

In-situ-Erprobung mineralischer Injektionsmaterialien zur Sanierung von Kanalrohrverbindungen

Abschlussbericht

Ausführende Stelle: RWTH Aachen
ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

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

Aachen, Juni 2009

Univ. Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorwort.....	1
1.2	Ausgangssituation.....	1
2	Motivation und Ziel	3
3	Konzept des mineralischen Sanierungsverfahrens	5
4	Weiterentwicklung der Injektionsmaterialien	8
4.1	Zusammensetzung des Injektionsmaterials	8
4.1.1	Bentonit.....	8
4.1.2	Zement.....	9
4.1.3	Fließmittel	10
4.1.4	Steinkohlenflugasche.....	10
4.1.5	Beschleuniger	11
4.2	Festigkeitsprüfung.....	11
4.3	Rheologischen Untersuchungen	12
4.4	Industrielle Herstellung des mineralischen Injektionsmaterials	20
4.5	Misch- und Injektionsanlage.....	23
4.5.1	Mischen und Bevorraten.....	23
4.5.2	Injektionspumpen.....	26
4.5.3	Materialschlauch-, Druckluft/Wasser- und Datenleitungen.....	29
4.6	Injektionspacker mit integrierter Druckmessung.....	30
4.6.1	Injektionspacker DN 300.....	31
4.6.2	Injektionspacker DN 400.....	34
4.7	Reinigungsmolch.....	36

5	Praxisnahe Sanierungsversuche	39
5.1	Sanierung einzelner Rohrverbindungen	39
5.1.1	Versuchsaufbau	39
5.1.2	Versuchsdurchführung	44
5.1.3	Versuchsergebnisse	45
5.2	Sanierung präparierter Kanalhaltungen	49
5.2.1	Versuchsaufbau	49
5.2.2	Versuchsdurchführung	52
5.2.3	Versuchsergebnisse	53
5.3	Hochdruckspülfestigkeit	61
6	In-situ-Erprobung	65
6.1	Versuchsvorbereitung	65
6.2	Versuchsdurchführung	66
6.3	Versuchsergebnisse	67
7	Kostenvergleich mit anderen Sanierungsverfahren.....	70
8	Zusammenfassung.....	73
9	Literatur.....	75
10	Anhang.....	76
10.1	Haltungsberichte	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Sanierung undichter Muffenverbindungen mit dem Injektionsverfahren ...	2
Abbildung 3-1:	Konventionelle Injektion mit Kunstharzen	5
Abbildung 3-2:	Entwicklung der Materialkomponenten	6
Abbildung 3-3:	Statischer Mischer mit Anschlussstück für Material- und Wasserzuleitungen	7
Abbildung 3-4:	Injektionspumpe und Materialtrichter	7
Abbildung 4-1:	7/28/56 -Tage - Druckfestigkeit bei verschiedenen Beschleunigerzugabemengen	12
Abbildung 4-2:	Fließkurven unterschiedlicher Flüssigkeitstypen.....	14
Abbildung 4-3:	Rotationsviskosimeter Viskomat NT	15
Abbildung 4-4:	Messprinzip des Rotationsviskosimeters mit Paddel	16
Abbildung 4-5:	Messprofil (links), qualitative Fließkurve (rechts)	17
Abbildung 4-6:	Fließkurven der B- Komponente bei 3% Beschleunigerdosierung und variierenden	17
Abbildung 4-7:	Fließkurven der B- Komponente bei 4% Beschleunigerdosierung und variierenden	18
Abbildung 4-8:	Fließkurven der Z- Komponente bei einem w/z- Wert von 0,35 und variierenden Fließmitteldosierungen	19
Abbildung 4-9:	Rheologische Langzeiteigenschaften des HeidelbergCement - Injektionsmaterials	20
Abbildung 4-10:	Vicatgerät mit Tauchkonus	21
Abbildung 4-11:	Erstarrungsverlauf des Injektionsmaterials	22
Abbildung 4-12:	Rührwerk ZS-O (links) und Handrührwerk Ergo Mix 2 (rechts).....	24
Abbildung 4-13:	MAT - Mischer SC – 50.....	25
Abbildung 4-14:	Pneumatisch betriebene Doppelkolbenpumpe	27
Abbildung 4-15:	Doppelplungerpumpe mit Funktionsprinzip.....	28

Abbildung 4-16: Anzeige der Verpressrate und des Injektionsdrucks	29
Abbildung 4-17: Mobile Misch- und Injektionsanlage	30
Abbildung 4-18: Alter DN 300 Injektionspacker	31
Abbildung 4-19: Bildserie Packer DN 300/1 in Plexiglasrohr	32
Abbildung 4-20: Injektionspacker DN 300/1 (links) und optimierter Injektionspacker DN 300/2(rechts).....	32
Abbildung 4-21: Neuer DN 300 Injektionspacker, Seitenansicht (links) und Frontansicht (rechts).....	33
Abbildung 4-22: DN 400 Packer mit Injektionseinheit (links) und Prüfeinheit (rechts).....	34
Abbildung 4-23: Injektionspacker DN 400 mit Spülleitung und Prüfkammer	35
Abbildung 4-24: Reinigungsmolche zur Rohrreinigung	37
Abbildung 4-25: Sanierte Muffe vor der Reinigung (links) und nach der Reinigung (rechts)	38
Abbildung 4-26: Reinigungsmolch	38
Abbildung 5-1: Versuchskasten mit freigelegtem Injektionskörper (links), Abmessungen (rechts).....	40
Abbildung 5-2: Steinzeugrohre	41
Abbildung 5-3: Sieblinie des Versuchsbodens.....	41
Abbildung 5-4: Vorerprobung mit Grundwassersimulation.....	42
Abbildung 5-5: Strömungssimulation	43
Abbildung 5-6: Wasserdichtheitsprüfung	45
Abbildung 5-7: Injektionsprotokoll über die Sanierung der Betonrohrverbindung (Versuch 1).....	46
Abbildung 5-8: Sanierte Betonrohrverbindung.....	47
Abbildung 5-9: Injektionsprotokoll über die Sanierung der Steinzeugrohrverbindung (Versuch 2)	48
Abbildung 5-10: Sanierte Steinzeugrohrverbindung	48
Abbildung 5-11: Unterschiedliche Schadstellengeometrien	51

Abbildung 5-12: Sanierungsstrecke 1, Betonrohrhaltung.....	51
Abbildung 5-13: Sanierungsstrecke 2, Steinzeugrohrhaltung	52
Abbildung 5-14: Sanierungsstrecke 3, Betonrohrhaltung.....	52
Abbildung 5-15: Sanierungsstrecke 4, Steinzeugrohrhaltung	52
Abbildung 5-16: Injektionsprotokoll, Sanierungsstrecke 1, Rohrverbindung 1	53
Abbildung 5-17: Freigelegte Sanierungsstrecke 1	55
Abbildung 5-18: Injektionsprotokoll, Sanierungsstrecke 2, Rohrverbindung 1 (oben), Rohrverbindung 2 (unten)	57
Abbildung 5-19: Freigelegte Rohrverbindungen der Sanierungsstrecke 2.....	58
Abbildung 5-20: Freigelegte Rohrverbindungen der Sanierungsstrecke 3.....	58
Abbildung 5-21: Sanierte Betonrohrverbindung mit Sandablagerungen in der Sole des Muffenspalts.....	59
Abbildung 5-22: Freigelegte Rohrverbindungen der Sanierungsstrecke 4.....	60
Abbildung 5-23: Testhaltung für Hochdruckspülversuch.....	62
Abbildung 5-24: Spülfahrzeug (links) und Spüldüse im Steinzeugrohr (rechts)	63
Abbildung 5-25: Bildserie der Hochdruckspülversuche.....	64
Abbildung 6-1: Steinzeughaltung DN 300 mit Wurzeleinwuchs (links) und einragenden Stutzen (rechts).....	66
Abbildung 6-2: In-situ-Erprobung in Niederkassel.....	67
Abbildung 6-3: Kanalkamera - Befahrung nach der Sanierung mit Materialrückständen (links), Nach dem Abfräsen der Materialrückstände (rechts)	68
Abbildung 6-4: Kanalkamera - Befahrung nach der Sanierung (links), gut verfüllter Muffenspalt (rechts)	68
Abbildung 7-1: Eingangsparameter für die Berechnung der KVR	70
Abbildung 7-2: Dynamische Kostenvergleichsrechnung.....	71
Abbildung 7-3: Projektkostenbarwerte und kritische Nutzungsdauern.....	72

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Das Forschungsvorhaben „In-situ-Erprobung mineralischer Injektionsmaterialien zur Sanierung von Kanalrohrverbindungen“ baut auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens „Entwicklung und praxisnahe Erprobung von mineralischen Injektionsmaterialien zur Sanierung von Kanalrohrverbindungen“ auf, das im Zeitraum von Januar 2003 bis Dezember 2004 am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH Aachen durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse aus der praxisnahen Erprobung, die in der ibb - Institutshalle an präparierten Kanaltteststrecken durchgeführt wurde, zeigten ausgezeichnete Erfolgchancen für die umweltfreundliche Abdichtung undichter Rohrverbindungen. Bislang gab es jedoch noch keine Erfahrungen mit der Anwendung dieses neuen Sanierungsverfahrens in bestehenden Kanälen. Daher wurde auf der Grundlage der Erkenntnisse des ersten Vorhabens ein Konzept für die Weiterentwicklung der Sanierungstechnik erarbeitet und ein Folgeprojekt zur In-situ-Erprobung im Mai 2005 beim Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) beantragt und im Oktober 2006 beauftragt. Nachfolgend wird über den Ablauf und die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes berichtet.

1.2 Ausgangssituation

Undichte Rohrverbindungen gehören zu den häufigsten Schadensbildern bei Abwasserkanälen. Sie verursachen – abhängig von der Höhe des Grundwasserspiegels – entweder eine Exfiltration des Abwassers oder eine Infiltration des Grundwassers.

Eine der Hauptursachen für undichte Rohrverbindungen liegt in der schlechten Ausführungsqualität älterer Dichtungen. Im Unterschied zu den werksseitig vorgefertigten Dich-

tungen, die heutzutage verwendet werden, wurden die Dichtungen bis Mitte der 60er Jahre auf der Baustelle hergestellt.

Des Weiteren sind die damals verwendeten Materialien für die Dichtungen weniger alterungsbeständig als die eingesetzten Rohrwerkstoffe. Daher sind die Rohre oftmals noch in einem guten Zustand, während die Dichtungen ihre Funktion nicht mehr erfüllen.¹ Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit Injektionsverfahren entwickelt, die ausschließlich die Sanierung der schadhafte Rohrverbindungen zum Ziel haben.

Für die Sanierung von Rohrverbindungen in nicht begehbaren Kanälen wurden spezielle Injektionspacker entwickelt, um Injektionsmaterialien vom Kanal aus durch die undichte Rohrverbindung ins Erdreich zu injizieren (s. Abbildung 1-1). Der sogenannte Drei-Kammer-Packer besteht aus zwei Außenkammern und einer Mittelkammer, die unabhängig voneinander mit Druckluft befüllt werden können.

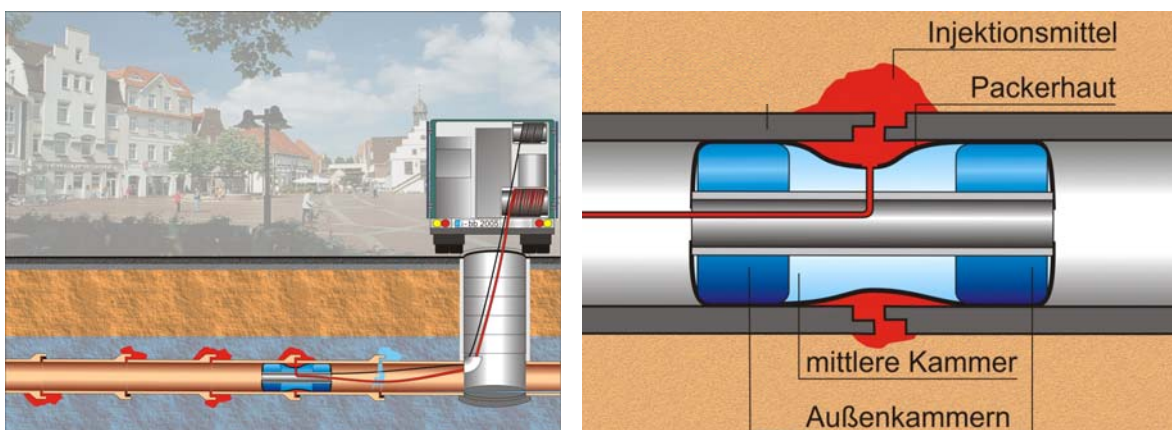


Abbildung 1-1: Sanierung undichter Muffenverbindungen mit dem Injektionsverfahren

Durch das Aufblasen der beiden Außenkammern wird zunächst der Injektionsraum abgesperrt. Anschließend wird das Injektionsmittel über die Zuleitung in den Injektionsraum gepumpt. Zum Abschluss des Verpressvorgangs wird die mittlere Luftkammer mit Druckluft beaufschlagt, so dass sich die Außenhaut des Injektionspackers über die gesamte Länge an die Rohrwand anlegt und das Injektionsmaterial möglichst vollständig verdrängt wird. Als Injektionsmaterial für die Sanierung nicht begehbare Kanäle werden in der Regel Kunstharze eingesetzt. Mit Kunstharzen lassen sich jedoch nicht alle undichten Rohrverbindungen wirtschaftlich abdichten. Aufgrund der niedrigen Viskosität dieser Injektionsmittel kann es zu unerwünscht großen Reichweiten kommen. Die erforderliche Verfüll-

¹ Vgl. Maagh, P., Sanierung von Rohrverbindungen, 1999, S.1.

lung von Hohlräumen hinter der Schadstelle führt ebenfalls zu hohen Materialverbräuchen, so dass durch die Materialkosten eine Reparatur mit Kunstharzen oft unwirtschaftlich wird. Weiterhin ist die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Harze gerade bei großen Verbrauchsmengen umstritten, weshalb die Akzeptanz dieser Injektionsmittel bei den kommunalen Auftraggebern eingeschränkt ist.

