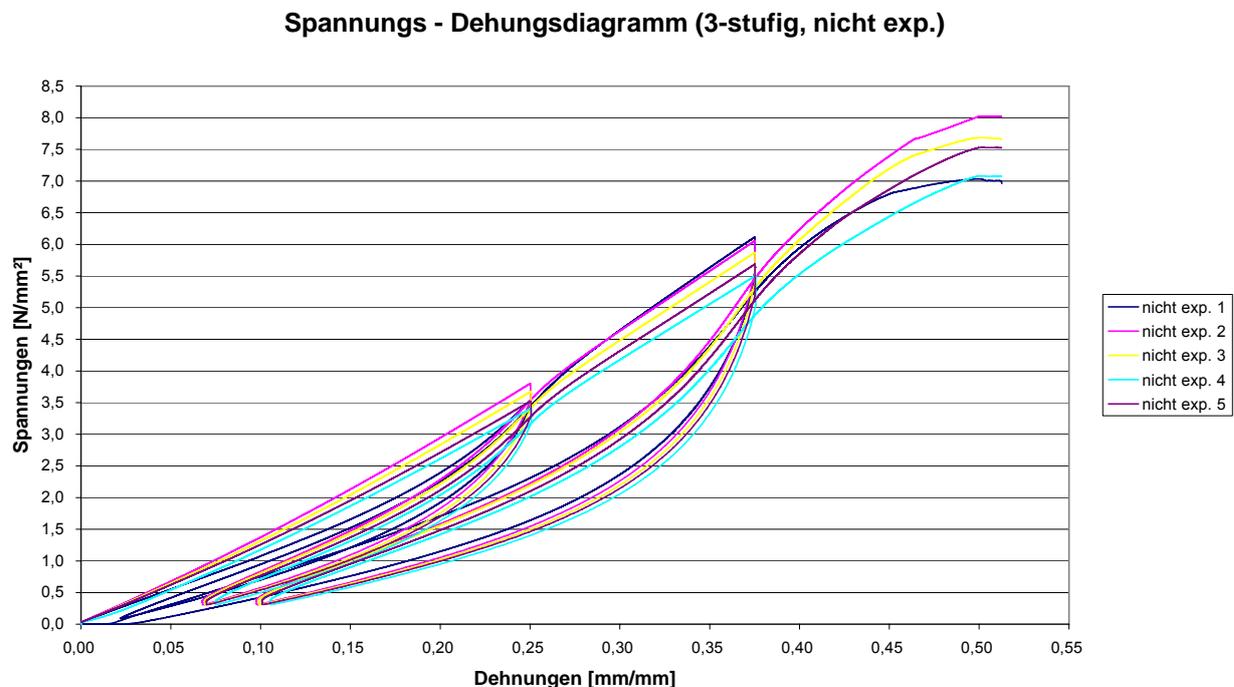


Abbildung 74: Spannungs-Dehnungsdiagramm (3-stufig, nicht expandiert)

In Abbildung 74 und Abbildung 75 ist erkennbar, dass bei den Erstbelastungen ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen den Spannungen und Dehnungen besteht. Dies gilt sowohl für die nicht expandierten, als auch für die expandierten Probekörper, wobei die Steigung der Kurve bei den nicht expandierten Proben größer ist. Nach dem Erreichen der maximalen Dehnung (Stauchung) bei 20 mm und dem anschließenden Entlasten der Proben konnte nur bei zwei expandierten Probekörpern noch eine Rückverformung beobachtet werden. Die übrigen Proben wurden bis zum Versagen belastet. Dabei lagen die vom Sanierungsmaterial aufgenommenen Spannungen zwischen  $7 \text{ N/mm}^2$  bis

8 N/mm<sup>2</sup> bei den nicht expandierten Probekörpern und zwischen 5,7 N/mm<sup>2</sup> bis 6,6 N/mm<sup>2</sup> bei den expandierten Probekörpern.