2 Motivation und Ziel

Ziel des vorangegangenen Forschungsvorhabens war die Entwicklung von Injektionsmaterialien auf mineralischer Basis sowie der entsprechenden Verfahrenstechnik als Alternative zu den bislang verwendeten Injektionsmitteln auf Kunstharzbasis. Durch den Einsatz mineralischer Stoffe können folgende Vorteile gegenüber den Kunstharzen erreicht werden:

- kostengünstigeres Injektionsmaterial
- verbesserte ökologische Verträglichkeit
- Reduzierung des Materialverbrauchs

In diesem Forschungsvorhaben soll die In-situ-Anwendung des neuen Sanierungsverfahrens als entscheidender Schritt für eine abschließende technische und wirtschaftliche Beurteilung erfolgen. Erst nach der Sanierung schadhafter Kanäle und der anschließenden Überprüfung des Sanierungserfolges lassen sich gesicherte Aussagen über die Eignung des neuen Injektionsverfahrens für die Kanalsanierung treffen. Des Weiteren können bei der In-situ-Anwendung die für die Praxis erforderlichen Modifikationen an der bislang nur unter „Laborbedingungen“ verwendeten Verfahrenstechnik festgestellt und durchgeführt werden.

Die Sanierungen werden in enger Zusammenarbeit mit einem Kanalsanierungsunternehmen geplant und durchgeführt, um die Praxistauglichkeit des Verfahrens zu überprüfen und an den erforderlichen Stellen zielgerichtet zu verbessern. Hierzu wird auf bereits bestehende Techniken zur Kanalinspektion, –dichtheitsprüfung und -sanierung zurückgegriffen. Mit der Fa. Kuchem, Neunkirchen, konnte ein kompetentes und in der Kanalsanierung erfahrenes Unternehmen für die Mitarbeit während der In-situ-Erprobung gewonnen wer-

den. Als öffentliche Netzbetreiber stellten die Stadt Niederkassel und die STAWAG Aachen geeignete Kanalstrecken zur Verfügung.

Ein zentrales Ziel des Vorhabens ist die Weiterentwicklung des Injektionsmaterials und die Abstimmung der Verfahrenstechnik auf die Randbedingungen realer Kanäle. Hierzu gliedert sich das Forschungsprojekt in vier Teilbereiche. Zunächst wird das Injektionsmaterial unter den Gesichtspunkten

- Verbesserung der Fließ- und Verarbeitungseigenschaften,
- Erhöhung der Verarbeitungsdauer,
- Optimierung des Erstarrungsprozesses,
- und Erhöhung der Endfestigkeit weiterentwickelt.

Im nächsten Schritt wird die Verfahrenstechnik so konzipiert, so dass die Teilprozesse Anmischen und Bevorraten des Injektionsmaterials, Verpressen mittels Injektionspumpe und Überwachung des Injektionsvorgangs durch Druck- und Volumenkontrolle an die Baustellenbedürfnisse angepasst werden. In darauf folgenden praxisnahen Versuchsreihen werden das weiterentwickelte Material und die neue Verfahrenstechnik getestet und gegebenenfalls überarbeitet. Abschließend werden ausgewählte Kanalhaltungen mit dem neuartigen mineralischen Injektionsverfahren saniert und mittels Dichtheitsprüfung der Sanierungserfolg kontrolliert.

3 Konzept des mineralischen Sanierungsverfahrens

Das Anwendungsgebiet des neuen Sanierungsverfahrens umfasst die Sanierung undichter Rohrverbindungen in nicht begehbaren Abwasserkanälen mit Injektionsmitteln auf mineralischer Basis. Das Verfahren wurde mit dem Ziel entwickelt, eine kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zu den bisher in der Kanalsanierung eingesetzten Injektionsmitteln auf Kunstharzbasis zu realisieren (s. Abbildung 3-1). Es kann sowohl in Beton- als auch Steinzeugrohren eingesetzt werden. Die Injektion erfolgt durch einen Dreikammer-Packer, der bisher zur Verpressung von Kunstharzen eingesetzt wurde und für die Anwendung von mineralischen Injektionsmitteln modifiziert wurde.

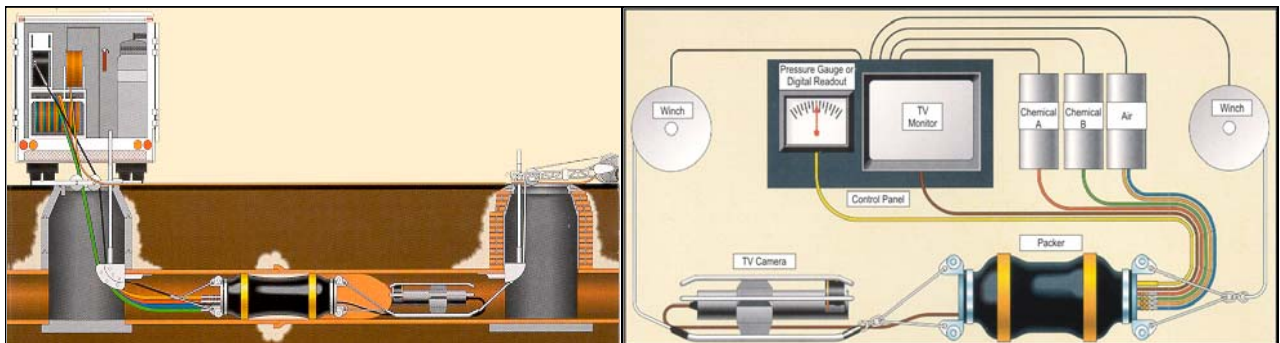


Abbildung 3-1: Konventionelle Injektion mit Kunstharzen

Eine wichtige Eigenschaft des Verfahrens ist das schnelle Ansteifen des verpressten Materials unmittelbar nach der Injektion, wodurch innerhalb von wenigen Minuten eine ausreichende Standsicherheit in der Schadstelle erzielt wird. Erst nach diesem Ansteifprozess kann der Injektionspacker zur nächsten Rohrverbindung umgesetzt werden, ohne dass infolge von Grundwasserdruck oder Eigengewicht das frisch injizierte Material in das Kanalrohr zurückfließt.

Das schnelle Ansteifen des Injektionsmaterials kann jedoch nicht durch schnell abbindende Zemente erreicht werden, da in diesem Fall das Material bereits in den langen Zuleitungen zur Injektionsstelle und im Vorratsbehälter erstarren würde. Aufgrund der üblichen Haltungslängen in der Kanalisation muss das Injektionsmittel oftmals über Strecken von mehr als 50 m gefördert werden. In den Injektionspausen zwischen der Sanierung zweier Rohrverbindungen würde das Material nicht nur in den Schadstellen, sondern auch in den Förderschläuchen erhärten. Damit das Material die gegensätzlichen Forderungen nach

einer langen Verarbeitungszeit vor der Injektion und einem schnellen Ansteifen nach der Injektion erfüllen kann, muss der Erstarrungsprozess des mineralischen Bindemittels durch Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers im Injektionspacker gesteuert werden.

Für das Dosieren und Einmischen des reinen Erstarrungsbeschleunigers im Injektionspacker ist allerdings keine geeignete Verfahrenstechnik verfügbar. Um Probleme bei der Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers zu vermeiden, wurde ein zweikomponentiges Injektionsmaterial mit einem Mischungsverhältnis der Komponenten von 1:1 entwickelt. In diesem Injektionsmaterial enthält die eine Komponente das Bindemittel und die andere Komponente mineralische Zusatzstoffe und den Erstarrungsbeschleuniger (s. Abbildung 3-2).

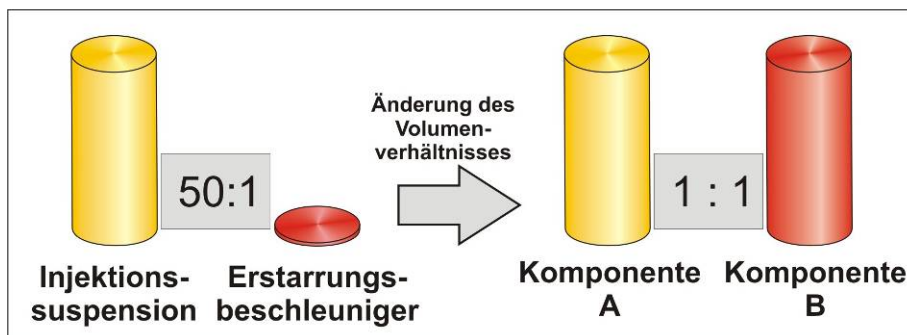


Abbildung 3-2: Entwicklung der Materialkomponenten

Die Dosierung des Beschleunigers erfolgt bei dieser Vorgehensweise nicht erst im Injektionspacker. Stattdessen wird die für eine Materialcharge abgewogene Beschleunigermenge bereits beim Anmischen der B - Komponenten im Rührwerk zugegeben. Die beiden Materialkomponenten werden getrennt zum Injektionspacker gefördert und dort in einem Statikmischer miteinander vermischt (s. Abbildung 3-3). Die Wirkungsweise von Statikmischern beruht auf dem Prinzip der Materialvermischung bei turbulenten Strömungen. In einem ca. 20 cm langen Mischrohr bewirken gitterförmige Leitelemente eine Homogenisierung beim Durchfließen der beiden Komponenten. Da beide Komponenten im Volumenverhältnis 1:1 gefördert werden, ist im Unterschied zu dem ursprünglichen Verhältnis von 1:50 eine optimale Vermischung mit Hilfe eines statischen Mixers problemlos möglich.



Abbildung 3-3: Statischer Mischer mit Anschlussstück für Material- und Wasserzuleitungen

Um die richtige Dosierung der Materialkomponenten zu gewährleisten, müssen die beiden Suspensionen von der Injektionspumpe gleichmäßig gefördert werden. Hierzu wurde im ersten Forschungsvorhaben eine Injektionspumpe für zweikomponentige Injektionsmittel auf Kunstharzbasis so modifiziert, dass auch mineralische Injektionsmittel mit ihr verarbeitet werden können. In Abbildung 3-4 ist die verwendete 2K-Injektionspumpe zusammen mit den beiden Materialtrichtern für die zwei Komponenten abgebildet.



Abbildung 3-4: Injektionspumpe und Materialtrichter

Die beiden Kolben der Pumpe laufen zwangsweise parallel und fördern die zwei Komponenten daher immer im gleichen Volumenverhältnis. Darüber hinaus ist die Injektionspumpe mit einer Spülpumpe ausgestattet, um den statischen Mischer nach jeder Injektion mit Wasser reinigen zu können. Die bestehende Technik eignete sich allerdings nur für Versuchsdurchführungen im kleinen Maßstab. Da für die angestrebte In-situ-Erprobung größere Materialmengen zu verarbeiten sind, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens eine baustellengeeignete Verfahrenstechnik entwickelt.

4 Weiterentwicklung der Injektionsmaterialien

Im Rahmen des ersten Forschungsvorhabens wurden sowohl ein einkomponentiges, als auch ein zweikomponentiges Injektionsmaterial untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigten jedoch deutliche qualitative und verfahrenstechnische Vorteile bei dem zweikomponentigen Material. Eine Weiterentwicklung des zweikomponentigen Injektionsmaterials im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll einerseits gute Verarbeitungseigenschaften der einzelnen Komponenten und andererseits eine hohe Endfestigkeit des erhärteten Injektionsmaterials erzielen. Hierzu werden der Einfluss unterschiedlicher Zusammensetzungen im flüssigen Zustand durch rheologische Messungen und im festen Zustand mit Hilfe von Druckfestigkeitsprüfungen analysiert.

Nach der Weiterentwicklung im Institutslabor werden die Rezepturen dem Bindmittelhersteller HeidelbergCement vorgestellt. Anhand von Zielvorgaben, die die rheologischen Eigenschaften und die zu erzielenden Endfestigkeiten definieren, entwickelt HeidelbergCement auf Grundlage der Institutslabormischungen ein zweikomponentiges, mineralisches Material, das als Sackware für die In-situ-Erprobung zu Verfügung gestellt wird.

4.1 Zusammensetzung des Injektionsmaterials

Die Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens geben die grundsätzliche Zusammensetzung der Einzelkomponenten und die Zugabemengen der jeweiligen Bestandteile bereits vor. Durch den Einsatz einer neuen Mischtechnik sind jedoch Veränderungen in der Materialzusammensetzung erforderlich. Im Folgenden werden die endgültigen Zusammensetzungen der beiden Komponenten dargestellt und die entscheidenden Einflüsse auf die Verarbeitung und die Festigkeit genauer beschrieben.

4.1.1 Bentonit

Für den Einsatz in Zementsuspensionen eignen sich nur zementstabile Aktivbentonite, bei denen durch eine spezielle Behandlung ein negativer Ionenaustausch zwischen Zement

und Bentonit unterbunden wird. Für das Injektionsmaterial wird daher ein zementstabiler Bentonit verwendet.

Bei den ersten einkomponentigen Materialentwicklungen stand die thixotrope² Eigenschaft von Bentonit im Vordergrund. Nach dem Injizieren sollte die Strukturbildung des Bentonits zu einer ausreichenden Grünstandsfestigkeit führen, so dass das frisch injizierte Material nicht infolge von Eigenwicht oder Grundwasserdruck wieder aus der Fuge heraus fließt. Da das frühe Ansteifen des Materials bei der zweikomponentigen Version durch den Erstarrungsbeschleuniger hervorgerufen wird, hat das Bentonit in beiden Komponenten nur noch eine stabilisierende Aufgabe. Es verhindert die Entmischung der Suspensionsbestandteile und das Absetzen von Wasser an der Suspensionsoberfläche (Bluten). Bentonit kann jedoch bei zu hoher Dosierung die Endfestigkeit des Injektionsmaterials negativ beeinflussen. In Laborversuchsreihen wird eine optimale Dosierung von 20 kg/m³ ermittelt, so dass die Suspensionen beider Komponenten stabil sind und die Endfestigkeit nicht beeinträchtigt wird.

4.1.2 Zement

Für einen reibungslosen Baustellenbetrieb des neuartigen Sanierungsverfahrens ist eine lange Verarbeitungszeit der Suspension Voraussetzung, damit das Injektionsmaterial während der Sanierung möglichst gleich bleibende Eigenschaften aufweist. Nach dem Anmischen der Suspension muss der Hydratationsprozess der Zementphase möglichst spät erfolgen. Ein wichtiger Parameter ist hierbei die Mahlfineinheit des Zementes. Zemente mit hoher Mahlfineinheit besitzen durch die große Oberfläche der Einzelkörner ein hohes Reaktionspotenzial und steifen daher schneller an.

Das Erstarrungsverhalten kann des Weiteren über die Zementzusammensetzung reguliert werden. Hüttensandreiche Hochofenzemente besitzen eine lange Verarbeitungszeit und weisen zudem einen hohen Sulfatwiderstand auf. Besonders bei der Sanierung von Ab-

² Thixotropie bezeichnet die Eigenschaft eines Fluids, bei einer konstanten Scherung über eine bestimmte Zeiteinheit die Viskosität abzubauen. Nach Aussetzung der Scherbeanspruchung wird die Ausgangsviskosität wieder aufgebaut.

wasserleitungen ist die Sulfatbeständigkeit bei biogener Schwefelsäurekorrosion von hoher Bedeutung. Daher wird die Zementkomponente mit einem Hochofenzement mit hohem Hüttensandanteil hergestellt. Diese Zementsorte zeichnet sich durch ein langsames Abbindeverhalten und einen hohen Widerstand gegen chemische Angriffe aus.

4.1.3 Fließmittel

Die Fließfähigkeit der Zementkomponente kann bereits bei geringen Zugabemengen sehr effektiv durch den Einsatz von Fließmittel eingestellt werden, ohne hierdurch die Reaktionsfähigkeit des Erstarrungsbeschleunigers oder die Endfestigkeit nachteilig zu beeinflussen. Es wird ein Produkt gewählt, das gemäß DVGW Arbeitsblatt W 347 für die Herstellung von Beton in Kontakt mit Trinkwasser geeignet ist. Es ist daher anzunehmen, dass durch den Einsatz dieses Fließmittels in der Injektionssuspension keine nachteilige Beeinträchtigung des Grundwassers verursacht wird.

4.1.4 Steinkohlenflugasche

Steinkohlenflugasche gehört zu den puzzolanischen Stoffen. Puzzolane besitzen kein eigenes Erhärtungsvermögen und können nur mit Wasser reagieren, wenn von außen Calciumoxid (CaO) zugeführt wird. Als CaO-Spender kommen u.a. Kalk und Zement in Frage. Das bedeutet, dass bei der Verwendung von Steinkohlenflugasche in der Beschleunigerkomponente noch keine Reaktion eintritt, solange nicht beide Komponenten vermischt werden und aus der Zementkomponente Calciumoxid für die puzzolanische Reaktion der Flugasche zur Verfügung gestellt wird.

Durch den Einsatz der puzzolanischen Steinkohlenflugasche in der Beschleunigerkomponente kann außerdem die Endfestigkeit des gemischten Injektionsmaterials gesteigert werden. Ebenso wird die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe verbessert.

4.1.5 Beschleuniger

Das Funktionsprinzip des zweikomponentigen Sanierungsverfahrens wird entscheidend durch die Wirkung des Erstarrungsbeschleunigers mitbestimmt. In Untersuchungsreihen wurden die besten Ergebnisse mit einem umweltneutralen, alkalifreien und nicht basischen Erstarrungsbeschleuniger erzielt. Entsprechend der Verwaltungsvorschrift für wassergefährdende Stoffe (VwVwS) ist das Produkt in die Wassergefährdungsklasse 1 eingestuft und demnach schwach wassergefährdend³. Zum einen muss die Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers so hoch sein, dass eine schnelle Reaktion mit dem Zement der Z-Komponente innerhalb von 3 bis 4 Minuten zu einer ausreichenden Grünstandsfestigkeit führt. Andererseits führt eine Überdosierung zu enormen Verlust der Endfestigkeit. Außerdem besitzt der Erstarrungsbeschleuniger auch eine verflüssigende Wirkung, die unter dem Gesichtspunkt Materialkonsistenz zu berücksichtigen ist. Bei einer Dosierung von 3 bis 4% werden gute Ergebnisse im Hinblick auf Konsistenz, Grünstandsfestigkeit und Endfestigkeit erreicht (s. Kapitel 4.2 und 4.3).

4.2 Festigkeitsprüfung

Die Dauerhaftigkeit der sanierten Kanalrohrverbindung wird maßgeblich durch die Druckfestigkeit des ausgehärteten Injektionsmaterials beeinflusst. Sie orientiert sich an den Festigkeiten der zu sanierenden Rohrmaterialien. An dieser Stelle wird nur auf die Auswirkung der Beschleunigerdosierung näher eingegangen, da diese den größten Einfluss auf verfahrenstechnische Frischmaterialeigenschaften und die Festigkeit des Sanierungsmaterials ausübt.

Einerseits ist der Erstarrungsbeschleuniger für eine schnelle Grünstandsfestigkeit verantwortlich, er hat jedoch andererseits auch eine hohe Auswirkung auf die Endfestigkeit. Zu hohe Beschleunigerzugabemengen entziehen dem Hydratationsprozess des Zementes mineralische Bestandteile, die dann für die Ausbildung der Endfestigkeit nicht mehr zu Verfügung stehen.

³ Vgl. Sicherheitsdatenblatt zu Gecedral F 2000, Stand 13.02.2003, S.5.

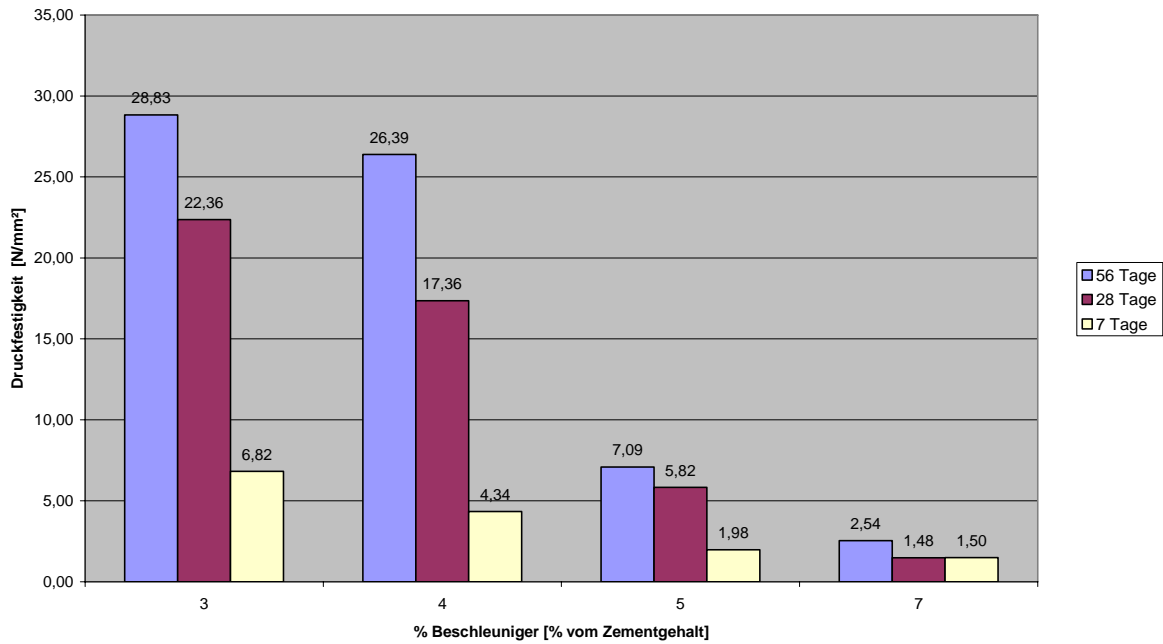


Abbildung 4-1: 7/28/56 -Tage - Druckfestigkeit bei verschiedenen Beschleunigerzugabemengen

Die Druckfestigkeitsprüfung wird entsprechend der DIN EN 196 Teil 1 durchgeführt. Da die geometrisch unregelmäßige Form der Sanierungskörper keine reproduzierbare Festigkeitsprüfung zulässt, wird die Druckfestigkeit an in Schalung hergestellten Injektionskörpern bestimmt. Zur Herstellung der künstlichen Injektionskörper werden beide Komponenten mithilfe des Statikmischers vermischt und in Prüfschalungen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm abgefüllt. Nach einem Tag werden die Prüfkörper ausgeschalt und bis zur Prüfung 7, 28 oder 56 Tage in Wasser gelagert.

Die in Abbildung 4-1 dargestellten Festigkeitswerte stellen jeweils das arithmetische Mittel aus 6 Einzelprüfungen dar. Die für die Sanierung nötige Dosierungsbandbreite des Erstarungsbeschleunigers von 3 bis 7 % vom Zementgehalt hat offensichtlich einen erheblichen Einfluss auf die Druckfestigkeitsentwicklung. Um eine Endfestigkeit von mindestens 20 N/mm² zu erreichen, darf die Beschleunigerzugabemenge höchstens 4 % betragen.

4.3 Rheologische Untersuchungen

Durch die Analyse der rheologischen Eigenschaften infolge unterschiedlicher Materialzusammensetzung kann die Fließfähigkeit der Komponenten so eingestellt werden, dass eine optimale Verarbeitung während des Sanierungsprozesses gewährleistet ist. Die Verarbeitung der mineralischen Materialien erstreckt sich über mehrerer Verfahrensabschnitte.

Zunächst müssen die Materialien durch das Anmischen in homogenen Suspensionen vollständig aufgeschlossen werden. Bei planmäßigen und unplanmäßigen Sanierungsunterbrechungen dürfen die Materialien keinen erheblichen Fließeigenschaftsänderungen unterliegen. Der anschließende Pumpvorgang erfolgt über eine DN 20 Schlauchleitung mit einer Länge von 70 m. Die im Marktsegment Injektionspumpen üblichen Verarbeitungsdrücke betragen maximal 50 bar, so dass die Fließeigenschaften der Materialien so eingestellt werden müssen, dass bei einer normalen Pumpförderung höchstens bis zu 20 bar Leitungsdruck auftreten. Die Druckdifferenz zum maximal möglichen Druck wird als Sicherheit zur Vermeidung von Leitungsstopfern benötigt. Im letzten Verfahrensschritt werden die Komponenten im Statikmischer vermischt und in die Schadstelle injiziert. Der eintretende Erstarrungsprozess erfolgt möglichst schnell, um lange Packerstandzeiten zu vermeiden. Das schnelle Ansteifen des Injektionsmaterials kann neben der Beschleunigerzugabe über hohe Feststoffanteile in beiden Komponenten verbessert werden. Hierdurch wird jedoch gleichzeitig die Viskosität des Materials erhöht und die Pumpfähigkeit vermindert.

Weiterhin ist für eine Vermischung der beiden Komponenten im gleichen Volumenverhältnis eine gleichmäßige Förderung der Suspensionen zwingend erforderlich. Um den gleichen Materialfluss beider Komponenten zu gewährleisten, müssen die Fließeigenschaften gleich eingestellt werden. Durch rheologische Untersuchungen kann der optimale Feststoffanteil beider Komponenten ermittelt werden, um eine ausreichend gute und gleichmäßige Pumpbarkeit bei gleichzeitig schnellem Erstarrungsverhalten zu erreichen.

Unter dem Oberbegriff der Rheologie werden die Gesetzmäßigkeiten des Fließverhaltens von Flüssigkeiten und Feststoffen unter der Einwirkung äußerer Kräfte zusammengefasst.⁴ In den bei dieser Anwendung vorliegenden Fragestellungen werden zur Beschreibung der Rheologie die Materialkennwerte Viskosität γ und Fließgrenze η herangezogen. Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit bzw. die innere Reibung und somit für den Widerstand, den eine Flüssigkeit gegen die Einwirkung äußerer Kräfte aufbringt. Da es sich bei den Materialkomponenten um Suspensionen handelt, also um Mischungen von Flüssigkeiten und Feststoffen, wird die Rheologie von beiden Materialgruppen beeinflusst.

⁴ Vgl. Blask. O., Rheologie von Bindemittelleimen, 2002, S. 71.

Solche als viskoelastisch bezeichnete Materialien zeichnen sich durch die Ausbildung von Fließgrenzen aus. Unterhalb einer bestimmten Schubspannung verhält sich das Material elastisch wie ein Feststoff und oberhalb der Fließgrenze zeigt es die Viskositätseigenschaften von Flüssigkeiten.

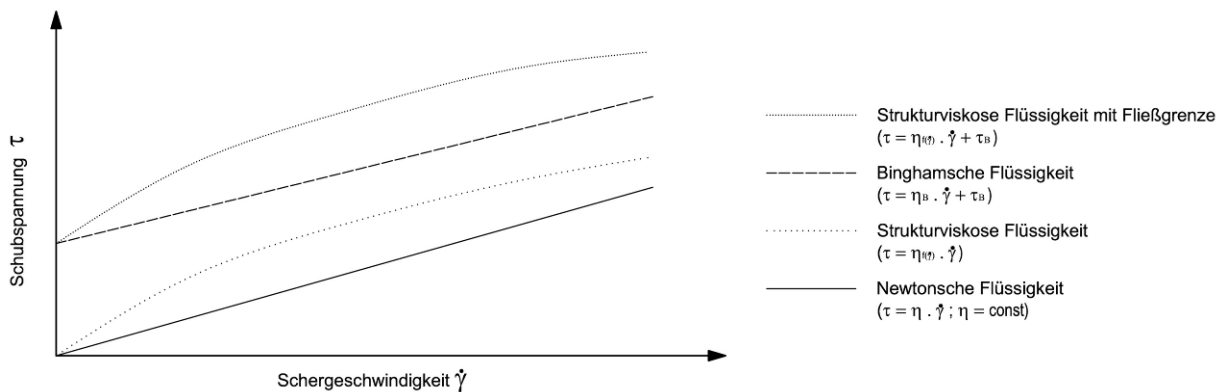


Abbildung 4-2: Fließkurven unterschiedlicher Flüssigkeitstypen

Quelle: in Anlehnung an, Gehm, L. Rheologie, 1998, S. 38.