Beim Vergleich der in Abbildung 74 und Abbildung 75 dargestellten nach der Entlastung zurückbleibenden Dehnungen ist zu erkennen, dass diese an den expandierten Probekörpern größer sind als an den nicht expandierten. Wie groß der plastische Anteil an diesen Dehnungen ist, lässt sich aufgrund der prüftechnisch bedingt noch vorhandenen Spannung von 0,3125 N/mm<sup>2</sup> anhand der Diagramme nicht ermitteln. Auch wenn die durch die Spannung bei der Erstbelastung hervorgerufenen Dehnungen - etwa 2% bis 3% bei nicht expandierten Probekörpern und 3% bis 4% bei expandierten Probekörpern - abgezogen werden, entsprechen die so ermittelten Dehnungen nicht denen, die nach Ausbau aus der Zwick-Prüfmaschine tatsächlich vorlagen. Die tatsächlichen plastischen Verformungen lagen bei etwa 1% bis 4%, waren aber tendenziell bei den expandierten Probekörpern größer als bei den nicht expandierten.

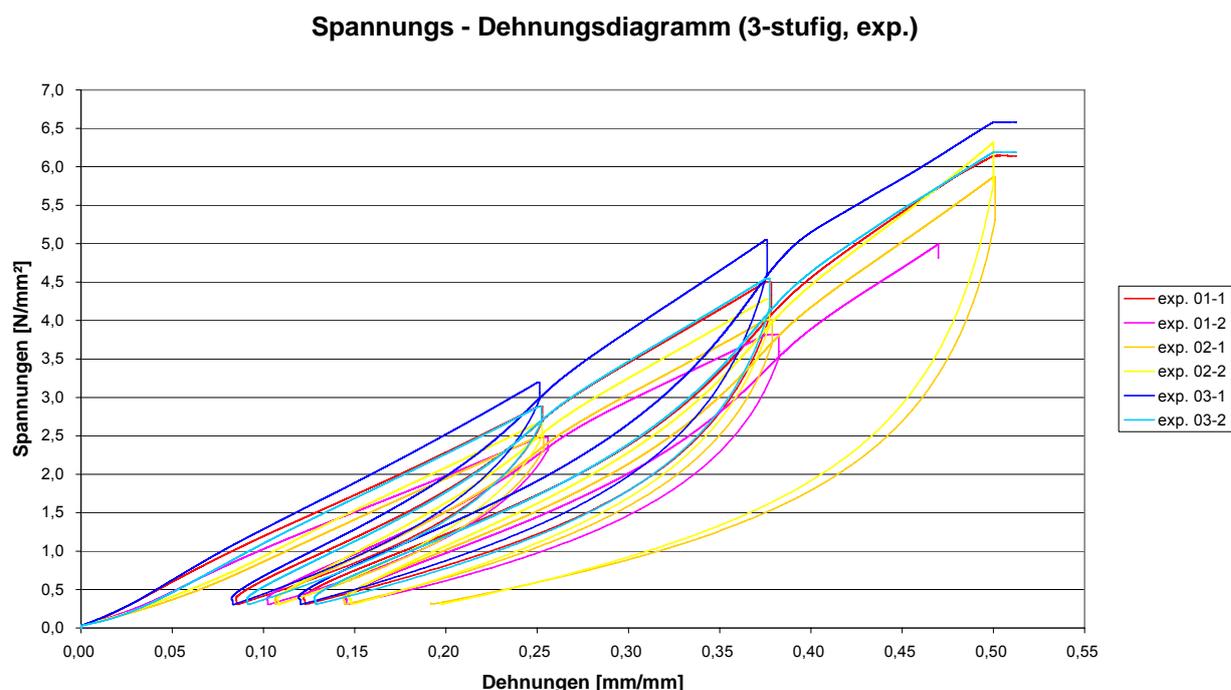


Abbildung 75: Spannungs-Dehnungsdiagramm (3-stufig, expandiert)

Das Sanierungsmaterial verhält sich unterhalb der Bruchdehnung annähernd linear-elastisch. Da die Bruchdehnung erst bei einer Stauchung um etwa 50 Prozent - in keinem Fall bei weniger als 45 Prozent – bezogen auf die Ausgangsdicke erreicht wird, kann das Sanierungsmaterial als sehr elastisch bezeichnet werden. Da mit derart großen Stauchungen in einer bestehenden Kanalisation nicht zu rechnen ist, ist die Elastizität des Sanierungsmaterials für die Praxis vollkommen ausreichend.