Die Größen „Viskosität“ und „Fließgrenze“ lassen sich anhand von Fließkurven in einem Schubspannungs- Schergeschwindigkeitsdiagramm darstellen (s. Abbildung 4-2). Die Viskosität ergibt sich aus der Steigung der Fließkurve. Die Fließgrenze ist die Schubspannung, die sich bereits vor Fließbeginn, also bei der Schergeschwindigkeit null einstellt. Je nach Ausbildung von Viskosität und Fließgrenze werden verschiedene Flüssigkeitstypen unterschieden. Bentonithaltige Suspensionen werden der Gruppe der strukturviskosen Flüssigkeiten mit Fließgrenze zugeordnet.

Anders als bei reinen Flüssigkeiten können Fließkurven bei Suspensionen nicht direkt durch Scherversuche erstellt werden. Mit speziellen Messgeräten lassen sich jedoch quasi-rheologische Messgrößen für die Viskosität und die Fließgrenze ermitteln. Zur relativen Beschreibung von Viskosität und Fließgrenze eignen sich sogenannte Rotationsviskosimeter. Mineralische Suspensionen werden durch Viskosimeter mit speziellen Messgeometrien analysiert. Für die Untersuchungen wurde der Viskomat NT der Fa. Schleibinger, Buchbach, eingesetzt (s. Abbildung 4-3).



Abbildung 4-3: Rotationsviskosimeter Viskomat NT

Die zu untersuchende Flüssigkeit befindet sich dabei in einem rotierenden Zylinder (Mess- topf), in den ein fest stehendes Messpaddel eingetaucht wird. Die durch die Drehbewe- gung der Suspension auf das Paddel aufgebrachten Scherkräfte werden über eine Dreh- momentenmessung in der Achse des Messpaddels erfasst (s. Abbildung 4-4). Durch die Formgebung des Messpaddels werden Entmischungsvorgänge während der Rotation un- terbunden. Es kommt zu einem komplexen dreidimensionalen Strömungsvorgang, der keine Umrechnung der Messgrößen (Drehmoment und Rotationsgeschwindigkeit) in die rheologischen Grundgrößen (Schubspannung und Schergeschwindigkeit) zulässt. In Ab- hängigkeit der Viskosität, der Fließgrenze und der Schergeschwindigkeit lassen sich aller- dings über das gemessene Drehmoment und die Rotationsgeschwindigkeit quasi- rheologische Werte ermitteln.

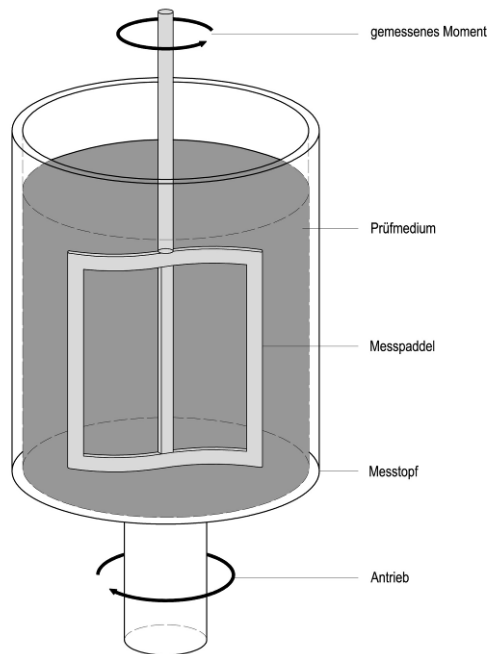


Abbildung 4-4: Messprinzip des Rotationsviskosimeters mit Paddel

In einem Drehmoment-Rotationsgeschwindigkeitsdiagramm ergeben die aufgetragenen Messwerte eine relative Fließkurve. In dem programmierbaren Viskomat NT wird hierzu ein Geschwindigkeitsmessprofil mit konstanter Beschleunigung und anschließend konstanter Verzögerung vorgegeben (s. Abbildung 4-5, links). Es entsteht eine Hysteresekurve, die aus einer „Gel-Kurve“ (Beschleunigungsphase) und einer „Sol-Kurve“ (Verzögerungsphase) besteht (s. Abbildung 4-5, rechts).⁵ Während der Beschleunigungsphase findet ein Strukturbruch statt, der mit Erreichen des lokalen Maximums in der Gel-Kurve abgeschlossen ist. Bei thixotropen Flüssigkeiten ist dieses Verhalten je nach Belastungsgeschichte der Suspension unterschiedlich stark ausgeprägt. Eine von der Vorgeschichte unabhängige und rekonstruierbare Beurteilung der Fließeigenschaften kann deshalb nur über die Sol-Kurve erfolgen. An dieser kann die relative Fließgrenze in Form eines Widerstandsdrehmomentes bei sehr geringen Drehgeschwindigkeiten abgelesen werden (dynamisches Fließmoment). Ein Maß für die Viskosität ergibt sich aus der Steigung der Sol-Kurve.

⁵ Vgl. DIN 1342-1, 2003, S. 5/13.

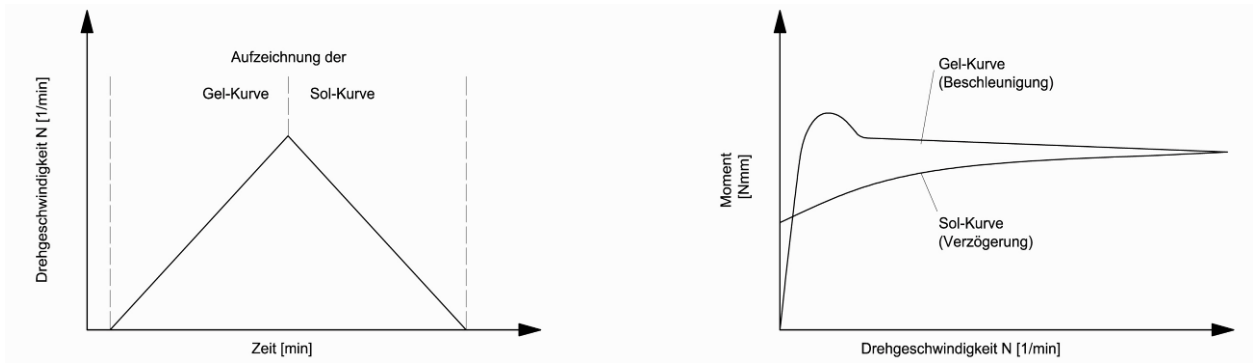


Abbildung 4-5: Messprofil (links), qualitative Fließkurve (rechts)

Mit dem Viskomat steht für die Untersuchungen ein Relativ-Messsystem zur Verfügung, mit dem vergleichende Aussagen über das Fließverhalten infolge unterschiedlicher Materialzusammensetzung getroffen werden können. Die Konsistenz der Z- Komponente lässt sich leicht über die Fließmittelzugabe einstellen. Daher wird zunächst die B- Komponente optimal auf die Pumpentechnik abgestimmt und die Konsistenz der Z- Komponente entsprechend gleich eingestellt.

Die Fließfähigkeit der B- Komponente wird durch den Feststoffgehalt, gemessen über den w/f- Wert und die Beschleunigerzugabemenge beeinflusst. Die maximal zulässige Beschleunigerdosierung ergibt sich aus den Ergebnissen der Festigkeitsuntersuchungen zu 3 bis 4% (s. Kapitel 4.2). Der w/f Wert wird zwischen 0,3 und 0,5 variiert.

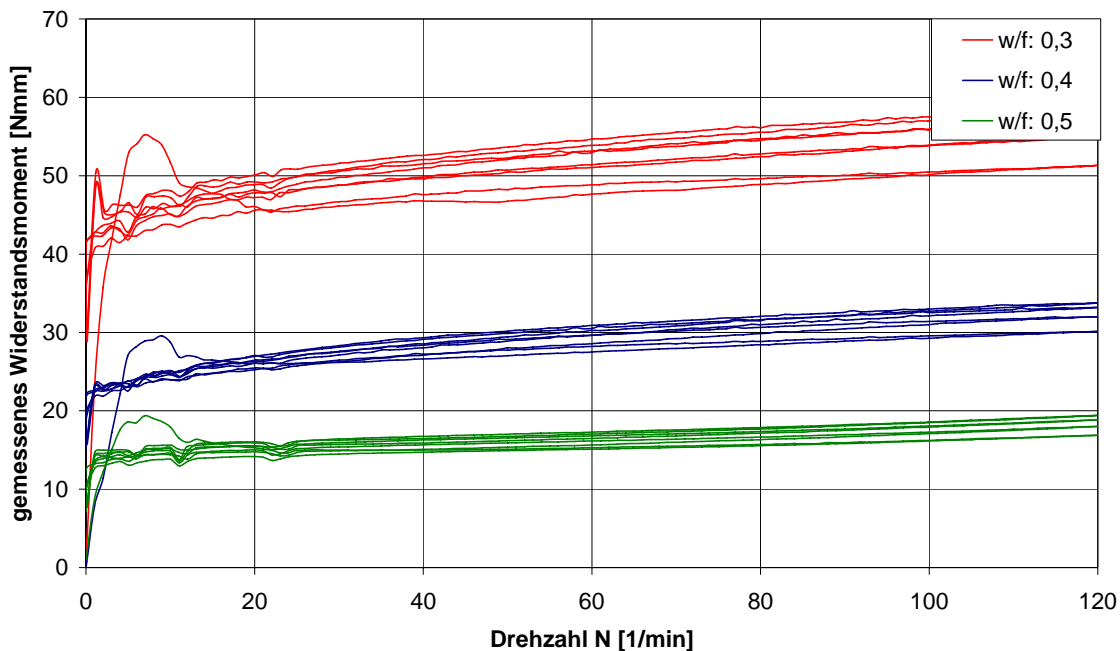


Abbildung 4-6: Fließkurven der B- Komponente bei 3% Beschleunigerdosierung und variierenden w/f- Werten

Das in den Versuchen angewandte Messprofil enthält 4 Beschleunigungsphasen von 2 Minuten, in denen die Rotationsgeschwindigkeit von 0 U/min auf 120 U/min gesteigert wird. In den anschließenden 4 Verzögerungsphasen wird die Drehgeschwindigkeit des Messtopfes in 2 Minuten von 120 U/min auf 0 U/min zurückgefahren. Die Fließkurven bestehen somit aus 4 Hystereseabschnitten mit jeweils einer Beschleunigungs- und einer Verzögerungsphase. In Abbildung 4-6 sind die Fließkurven für eine Beschleunigerdosierung von 3 % und unterschiedliche w/f- Werte dargestellt. Mit steigendem Feststoffgehalt erhöht sich das Widerstandsmoment, das als Mittelwert auf der Sol-Kurve gemessen wird. Bei einem w/f- Wert von 0,3 beträgt das Widerstandsmoment ca. 50 Nmm, bei einem w/f- Wert von 0,4 ca. 28 Nmm und bei einem w/f- Wert von 0,5 nur noch ca. 15 Nmm. Abbildung 4-7 enthält die Fließkurven bei einer Beschleunigerdosierung von 4 % für verschiedene w/f- Werte. Da der Beschleuniger auch eine leicht verflüssigende Wirkung hat, liegen die Widerstandsmomente bei den entsprechenden w/f- Werten unterhalb der Werte, die bei 3 % Beschleunigerdosierung gemessen werden.

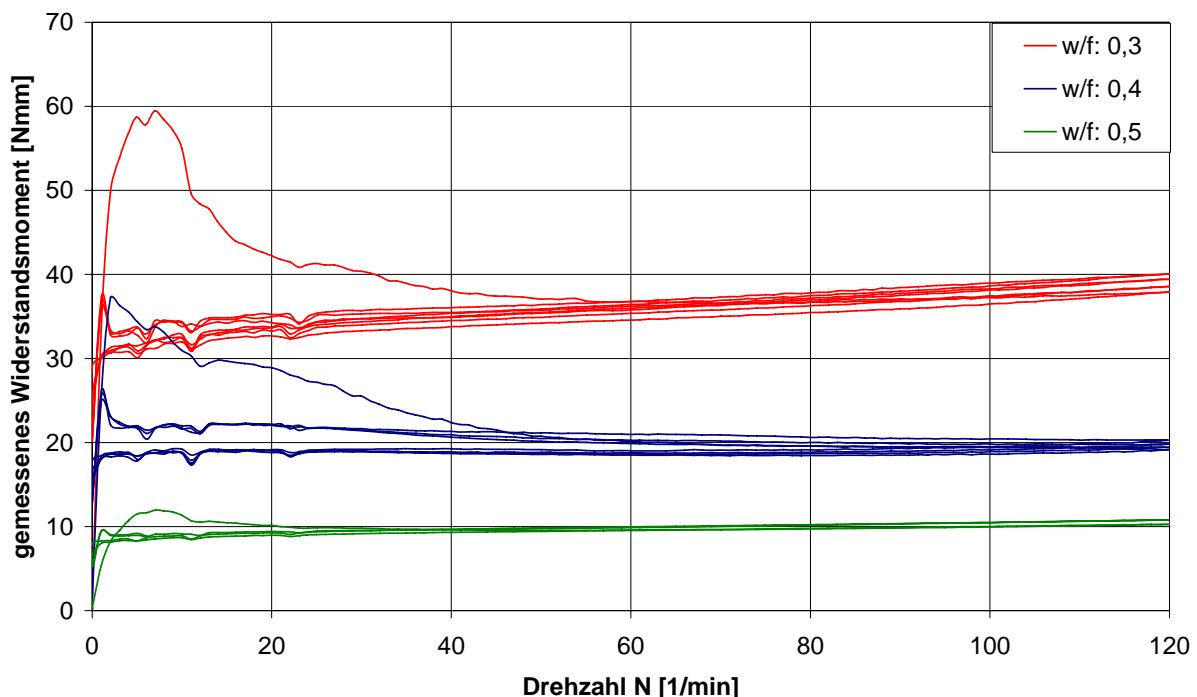


Abbildung 4-7: Fließkurven der B-Komponente bei 4% Beschleunigerdosierung und variierenden w/f- Werten

Aus den Erfahrungen und praxisnahen Erprobungen kann von einer guten Pumpbarkeit der Suspensionen ausgegangen werden, wenn das auf der Sol-Kurve gemessene mittlere Fließmoment im Bereich von 20 bis 30 Nmm liegt. Hieraus ergibt sich ein optimaler w/f-Wert von ca. 0,4 bei einer Beschleunigerdosierung von 3 % und von ca. 0,35 bei einer Be-

schleunigerdosierung von 4 %. Für beide Kombinationen wird der Erstarrungsprozess überprüft und eine ausreichende Reaktionsschnelligkeit festgestellt.

Um die Z- Komponente auf die gleichen Fließeigenschaften wie die B- Komponente einzustellen, werden Fließkurven bei unterschiedlicher Fließmittelzugabe erstellt. Der w/z- Wert orientiert sich an dem Feststoffgehalt der B- Komponente und beträgt 0,35, damit auf der Sanierungsbaustelle die gleiche Wasserzugabemenge für beide Komponenten vorgeschrieben und keine Verwechslung möglich ist. Das Viskomat- Geschwindigkeitsmessprofil wird von den rheologischen Versuchen mit der B- Komponente übernommen. Die Fließmitteldosierung wird von 0,25% bis 0,45% variiert. Bei diesen geringen Zugabemengen hat sie keine Auswirkungen auf den Erstarrungsprozess oder die Endfestigkeit.

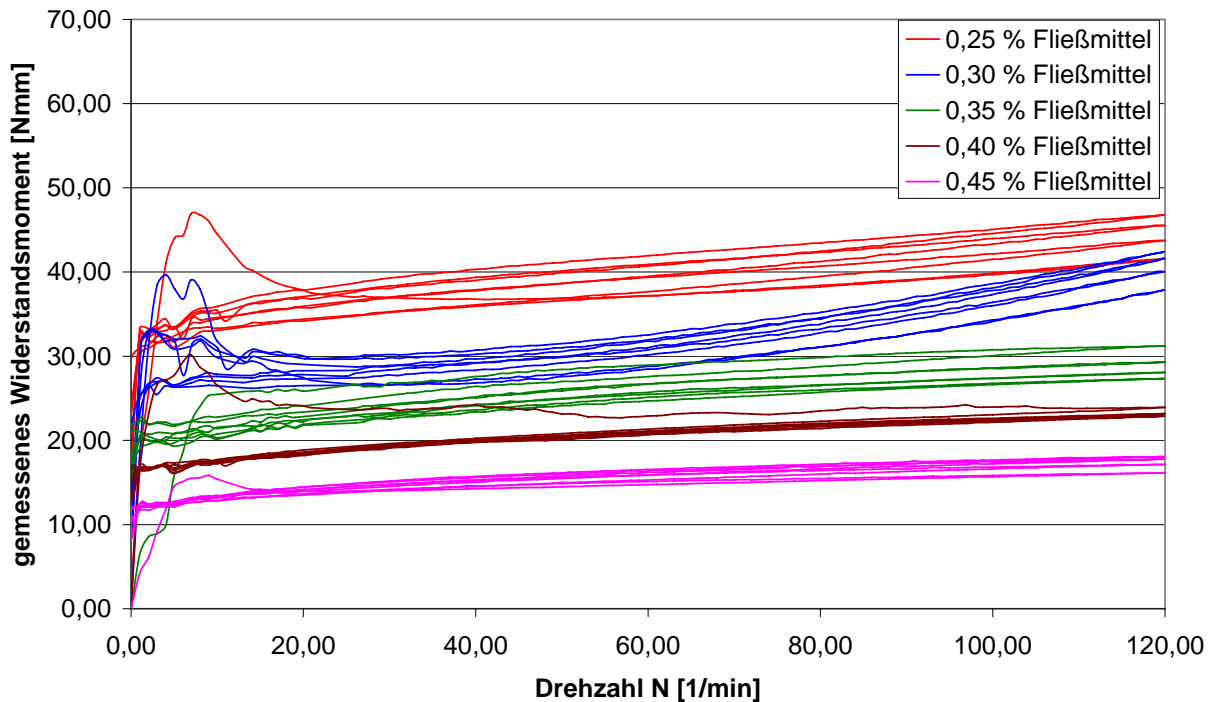


Abbildung 4-8: Fließkurven der Z- Komponente bei einem w/z- Wert von 0,35 und variierenden Fließmitteldosierungen

Je nach Fließmitteldosierung ergeben sich Widerstandsmomente zwischen ca.14 Nmm und 43 Nmm. Bei einer Fließmitteldosierung von 0,35 % bewegen sich die Widerstandsmomente in dem Zielkorridor von 20 bis 30 Nmm (s. Abbildung 4-8).

Durch die rheologische Optimierung der beiden Komponenten steht die grundsätzliche Rezeptur des Injektionsmaterials fest. Die Suspensionsqualitäten können mithilfe des

Viskomaten überprüft werden. Für eine anwendungsfreundliche Verarbeitung von größeren Materialmengen wird die Herstellung im industriellen Maßstab von dem Bindemittelhersteller HeidelbergCement übernommen.

4.4 Industrielle Herstellung des mineralischen Injektionsmaterials

Während der Weiterentwicklung des Injektionsmaterials werden die Anforderungen an ein baustellengeeignetes Produkt definiert und die Komponenten im Labormaßstab hergestellt und erprobt. Die neuartige Produktentwicklung wird dem Bindemittelhersteller HeidelbergCement vorgestellt. Auf der Grundlage der untersuchten rheologischen und mechanischen Eigenschaften entwickelt HeidelbergCement das Injektionsmaterial für eine industrielle Herstellung.

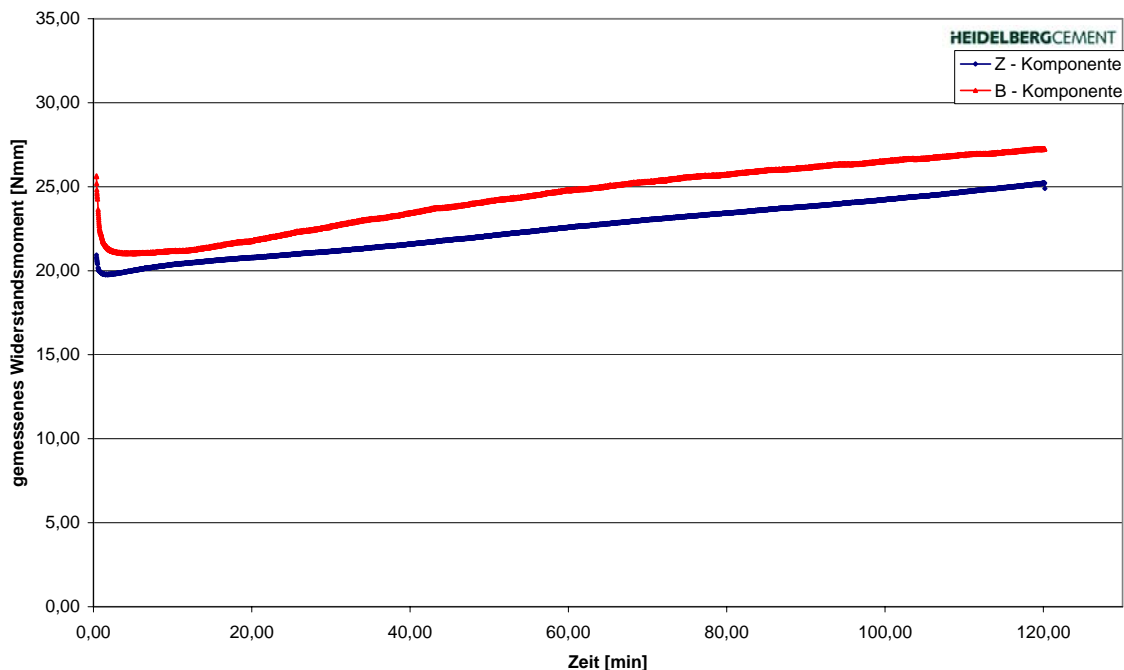


Abbildung 4-9: Rheologische Langzeiteigenschaften des HeidelbergCement - Injektionsmaterials

Die rheologischen Eigenschaften des HeidelbergCement - Injektionsmaterials wurden mit dem Viskomat NT von HeidelbergCement eingestellt und im ibb überprüft. Für eine vereinfachte Versuchsdurchführung und -auswertung wird das Viskomat- Geschwindigkeitsmessprofil verändert. Das Widerstandsmoment wird bei einer konstanten Umdrehungsgeschwindigkeit von 120 U/min über 120 min gemessen.

Wie Abbildung 4-9 zeigt, wird die Vorgabe von einem Widerstandsmoment zwischen ca. 20 bis 30 Nmm von beiden Komponenten über einen Zeitraum von 2 Stunden gut eingehalten. Die Verarbeitbarkeit ist somit auch noch lange nach dem Anmischen gewährleistet.



Abbildung 4-10: Vicatgerät mit Tauchkonus

Zusätzlich wird der Erstarrungsprozess über die Eindringtiefe eines Tauchkonus mit dem Vicatgerät analysiert (s. Abbildung 4-10). Hierzu werden die Komponenten miteinander vermischt und zu definierten Zeitpunkten die Eindringtiefe eines Metallkonus gemessen. Je geringer die Eindringtiefe, desto höher ist die Grünstandsfestigkeit.

In Abbildung 4-11 werden die Ergebnisse der Erstarrungsgeschwindigkeit dargestellt. Es werden jeweils zwei Versuche mit dem Labormaterial (RWTH) und zwei Versuche mit dem industriell hergestellten Material (HCG) durchgeführt. In allen Versuchen setzt der Erstarrungsprozess nach ca. 3 Minuten ein und verläuft bis zur 7. Minute ähnlich. Die Abweichungen im dahinter liegenden Betrachtungszeitraum sind verfahrenstechnisch nicht relevant, da die Sanierung dann bereits beendet ist. Die rheologischen Versuche und die Versuche zum Erstarrungsverhalten zeigen eine gute Anpassung der industriell hergestellten Materialien an die Vorgaben, die zuvor durch Kleinstmengen im Institutslabor vorgegeben wurden.

Erstarrungsverlauf Rohrsanierungsmörtel
 Nach Vermischung von Bindemittel- und Beschleunigerkomponente
 - Bestimmung Eindringtiefe Tauchkonus -

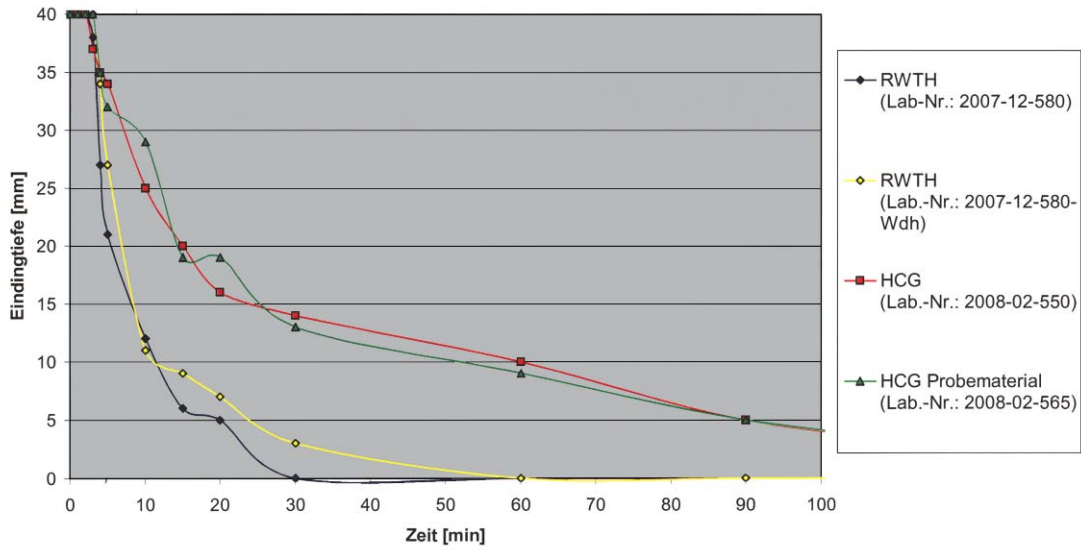


Abbildung 4-11: Erstarrungsverlauf des Injektionsmaterials

Für den Baustelleneinsatz werden die beiden Komponenten als gekennzeichnete 25 kg Sackware geliefert. Die Z- Komponente enthält bereits alle Bestandteile und muss nur noch mit 8,75 Litern Wasser angemischt werden. Bei der B – Komponente wird der Erstarrungsbeschleuniger in flüssiger Form (3 - 4%) vor dem Mischvorgang dem Anmachwasser (8,75 Liter) zugegeben. Je nach Witterungsbedingungen kann hierüber optional die Erstarrungsgeschwindigkeit auf der Baustelle reguliert werden.

4.5 Misch- und Injektionsanlage

Die zu entwickelnde Gerätetechnik der Misch- und Injektionsanlage stützt sich auf Erfahrungen, die mit verschiedenen Geräten im ersten Forschungsvorhaben gewonnen wurden. Die erforderlichen Anlagenteile werden in drei zusammenhängenden Gerätegruppen behandelt:

- Mischen und Bevorraten
- volumengesteuerte Injektionspumpe
- Materialschlauch-, Druckluft- und Datenleitungen

Um die Anlage transportieren zu können, wird die gesamte Gerätetechnik auf einen Zweiaxanhänger montiert. Hierdurch lässt sich außerdem das neue Verfahren leicht an bereits bestehende Sanierungstechniken der Fa. Kuchem (z.B.: Zugfahrzeug, Kanalkamera, Seilwinde) adaptieren.

4.5.1 Mischen und Bevorraten

Aufgrund des Bentonitgehalts der Materialkomponenten ist für das Anmischen des Injektionsmaterials eine Mischtechnik zu verwenden, die einen kolloidalen Partikelauflösungs gewährleistet. Bisher wurde hierfür das Rührwerk ZS-O der Fa. Desoi, Kalbach, eingesetzt. Die extrem schnell rotierende Desolverscheibe ist für das Anmischen einer Bentonitsuspension sehr gut geeignet, da sie ausreichend hohe Scherkräfte erzeugt, um die plättchenförmigen Bentonitteilchen, die zunächst in Schichtpaketen aneinander gelagert sind, voneinander zu trennen (s. Abbildung 4-12, links).