## 5.2 Haftzugfestigkeit

Zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit des Sanierungsmaterials wurden zunächst Probekörper mit Steinzeugrohren DN 100 hergestellt. Dabei wurden die Rohrsegmente von zwei 110 mm langen Steinzeugrohrstücken mit dem Sanierungsmaterial in einer Dicke von 10 mm miteinander verbunden. Um die Probekörper mit der Zwick-Prüfmaschine zentrisch auseinander ziehen zu können, wurden an den Innendurchmesser angepasste Halterungen mit flexiblem Drahtseil, wie in Abbildung 76 (Mitte) sichtbar, mit einer durchgehenden Bohrung hergestellt. An den Steinzeugrohrstücken wurden jeweils gegenüberliegend ebenfalls Bohrungen angebracht, so dass mit einer Gewindestange eine Verbindung hergestellt werden konnte, die durch Schraubenmuttern am Ende gegen Verschiebungen gesichert wurde.



Abbildung 76: Zwick-Prüfmaschine mit Haftzug-Probekörper

Innerhalb der Versuchsreihe wurden insgesamt circa 20 Probekörper unterschiedlichen Alters untersucht. Die kürzeste Aushärtezeit betrug dabei 17,5 Stunden. Die Prüfungen wurden kraftgesteuert mit einer Laststeigerung von 250 N/min durchgeführt.