Das anschließende Einrühren des Zementes und der Flugasche in die Bentonitsuspension wurde bislang mit dem Handrührwerk „Ergo Mix 2“ durchgeführt, da mit dem Rührwerk

ZS-O keine ausreichend großen Feststoffmengen in die Suspension eingerührt werden können⁶ (s. Abbildung 4-12, rechts).



Abbildung 4-12: Rührwerk ZS-O (links) und Handrührwerk Ergo Mix 2 (rechts)

Der Einsatz unterschiedlicher Geräte für die Herstellung der Bentonitsuspensionen und das Einrühren der weiteren Feststoffe hat sich als sehr zeitintensiv erwiesen. Das Handrührwerk besitzt zudem verfahrenstechnische Nachteile, da die Homogenität der Mischung von der Sorgfalt der bedienenden Personen abhängt und die relativ steife Konsistenz der Injektionskomponenten einen hohen Mischaufwand erforderlich macht.

Um den zeitlichen und gerätetechnischen Aufwand zu begrenzen, ist es für den Einsatz in der Praxis zweckmäßiger, mit einer Mischtechnik sowohl die Bentonitsuspension herzustellen, als auch die restlichen Feststoffe, wie Zement oder Flugasche, einzurühren. Darüber hinaus muss das Volumen der einzelnen Materialchargen vergrößert werden, um die Anzahl der Mischvorgänge zu reduzieren.

Die Fa. MAT Mischanlagentechnik, Immenstadt, verfügt über eine spezielle Mischtechnik, die einerseits einen kolloidalen Partikelauflösung gewährleistet und andererseits auch für hohe Feststoffgehalte geeignet ist. In dem Mischbehälter der SC-Mischer befinden sich schnell rotierende Mischpaddel aus Lochblechen. Durch die Rotation der Mischpaddel wird die Suspension einer ständigen Wechselwirkung von Fliehkraft, Scherkraft und Kavitation ausgesetzt. Infolge dieser energiereichen Dispergierung wird ein kolloidaler Partikelauflösung des Bentonits gewährleistet. Aufgrund der geometrischen Ausbildung des

⁶ Die fest installierte Desolverscheibe hat für den Fall größerer Feststoffmengen und damit auch für höhere Viskositäten keine Mischwirkung mehr in den Randbereichen des Materialbehälters.

Mischers ist zudem auch das Einrühren von hohen Feststoffmengen möglich, ohne dass diese sich in „toten“ Randbereichen ablagern können. In Zusammenarbeit mit der Fa. MAT Mischanlagentechnik wurde bereits in anderen Forschungsprojekten mit Erfolg die kolloidal aufschließende Mischtechnik des Unternehmens eingesetzt.⁷ Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird daher mit dem MAT-Mischern SC-50 gearbeitet (s. Abbildung 4-13).



Abbildung 4-13: MAT - Mischer SC – 50

Das Fassungsvermögen des Mixers SC-50 beträgt 50 Liter. Es können Suspensionsdichten von bis zu 2 kg/dm³ und maximale Korndurchmesser von 2 mm verarbeitet werden. Mit diesen technischen Voraussetzungen werden die Anforderungen für den Einsatz in der Praxis voll erfüllt. Durch Mischversuche mit beiden Komponenten auf dem Firmengelände der Fa. MAT wird die besondere Eignung des Mischprinzips und eine schnelle, bedienerfreundliche Verarbeitung festgestellt, so dass mit dem MAT – SC – 50 für die Misch- und Injektionsanlage eine verfahrenstechnisch und wirtschaftlich geeignete Mischtechnik zu Verfügung steht.

Während der ersten Erprobung im Institut wurde das Material nach dem Anmischen in an die Pumpe angeschlossene Materialbehälter umgefüllt (s. Abbildung 3-4, S. 7). Aus diesen trichterförmigen Behältern musste die Injektionspumpe das Material durch einen kurzen Schlauch zunächst ansaugen, bevor es in die Materialzuleitungen zum Injektionspacker gefördert werden konnte.

⁷ Vgl. o. V., Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen, 2008

Auf der Druckseite können Injektionspumpen hohe Betriebsdrücke erreichen, auf der Saugseite kann das zu fördernde Medium jedoch immer nur mit einem deutlich geringeren Druck als dem Atmosphärendruck (ca. 1 bar) angesaugt werden. Die Saugseite stellt daher den Schwachpunkt einer Pumpförderung dar, da nur Materialien mit ausreichend fließfähigen Konsistenzen eine Füllung der Pumpenzylinder gewährleisten.

Aufgrund der thixotropen Fließeigenschaften der entwickelten Materialkomponenten ist es jedoch möglich, mit einer permanenten Rührbewegung in dem Materialbehälter eine Verflüssigung zu erreichen, so dass das Material auch bei geringen Ansaugdrücken gefördert werden kann. Durch den Einsatz von Rührwerken im Materialbehälter wird die thixotrope Verfestigung der Suspension, die im unbewegten Zustand einen deutlichen Anstieg der Konsistenz verursachen kann, verhindert. Hiermit kann das Risiko einer zu steifen Materialkonsistenz und der daraus folgenden Fehlfunktion der Pumpe minimiert werden. Die bisher eingesetzte Bevorratungstechnik wird aus diesem Grund durch entsprechende Rührwerksbehälter ersetzt. Die Bevorratung erfolgt dabei in den Mischerbehältern, die nach dem hochoberigen Anmischvorgang auf eine geringe Drehzahl reduziert werden, bei der das Material nur noch in Bewegung gehalten wird. Die Mischbehälter werden somit zunächst zum kolloidalen Aufschluss der Feststoffe eingesetzt und fungieren anschließend als Bevorratungsbehälter mit langsam laufenden Mischwerkzeugen als Rührwerke.

4.5.2 Injektionspumpen

Für eine erfolgreiche Sanierung mit dem neuen Injektionsverfahren müssen beide Suspensionen exakt in einem Verhältnis von 1:1 in den Statikmischer gepumpt werden. Hierzu kann durch zwei baugleiche Kolbenpumpen eine weitestgehend konstante Förderleistung sichergestellt werden. Problematisch ist hier jedoch die stoßweise Förderung. Wenn die Hubbewegungen der beiden Kolben nicht parallel ausgeführt werden, fördert eine der beiden Pumpen Material in den statischen Mischer, während die andere Kolbenpumpe Material aus dem Materialbehälter ansaugt. Die beiden Komponenten würden also abwechselnd in den Mischer gepresst und unzureichend vermischt.

Spezielle Injektionspumpen für zweikomponentige Materialien gibt es bereits für Injektionsmittel auf Basis von Kunstharzen. Diese Pumpen sind so konstruiert, dass die beiden

Kolben zwangsweise parallel laufen. Daher wurde für die Laborversuche bisher eine Zweikomponenten-Pumpe für Kunstharze verwendet, die für zementbasierte Injektionsmittel umgerüstet wurde (s. Abbildung 4-14).



Abbildung 4-14: Pneumatisch betriebene Doppelkolbenpumpe

Angetrieben wurde die Pumpe mit einer Pneumatikeinheit, die von einem zusätzlichen Kompressor mit Druckluft versorgt werden musste. Während der Erprobung konnte mit der Injektionspumpe eine maximale Förderleistung von 12 Litern/min erreicht werden. Für die Verpressung von Rohrverbindungen ist jedoch eine Förderleistung von maximal 4 Litern/min je Komponente ausreichend. Der erforderliche Förderdruck betrug bei einer 10 m Förderleitung im Normalbetrieb unter 10 bar. Bei Materialstopfern im statischen Mischer konnte der Druck bis ca. 30 bar gesteigert werden. Dies führte jedoch in den wenigsten Fällen zur Überwindung des Verstopfungswiderstandes, so dass die Sanierung zum Ausbau und zur Reinigung des statischen Mixers unterbrochen werden musste.

Die Technik der zwangsgeführten Doppelkolbenpumpe ist für den Labormaßstab zwar grundsätzlich geeignet, für den Baustelleneinsatz muss sie jedoch durch ein leistungsfähigeres Pumpverfahren ersetzt werden. Daher wird mit der Fa. MAT eine Injektionspumpe entwickelt, die mit einer Förderleistungen von 10 Litern/min je Materialkomponente bei einem maximalen Förderdruck von bis zu 50 bar arbeitet. Um geringe Konsistenzunterschiede zwischen den Materialkomponenten ausgleichen zu können, wird jede Komponente mit einer eigenen Pumpe gefördert.

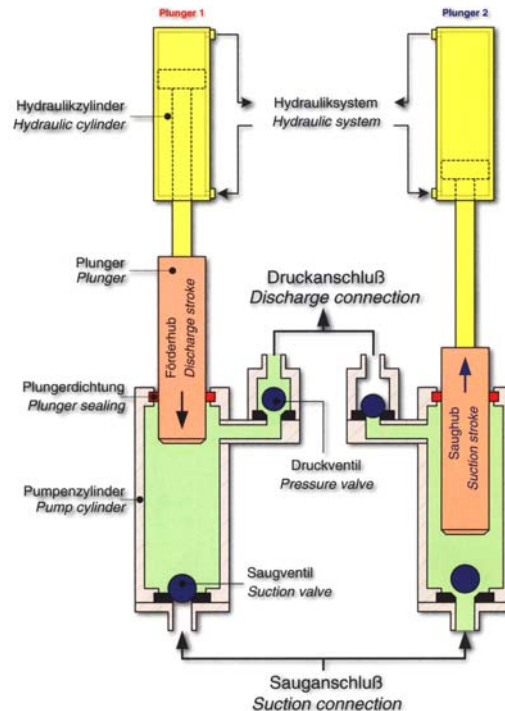


Abbildung 4-15: Doppelpungerpumpe mit Funktionsprinzip

Quelle: Firmeninformation, MAT Mischanlagentechnik GmbH, Immenstadt, 2007

In Vorerprobungen verschiedener Pumpentypen auf dem Gelände der Fa. MAT liefern Plungerpumpen die besten Resultate. Abbildung 4-15 zeigt das Funktionsprinzip einer Doppelpungerpumpe. Die Plunger werden abwechselnd durch ein Hydrauliksystem auf- und abwärts bewegt. Das Material wird dabei auf der einen Seite von unten angesaugt und auf der anderen Seite durch das Eindringen des Plungers nach oben verdrängt und in die Druckleitung gepumpt. Durch die Doppelausführung entsteht ein nahezu kontinuierlicher Förderstrom.

Da die mineralischen Injektionsmaterialien mit zwei spiegelbildlich zueinander angeordneten Doppelpungerpumpen gefördert werden, muss das Mischungsverhältnis über Durchflussmessungen gewährleistet werden. Der Materialdurchfluss wird mit magnetisch induktiven Durchflussmessern (MID) hinter den Injektionspumpen gemessen. Nach einer Kalibrierung der MID an den mineralischen Materialien kann die Durchflussmenge mit einer Genauigkeit von 1 % bestimmt werden. Der Gesamtdurchfluss pro Komponente und die Förderleistung pro Komponente werden auf einem Laptop im Sichtbereich des Maschinenführers angezeigt und in einem Diagramm grafisch verarbeitet (s. Abbildung 4-16).



Abbildung 4-16: Anzeige der Verpressrate und des Injektionsdrucks

Zusätzlich zu den Förderraten werden die Temperatur beider Suspensionen im Mischer und der Injektionsdruck im Injektionspacker gemessen und parallel zu den Durchflüssen angezeigt. Erst die gemeinsame Betrachtung der verbrauchten Materialmenge und des Druckverlaufes ermöglicht eine genaue Einschätzung des bisherigen Injektionsverlaufes und lassen Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Bettungsbereiches der Rohrverbindung und den erzielten Sanierungsstatus zu.

4.5.3 Materialschlauch-, Druckluft/Wasser- und Datenleitungen

Um das Injektionsmaterial im Praxiseinsatz von der Geländeoberkante über den Kanalisationsschacht bis zum Injektionspacker an die schadhafte Muffenverbindung pumpen zu können, muss das Material durch zwei ca. 60 m lange Hochdruckmörtelschläuche gepumpt werden. Zusätzlich müssen auch zur Bedienung des Dreikammerinjektionspackers ein Druckluftschlauch, zur Reinigung des Statikmischers eine Wasserleitung und für die Druckmessung im Injektionspacker ein Datenkabel mitgeführt werden. Für eine baustellen-taugliche Handhabung der verschiedenen Leitungen werden zwei Leitungstrommeln verwendet. Eine große Trommel mit einem Durchmesser von ca. 80 cm und einer Breite von 100 cm wird zum Auftrommeln der beiden Materialleitungen verwendet. Um auch während des Sanierungsbetriebes die Materialleitungen nachführen zu können, ist die Trommel axial auf beiden Seiten mit Drehdurchführungen ausgestattet. Auf einer kleineren Trommel

(Durchmesser 30 cm, Breite 50 cm) werden die Druckluftleitung und die Wasserleitung aufgerollt und ebenfalls über beidseitig, axial angeordneten Drehdurchführungen angeschlossen. Das Datenkabel wird zum Schutz gegen Beschädigungen innerhalb der Druckluftleitungen geführt und über Schleifkontakte aus der Trommel herausgeführt.