## Haftzugfestigkeit Sanierungsmaterial (Übersicht)

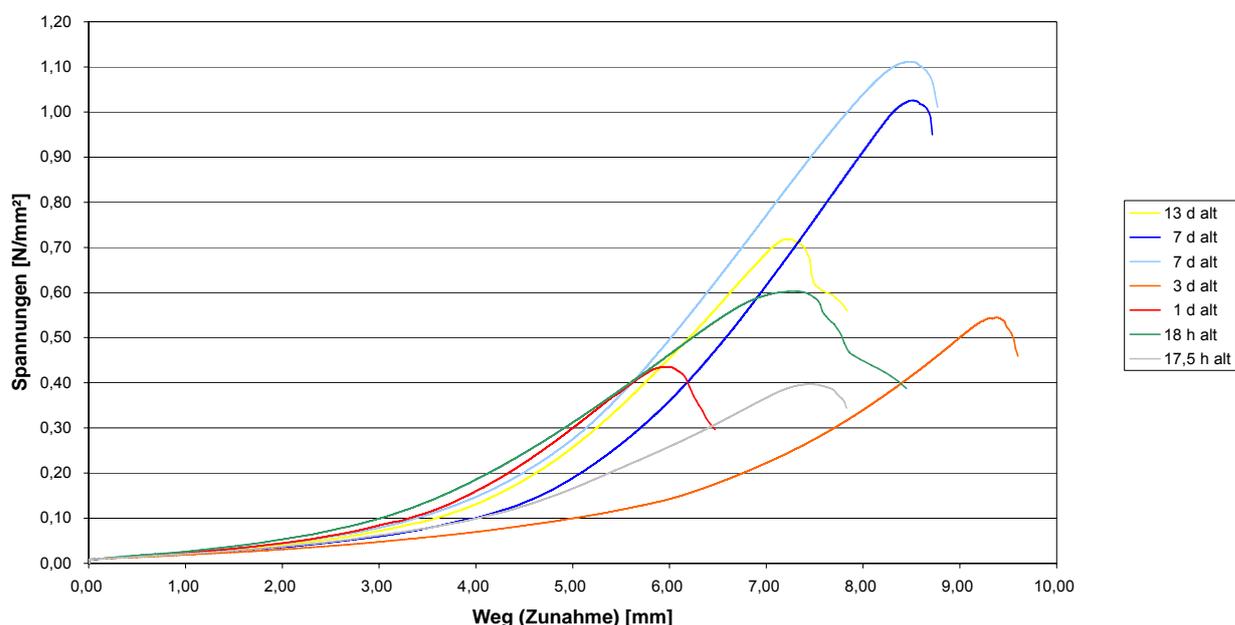


Abbildung 77: Übersicht über die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen

In Abbildung 77 sind die Spannungsverläufe von Probekörpern verschiedenen Alters über der Längenänderung der Sanierungsmaterialschicht in Zugrichtung abgebildet. Bei allen Prüfungen konnte vor dem Versagen der Prüfkörper mindestens eine Dehnung der Sanierungsmaterialschicht um 5,8 mm, meist jedoch sogar um 7 mm und mehr beobachtet werden. Diese entsprachen, bezogen auf die Ausgangsdicke von 10 mm, Dehnungen von 58% als niedrigstem Wert und von etwa 70% im Durchschnitt. Die ermittelten Spannungen beim Versagen der Probekörper lagen zwischen 0,4 N/mm<sup>2</sup> und 1,10 N/mm<sup>2</sup>. Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, kann kein direkter Zusammenhang zwischen dem Alter der Proben zum Prüfzeitpunkt und der beim Versagen des Probekörpers aufgenommenen Spannung oder den Dehnungen hergestellt werden.

Die Ergebnisse dieser Haftzugprüfungen können nicht ohne weiteres mit denen aus anderen Haftzugprüfungen verglichen werden, da sowohl die Art und Form der Probekörper als auch die Prüfmaschine und die erforderlichen Hilfseinrichtungen Einfluss haben.<sup>15</sup> Um die Ergebnisse einordnen zu können, wurden Vergleichsprüfungen mit Sika-Robotec, einem Sanierungsmaterial auf Epoxid-Basis, durchgeführt. Die beim Versagen dieser Probekörper ermittelten Spannungen lagen mit 1,6 N/mm<sup>2</sup> bis 2,2 N/mm<sup>2</sup> deutlich höher als bei den zuvor beschriebenen Probekörpern mit dem PUR-Sanierungsmaterial. Vermutlich hätten sogar noch größere Werte erreicht werden können, denn in allen Prüfungen versagte das Steinzeugrohr im Bereich der Bohrungen und nicht das Sika-Robotec oder die Kontaktstel-

<sup>15</sup> Vgl.: Erning, O., Möglichkeiten und Grenzen von Haftzugprüfungen, 1999; Poggel, H., Haftung in Verbundsystemen, 2001.

le zum Steinzeugrohr. Das Sika-Robotec-Material ist jedoch so wenig elastisch, dass vor dem Versagen der Probekörper keine Dehnungen am Probekörper gemessen werden konnten.

Auch bei diesen Versuchen zeigte sich die große Elastizität des Sanierungsmaterials, so nahm das Material vor dem Versagen im Durchschnitt Dehnungen um 70 Prozent (kleinster Wert 58%) bezogen auf die Ausgangsdicke auf. In der Praxis ist bei bestehenden Kanälen in der Regel nur mit geringen Bewegungen aus beispielsweise Erschütterungen durch Bahnen oder Schwerlastverkehr zu rechnen. Diese können von dem Sanierungsmaterial, unabhängig ob Stauchung oder Dehnung, gut aufgenommen werden.

### 5.3 E-Modul

Bei der Ermittlung des E-Moduls wurde in Anlehnung an DIN 53457 „Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch“ vorgegangen. Dazu wurden zunächst in einer rechteckigen Schalung mit planparallelen Oberflächen Probekörper mit einer Höhe von 160 mm und einer quadratischen Grundfläche mit Seitenlängen von jeweils 40 mm hergestellt. Bestimmt wurde ein Druck-E-Modul an der bereits zuvor erwähnten Zwick-Prüfmaschine. Die Probekörper wurden senkrecht zu ihrer Grundfläche mit einem Vorschub von 1 mm pro Minute zusammengestaucht. Mit einer optischen Wegmessung wurde die Stauchung der mittleren 80 mm des Probekörpers aufgenommen. Dadurch wurde vermieden, dass durch die Kraffteinleitung an den Enden des Probekörpers auftretenden Sondereffekte das Ergebnis beeinflussen. Als Abbruchkriterium wurde eine Stauchung um 3,5 mm eingestellt.

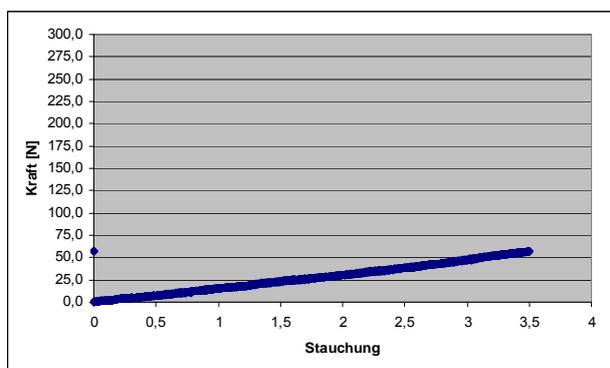


Abbildung 78: Diagramm Kraft/Stauchung  
7h

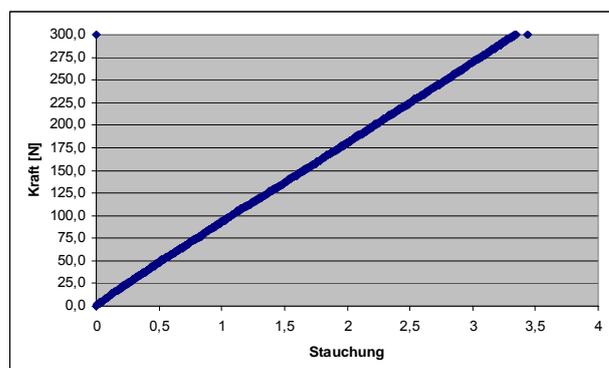


Abbildung 79: Diagramm Kraft/Stauchung  
24h

In Abbildung 78 und Abbildung 79 sind exemplarisch die Ergebnisse von zwei Probekörpern, die 7 Stunden bzw. 24 Stunden nach ihrer Herstellung getestet wurden, dargestellt. Aus diesen Daten wurden dann über die Fläche von  $1600 \text{ mm}^2$  die E-Moduli für die einzelnen Proben ermittelt.