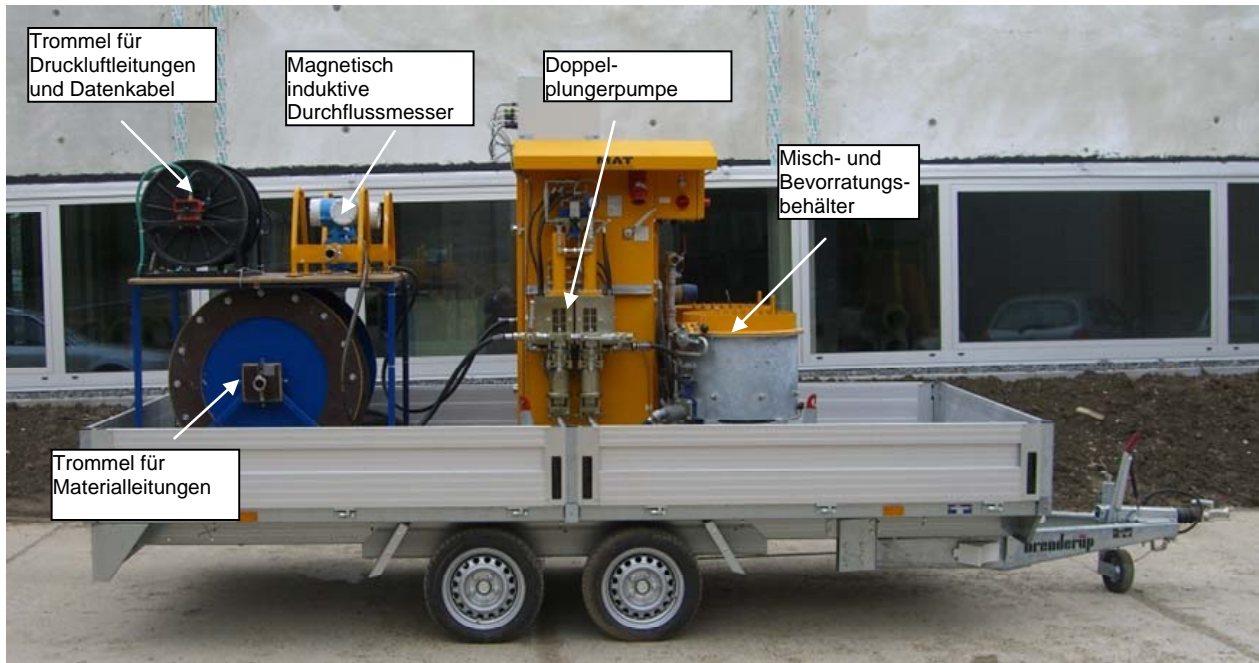


Abbildung 4-17: Mobile Misch- und Injektionsanlage

Für einen mobilen Einsatz der Sanierungsanlage, bestehend aus der Misch- und Injektionsanlage, der Schlauchtrommel für die Materialleitungen und der Schlauchtrommel für Druckluftsteuer- und Wasserleitungen sowie dem Datenkabel werden alle Geräte auf einen 4 m mal 2 m großen Anhänger installiert (s. Abbildung 4-17).

4.6 Injektionspacker mit integrierter Druckmessung

Zur Sanierung von undichten Rohrverbindungen in DN 300 und DN 400 Haltungen werden zwei verschiedenen Injektionspacker hergestellt. Die Konstruktion des DN 300 Packer basiert auf den Erfahrungen des ersten Forschungsvorhabens. Der DN 400 Packer enthält neben der Sanierungseinheit zusätzlich eine Druckprüfeinheit, so dass eine Haltung zunächst mit Luft geprüft und dann eine Sanierung der undichten Rohrverbindungen durchgeführt werden kann.

4.6.1 Injektionspacker DN 300

Im ersten Forschungsvorhaben wurde ein Injektionspacker erprobt, der ursprünglich zum Verpressen von Kunstharzen eingesetzt wurde. Für die Verwendung zementbasierter Injektionsmittel mussten daher einige Änderungen vorgenommen werden. So wurde die Materialleitung im Packer auf einen Durchmesser von 19 mm erweitert, um den Durchfluss des Injektionsmaterials zu erleichtern. Um die Druckverluste zu minimieren, musste zudem ein vorhandener enger 90°-Winkel in der Materialleitung durch einen Rohrbogen mit größerem Biegeradius ersetzt werden. Für diese Konstruktion wurde die Baulänge des Packers erhöht, indem der Stahlhohlzylinder, der die Basis des Packers bildet, herausgetrennt und durch einen längeren Zylinder ersetzt wurde (s. Abbildung 4-18).

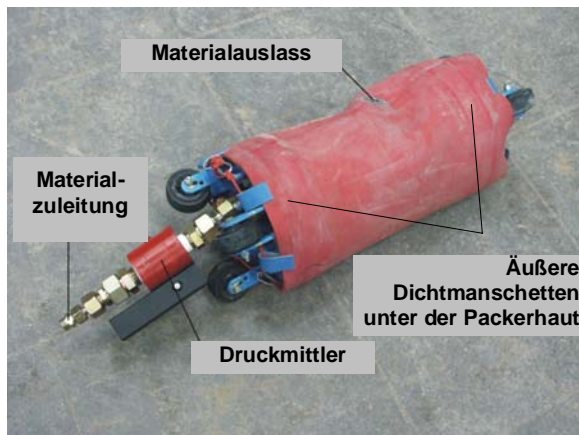


Abbildung 4-18: Alter DN 300 Injektionspacker

Bei dem bisher verwendeten Injektionspacker (Packer DN 300/1) liegen die äußeren Dichtmanschetten daher relativ weit auseinander und sind zusätzlich auf einen Stahlzylinder mit geringem Durchmesser montiert. Daraus ergibt sich bei der Sanierung zwischen der Packerhaut und der Rohrwand ein großer Ringspalt, der zunächst mit Injektionsmaterial gefüllt werden muss, bevor das Material in den zu sanierenden Muffenspalt eindringen kann. Dieses Material kann in der Regel bei der abschließenden Beaufschlagung der Innenblase mit Druckluft nicht mehr vollständig verdrängt werden. Als Folge daraus ergibt sich ein hoher Materialverbrauch, da nach jeder Sanierung einer Rohrverbindung größere Mengen überschüssigen Materials im Rohr haften. Hierdurch wird zusätzlich die abschließende Reinigung des Rohrstrangs nach Beendigung der Sanierung erschwert. In der Bilderserie in Abbildung 4-19 wird der Materialfluss während der Injektion mit dem Packer DN 300/1 visualisiert.

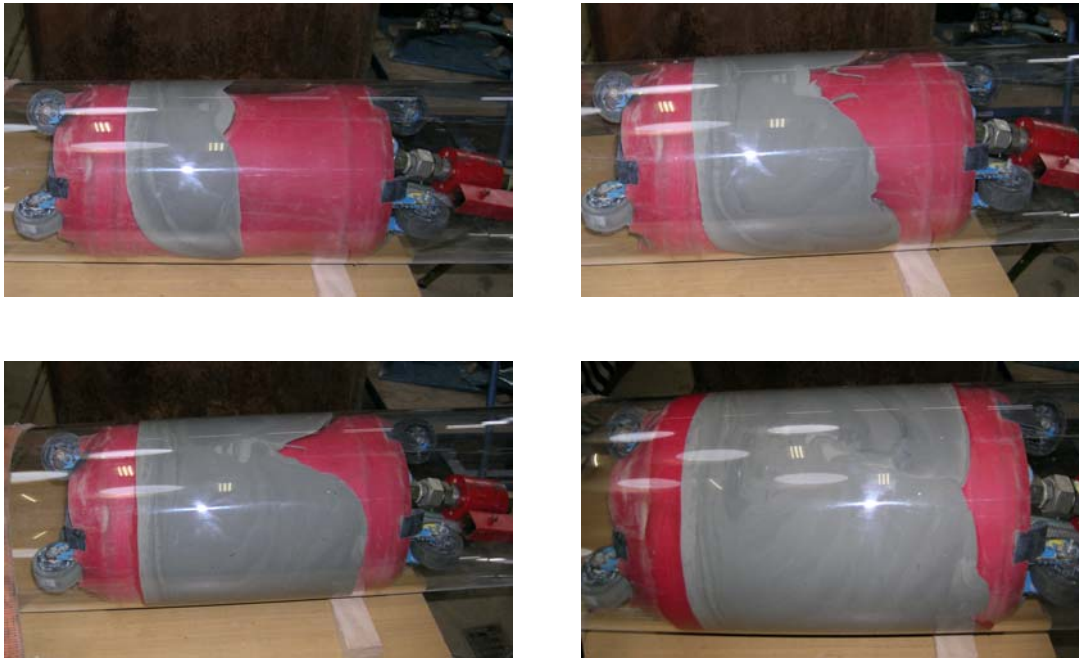


Abbildung 4-19: Bildserie Packer DN 300/1 in Plexiglasrohr

Für die Reduzierung der überschüssigen Materialmengen wird eine bauliche Verringerung des Ringraumes vorgenommen. Hierzu wird der Abstand der äußeren Dichtmanschetten verkleinert und der Durchmesser des Stahlhohlzylinders im Packer vergrößert (s. Abbildung 4-20).

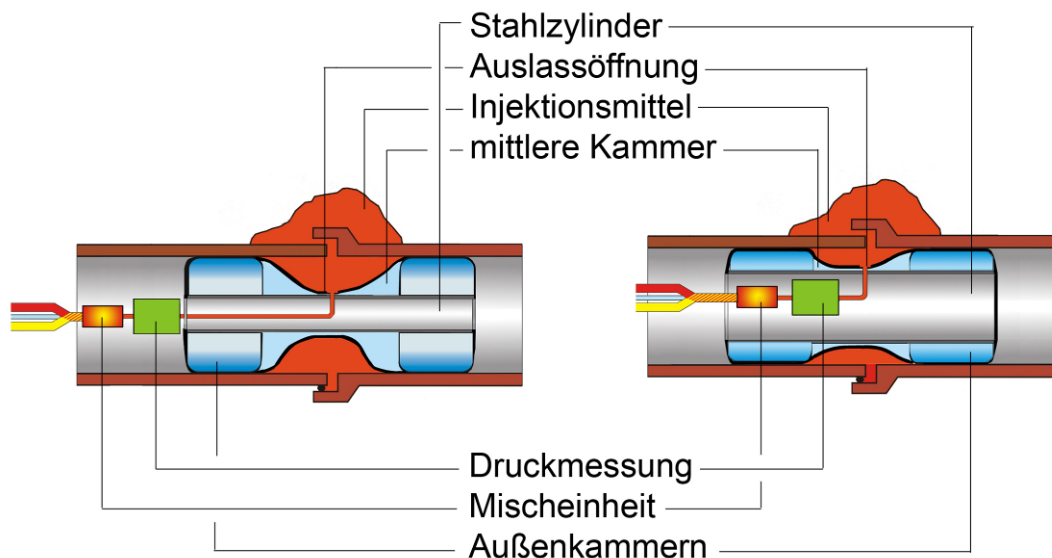
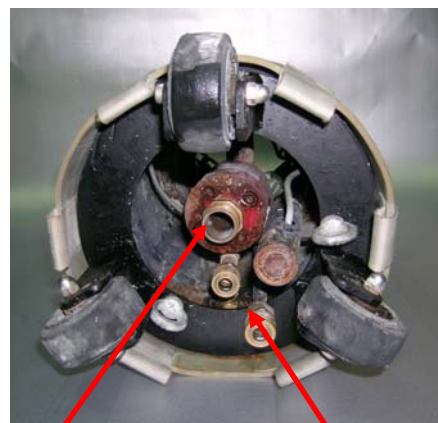
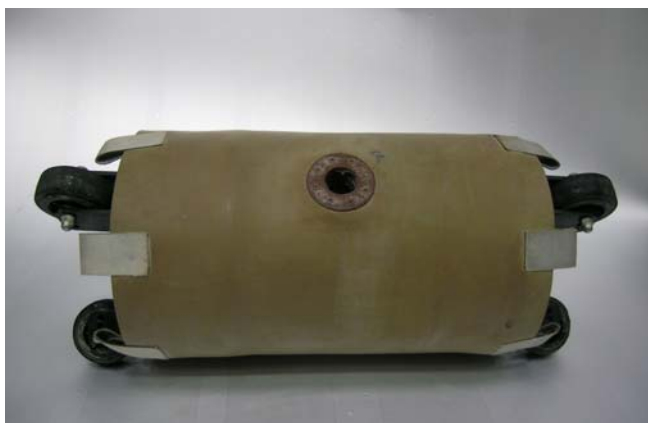


Abbildung 4-20: Injektionspacker DN 300/1 (links) und optimierter Injektionspacker DN 300/2(rechts)

Für eine kontrollierte Injektion ist die Anzeige des Injektionsdrucks unbedingt erforderlich. Da alle verwendeten Injektionsmaterialien thixotrope Materialeigenschaften besitzen und das Material zusätzlich noch am statischen Mischer ansteift, reicht die Aufzeichnung des

Förderdrucks an der Pumpe nicht aus, um Rückschlüsse auf den Injektionsdruck im Packer ziehen zu können. Durch den Reibungswiderstand in den Förderschläuchen und dem statischen Mischer liegt der Injektionsdruck am Packer immer unterhalb des Förderdrucks der Pumpe. Für die Aufzeichnung des am Packer herrschenden Drucks muss daher unmittelbar vor der Austrittsöffnung gemessen werden.

Da eine direkte Druckmessung aufgrund der mineralischen Materialstruktur nicht möglich ist, wird ein ringförmiger Membrandruckmittler eingesetzt. Der Druckmittler trennt durch eine Membran den Messstoff vom Druckmessgerät. Der Leitungsdruck wird über die Membran auf eine Flüssigkeit (Öl) übertragen. Der Flüssigkeitsdruck wird mit elektronischen Druckmessgeräten erfasst und die Daten werden über das in einem Druckluftschlauch mitgeführte Kabel (s. Kapitel 4.5.3) an den Aufzeichnungsrechner übergeben. Die Druckmessung am Injektionspacker mit Hilfe eines Druckmittlers liefert in allen Erprobungen sehr gute Ergebnisse. Für den Einsatz in der Praxis wird der Druckmittler in den Stahlhohlzylinder des neuen Injektionspackers integriert, um ihn vor Beschädigungen zu schützen und den Fließweg der vermischten Komponenten zur Schadstelle zu minimieren (s. Abbildung 4-21).