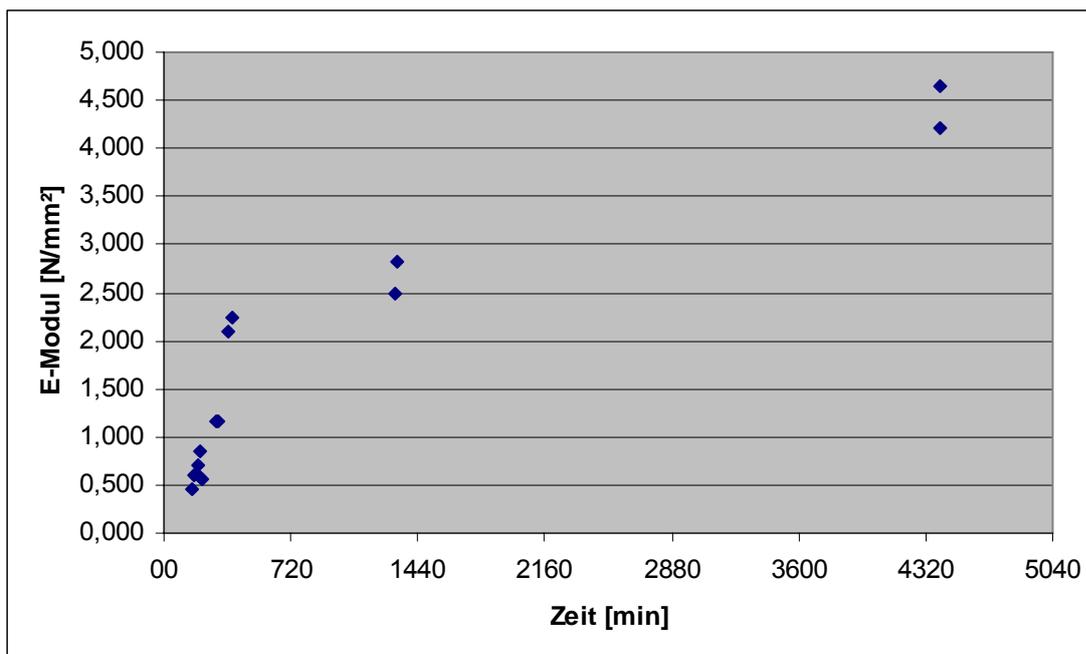


Abbildung 80: E-Moduli der Probekörper

In Abbildung 80 wird die Entwicklung des E-Moduls über die Zeit abgebildet. Es ist zu erkennen, dass in den ersten Stunden ein recht starker Anstieg zu verzeichnen ist, der dann etwas abflacht. Nach drei Tagen wird ein E-Modul von etwa  $4,5 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Dies ist jedoch noch nicht der Maximalwert, denn bei einer Prüfung von zwei etwa 15 Monate alten Probekörpern wurde ein E-Modul von etwa  $16 \text{ N/mm}^2$  ermittelt.

Anhand des E-Moduls kann die Festigkeitsentwicklung des Sanierungsmaterials beurteilt werden. Eine möglichst schnelle Festigkeitsentwicklung ist erforderlich, damit das Material den mechanischen Belastungen des Betriebes standhält. Eine dafür ausreichende Widerstandsfähigkeit ist nach wenigen Stunden erreicht. Nach bereits circa drei Tagen reicht die Festigkeit des Sanierungsmaterials aus, um einer extremen mechanischen Belastung wie beispielsweise einer Hochdruckspülung standzuhalten. Für die Praxis reicht diese Festigkeitsentwicklung vollkommen aus, da Hochdruckspülungen vor einer Sanierung durchgeführt werden und bereits kurz nach der Sanierung die Belastungen aus dem normalen Kanalisationsbetrieb aufgenommen werden können.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein neu entwickelter isotrop expandierbarer Dichtstoff für verschiedene Anwendungen im Bereich der Abwassertechnik modifiziert und überwiegend erfolgreich erprobt. Dabei konnte bereits ohne eine Expansion des Sanierungsmaterials zumeist eine gute Dichtwirkung erzielt werden. Um diese noch zu verbessern, wurde mit der Mikrowellentechnik ein Möglichkeit gefunden das Sanierungsmaterial gezielt und schnell zur Expansion zu bringen.

Im ersten Schritt wurde ein Zwei-Komponenten-Polyurethansystem entwickelt, das je nach Randbedingungen eine Verarbeitungszeit von 30 Minuten bis 2 Stunden ermöglicht. Dieser Dichtstoff verfügt über eine ausreichend starke Haftung, so dass er auch auf feuchten Oberflächen „über Kopf“, wie beispielsweise im Scheitel von Kanalrohren, haftet. Dafür ist eine hohe Materialviskosität notwendig. Dies stand im Widerspruch zu den Anforderungen an ein gießfähiges System für die Abdichtung von horizontalen Fugen in Bauwerken der Abwassertechnik. Daher wurde für diesen Einsatz das Material so modifiziert, dass lediglich die Viskosität herabgesetzt wurde und ansonsten die Materialparameter unverändert blieben. Für alle anderen Anwendungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte mit dem gleichen, sehr viskosen Zwei-Komponenten-Polyurethansystem / Sanierungsmaterial gearbeitet werden.

Bei der Entwicklung der Verfahrenstechnik war ein Ziel, möglichst auf bereits bestehende Techniken und Geräte zurück zu greifen. Zum Mischen der zwei Materialkomponenten konnten die in der Kanalsanierung beim Einsatz von Epoxidharzen verwendeten Mischer verwendet werden. Bei der Zwei-Komponenten-Auspress-Maschine mussten aufgrund des nicht volumengleichen Mischungsverhältnisses des Sanierungsmaterials geringe Adaptationen vorgenommen werden. Die dort gebräuchlichen statischen Mischrohre konnten jedoch direkt übernommen werden. Des Weiteren wurde ein Mischhaken hergestellt, mit dem das Sanierungsmaterial zuverlässig gemischt werden kann.

Zum Einbringen des Materials konnte in den nicht begehbaren Kanälen in allen Fällen bestehende Robotertechnik ausgewählt und ohne Veränderungen genutzt werden. Der Bediener der jeweiligen Roboter benötigt anfänglich eine gewisse Eingewöhnungszeit, um verlässlich mit den Eigenschaften des Sanierungsmaterials umgehen und arbeiten zu können. Für das Einbringen des Sanierungsmaterials in den übrigen untersuchten Anwendungen, wurde eine einfach zu bedienende Druckluftpistole verwendet, wie sie handelsüblich zu erwerben ist. Eine Anpassung war hier nur zur direkten Materialaufnahme aus den für das Sanierungsmaterial verwendeten Gebinden notwendig.

Die Expansion des Sanierungsmaterials erfordert eine Erwärmung des Materials auf mindestens 80 C°. Dies muss durch externe Energiezufuhr erfolgen, da die Aushärtereaktion des Sanierungsmaterials nicht ausreichend stark exotherm ist. Nach umfangreichen Tests stellte sich die Mikrowellentechnik als einzig praktikable Möglichkeit heraus. Mit einem Geräteentwickler gelang es eine ausreichend leistungsstarke Mikrowelle so kompakt zu konstruieren, dass damit im nicht begehbaren Kanalrohren mit einem Durchmesser von DN 300 gearbeitet werden kann. Darauf basierend wurde als Prototyp ein selbstfahrender Mikrowellenroboter entwickelt, der es ermöglicht die gerichteten Mikrowellen gezielt in das Sanierungsmaterial einzubringen. Durch den um 360° schwenkbaren Kopf können alle Positionen und damit alle potentiellen Schadstellen im Kanal erreicht werden.

Mit verschiedenen in situ nahen Versuchen konnte die Tauglichkeit des entwickelten Sanierungsmaterials und der entsprechenden Verfahrenstechnik nachgewiesen werden. Bei allen Versuchen, welche die Bewertungskriterien nicht erfüllten, lagen die Ursachen in nicht ausreichender Vorbehandlung oder noch mangelnder Erfahrung im Umgang mit dem Sanierungsmaterial. Die angestrebte Vielseitigkeit in den Einsatzmöglichkeiten des Sanierungsmaterials wird durch die unterschiedlichen Sanierungsrandbedingungen der Versuche deutlich. Für die Sanierung von Muffen in begehbaren und nicht begehbaren Kanälen, von Schächten, von Hausanschlüssen sowie von vertikalen Fugen in Abwasserbauwerken konnte das gleiche Material verwendet werden. Lediglich für horizontale Fugen war eine Modifikation der Materialviskosität erforderlich.

Die Ergebnisse der Materialprüfungen zeigen, dass das Sanierungsmaterial sehr elastisch ist und dies auch nach Belastungen bleibt. Die sehr rasche Entwicklung der Festigkeit des Materials, für die der E-Modul als Beurteilungskriterium dient, bedeutet, dass bereits nach kurzer Zeit eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen die normalen mechanischen Belastungen in einem Kanal erreicht wird. Für extreme Belastungen, wie beispielsweise Hochdruckspülungen, wird eine ausreichende Festigkeit nach etwa drei Tagen erreicht. Da Reinigungen in der Regel vor einer Sanierung durchgeführt werden, ist die Festigkeitsentwicklung des Materials ausreichend schnell.

In Zukunft könnten mit dem entwickelten isotrop expandierbaren Dichtstoff und der für seine Verarbeitung erforderlichen Verfahrenstechnik grundsätzlich alle hier untersuchten Anwendungen in der Praxis durchgeführt werden. Beim Mikrowellenroboter handelt es sich um einen Prototypen, der, wie die Versuche gezeigt haben, für den in situ Einsatz noch einer Überarbeitung bedarf oder nur unter geeigneten Randbedingungen eingesetzt werden kann. Weiterhin erfordert die Expansion immer einen zusätzlichen Arbeitsschritt und damit Mehrkosten im Vergleich zu anderen Sanierungsverfahren. Es muss sich daher zeigen, ob und in welchen Fällen Auftraggeber bereit sind diese für eine zuverlässige elastische Abdichtung zu tragen.

## 7 Literatur

- ANDERSSON, J.; GUSTAVSSON, A.; KRESTEL, K.-H.:** [Elastomerdichtungen]: Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Elastomerdichtungen für Beton- und Stahlbetonrohre, 4. Internationaler Kongreß Leitungsbau Hamburg, 16. – 20. Oktober 1994, Detmold, 1994
- BERGER, C. / ET ALL:** [Zustand der Kanalisation 2001]: Der Zustand der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland – Ergebnisse der ATV – DVWK – Umfrage 2001, Köln, 2001
- BERGER, C. / LOHAUS, J.:** [Zustand der Kanalisation 2004]: Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004, Hennef, 2004
- ERNING, O.:** [Möglichkeiten und Grenzen von Haftzugprüfungen]: Es gilt, hieb- und stichfeste Anwendungsregeln zu schaffen; Über die Möglichkeiten und Grenzen von Haftzugprüfungen, - boden-wand-decke -, Heft 1/1999
- MAAGH, P.:** [Sanierung von Rohrverbindungen]: Sanierung von Rohrverbindungen, Expandierende Injektionsdichtungen, ATV – Schriftenreihe, Hennef, 1999
- o. V.:** [DIN 4034-2]: DIN 4034-2, Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen, Schächte für Brunnen- und Sickeranlagen, Berlin, 1990
- o. V.:** [DIN 53457]: DIN 53457, Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch, Berlin, 1987
- o. V.:** [DIN EN 1610]: DIN EN 1610, Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Berlin, 1997
- o. V.:** [Leitfaden für die Sanierung von Kanalisationen]: Praxisorientierter Leitfaden für die Sanierung von Kanalisationen im ländlichen Raum, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, Düsseldorf, 1999
- o. V.:** [Prototypische Herstellung der Dichtheit]: Prototypische Herstellung / Wiederherstellung der Dichtheit nicht begehrbarer Abwasserkanäle, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 02 – WK 9397/3, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bonn, 1998
- POGGEL, H.:** [Haftung in Verbundsystemen]: Untersuchungen zur mechanischen Haftung in Verbundsystemen; Dissertation an der Universität Siegen, 2001

**STEIN, D., KAUFMANN, O.:** [Schadenanalyse an Abwasserkanälen]: Schadenanalyse an Abwasserkanälen aus Beton- und Steinzeugrohren der Bundesrepublik Deutschland-West, Korrespondenz Abwasser (KA) 40 (1993), 11.2, S. 168 – 179, 1993

**STEIN, D.:** [Instandhaltung von Kanalisationen]: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin, 1998