Druckmittler Druckluftzuleitungen

Abbildung 4-21: Neuer DN 300 Injektionspacker, Seitenansicht (links) und Frontansicht (rechts)

Die Reinigung des statischen Mixers wird nach jeder sanierten Rohrverbindung standardmäßig mit einer Wasserspülung durchgeführt. Hierzu ist allerdings eine separate Wasserleitung mitzuführen. Um diese Leitung möglicherweise einsparen zu können, wird während der Erprobung des DN 300 Packers die Reinigung des statischen Mixers durch das Verpressen der reinen Z - Komponente untersucht. Vorerprobungen zeigen, dass be-

reits geringe Mengen (weniger als 0,5 Liter) ausreichen, um einen Durchfluss der reinen Z – Komponente durch den statischen Mischer zu erzielen. Allerdings beschränkt sich die Reinigungswirkung nur auf einen geringen Querschnittsbereich des statischen Mixers, da die Z – Komponente nur in einer dünnen Ader durch den statischen Mischer fließt.

4.6.2 Injektionspacker DN 400

Der DN 400 Injektionspacker vereint zwei Arbeitsschritte in einem Gerät. Es kann sowohl eine vorlaufende Dichtheitsprüfung durchgeführt werden, als auch eine Sanierung der undichten Rohrverbindungen. Der Packer enthält drei pneumatische Absperrblasen und dazwischen liegend eine Injektionskammer mit Packerhaut und eine Prüfkammer aus Plexiglas. Die Positionierung erfolgt mit Hilfe eines direkt angebauten selbstfahrenden Kamerawagens, dessen Kamerakopf in die Prüfkammer des Packers hineinragt und über einen Rotationsmechanismus durch die Plexiglasscheibe eine zielgenaue Positionierung an der Rohrverbindung erlaubt (s. Abbildung 4-22).

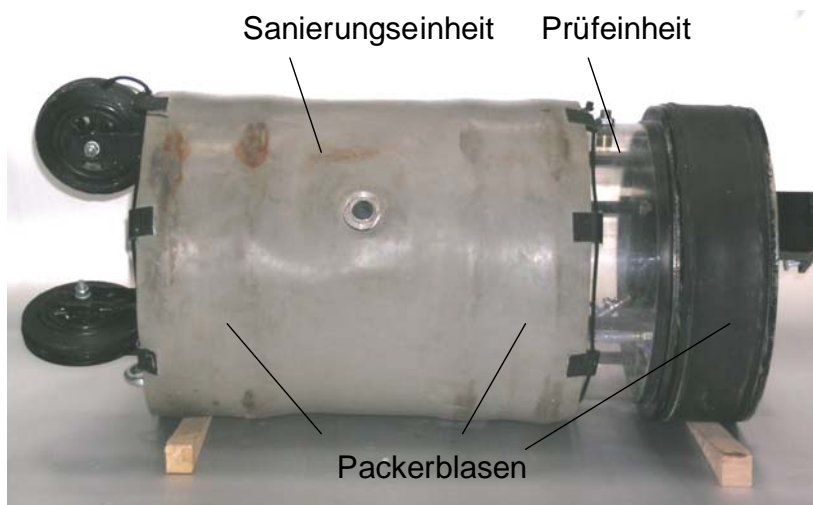


Abbildung 4-22: DN 400 Packer mit Injektionseinheit (links) und Prüfeinheit (rechts)

Die Konstruktion des DN 400 Injektionspackers erfolgt nach der Erprobung des Packers DN 300/2. Hierbei hat sich gezeigt, dass zur Erhöhung der Betriebssicherheit ein Spülen des statischen Mixers mit Wasser direkt im Anschluss an das Injektionsende erforderlich ist, damit sich der statische Mischer nicht infolge der Materialreaktion zusetzt. Die Spülung mit der Z – Komponente ist zwar grundsätzlich geeignet, unterliegt jedoch einem höheren Betriebsrisiko als die wirksamere Wasserspülung. Bei dem DN 300 Packer kann die Wasserspülung jedoch erst vorgenommen werden, wenn die Packerblasen entlüftet sind und

der Packer aus dem Sanierungsbereich gezogen wurde, da bei der Wasserspülung ebenfalls die Injektionsöffnung verwendet wird. Für eine ausreichende Standsicherheit des Injektionsmaterials ist jedoch eine Wartezeit von ca. 3 Minuten erforderlich, in denen der Packer als Schalung an der Sanierungsstelle verweilen muss. In dieser Zeit reagiert das Material auch im statischen Mischer und kann dann zu Verstopfungen führen.

Um direkt im Anschluss an das Injektionsende und noch während der Wartezeit den statischen Mischer mit Wasser spülen zu können, wird hinter dem Druckmittler ein Rohr – T – Stück angeordnet. Das Material kann entweder in Richtung Injektionsöffnung oder in Richtung Spülöffnung fließen. Während der Sanierung fließt es in radialer Richtung zur Auslassöffnung. In diesem Zeitraum ist die Spülöffnung durch ein Membranventil verschlossen. Nach dem Injektionsende wird das Membranventil geöffnet, so dass der statische Mischer gespült werden kann, ohne den Injektionspacker aus der Sanierungsposition entfernen zu müssen. Durch diese Maßnahme kann ein Verstopfen des statischen Mixers vermieden werden (s. Abbildung 4-23).

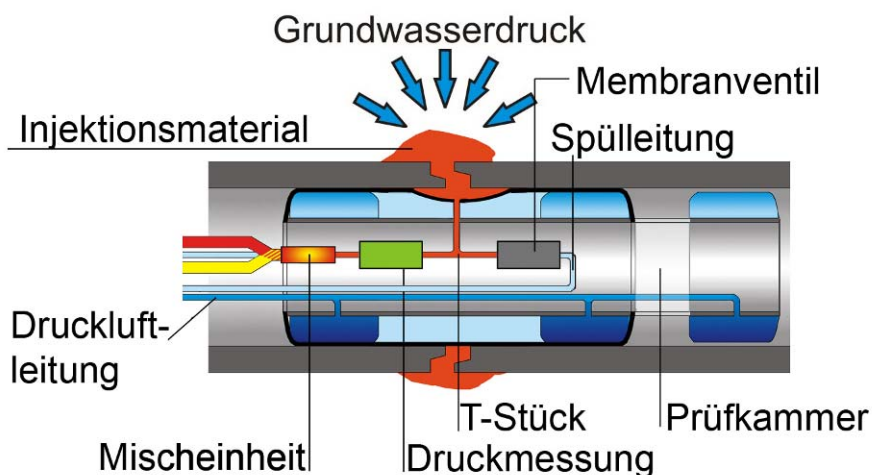


Abbildung 4-23: Injektionspacker DN 400 mit Spülleitung und Prüfkammer

Des Weiteren zeigt sich bei der Erprobung des Packers DN 300/2, dass allein eine bauliche Veränderung gegenüber dem Packer DN 300/1 die überschüssigen Anhaftungen an der Packerhaut nicht vollständig vermeiden kann. Mit dem DN 400 Packer besteht die Möglichkeit, die Injektionsöffnung mithilfe des angebauten Kamerafahrwagens exakt über der Rohrverbindung zu platzieren. Daher wird zur Materialverteilung der überschüssige Injektionsraum zwischen den Außenblasen nicht mehr benötigt und die mittlere Packer-

kammer kann schon vor der Injektion aufgeblasen werden. Die Packerhaut legt sich dann an die Rohrwand an und das Material wird nur noch im Muffenspalt verteilt. Nach Beendigung der Sanierung verbleiben nur noch sehr geringe Materialreste am Packer.

4.7 Reinigungsmolch

Im Anschluss an die Sanierung einer Haltung muss der Rohrstrang von den Materialresten gereinigt werden, die bei der Injektion an den Innenwänden der Rohre haften bleiben. Die Materialreste sind aufgrund der Materialzusammensetzung auch nach Abschluss der Sanierungsarbeiten noch nicht erstarrt, sondern plastisch verformbar. Der Einsatz von Wasserstrahlen für die Reinigung scheint nicht geeignet, da das Injektionsmaterial aus der frisch sanierten Schadstelle herausgelöst werden könnte.

Im Rahmen des ersten Forschungsvorhabens wurde die Reinigung mit Absperrblasen durchgeführt, die mit geringem Anpressdruck durch den Rohrstrang gezogen wurden und dabei das überschüssige Material abstreifen.

Da in den jeweils neu verlegten, vergleichsweise kurzen Teststrecken (max. 10 m) in der ibb - Institutshalle keine Ablagerungen oder Lageabweichungen vorhanden waren, konnte ein relativ hoher Anpressdruck der Gummiblase eingestellt werden, ohne dass die Absperrblase infolge von Hindernissen eingeklemmt wurde. Durch den hohen Anpressdruck an der Rohrwand konnte so eine ausreichende Reinigungsleistung erzielt werden. In der Praxis muss hingegen mit Ablagerungen, Lageabweichungen und größeren Haltungslängen gerechnet werden, die ein Durchziehen der Blase bei gleichzeitig hohem Anpressdruck erschweren. Daher wird eine andere Reinigungsmethoden entwickelt und erprobt.



Abbildung 4-24: Reinigungsmolche zur Rohrreinigung
Quelle: Firmeninformation, Stocksiefen GmbH, Asbach, 2006

Reinigungselemente, die speziell für das Abstreifen von Inkrustationen von Rohrwänden konzipiert sind, werden in Abbildung 4-24 dargestellt. Bei der angewandten Reinigungstechnik handelt es sich um ein rein mechanisches Arbeitsprinzip. Die Inkrustationen werden durch die Oberflächenstruktur des Molches gelöst, zerkleinert und herausgespült. Es wird zwischen selbstfahrenden Vollquerschnittmolchen (Abbildung 4-24, links) und einziehbaren Manschettens- oder Scheibenmolchen (Abbildung 4-24, rechts) unterschieden. Die selbstfahrenden Vollquerschnittmolche werden durch Wasserdruck angetrieben. Die Position kann jederzeit über einen eingebauten Sender erfasst werden. Für den vorliegenden Anwendungsfall eignen sich die Vollquerschnittmolche jedoch nicht, da die Beton und Steinzeughaltungen nicht für den erforderlichen Antriebswasserdruck von bis zu 10 bar ausgelegt sind. Für die Reinigung von Kanalleitungen werden daher die Manschettens- oder Scheibenmolche eingesetzt, da diese nicht mit Wasserdruck vorangetrieben werden, sondern mit einer Seilwinde durch die Rohrleitung gezogen werden.

Für ein Reinigungselement, das abschließend durch den Rohrstrang durchgezogen wird, ist die Verwendbarkeit unterschiedlicher Oberflächenstrukturen zu prüfen. Durch eine optimale geometrische und materialspezifische Ausbildung der Abstreifelemente kann die Reinigungsleistung im Vergleich zu den bisher provisorisch zur Reinigung eingesetzten Absperrblasen deutlich gesteigert werden.

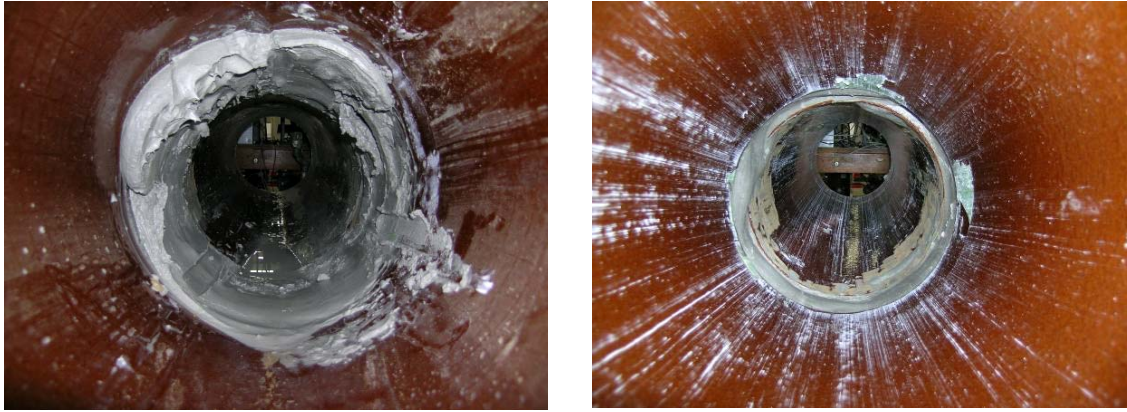


Abbildung 4-25: Sanierte Muffe vor der Reinigung (links) und nach der Reinigung (rechts)

In Versuchsreihen mit Ablagerungen von überschüssigem Injektionsmaterial in Steinzeug- und Betonrohren werden verschiedenen Geometrien und Materialien erprobt (s. Abbildung 4-25). Gute Ergebnisse können mit dem in Abbildung 4-26 dargestellten Molch erreicht werden. Mit vier ca. 5 mm dicken Polyurethanlammeln, die im Durchmesser ca. 10 mm größer sind als der zu reinigende Kanal, können bei mehrmaligem Durchziehen die Materialreste weitgehend entfernt und ein glatter Oberflächenabschluss in der Rohrfuge erzeugt werden.

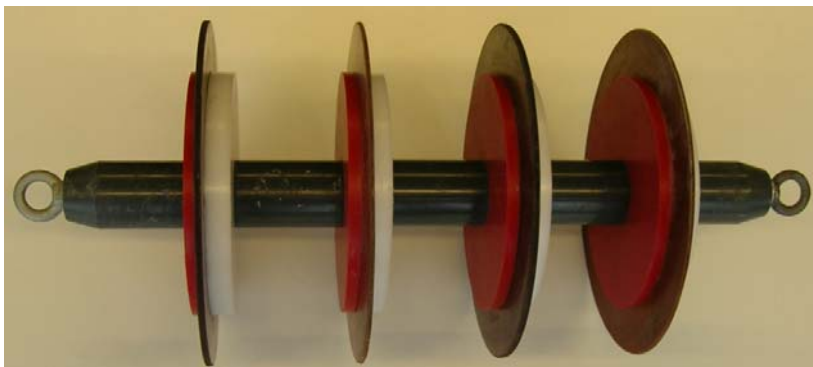


Abbildung 4-26: Reinigungsmolch

5 Praxisnahe Sanierungsversuche

Die praxisnahen Sanierungsversuche werden zunächst an einzelnen Rohrverbindungen durchgeführt, um das neu entwickelte Material zu erproben. Im Anschluss an die Materialerprobung werden präparierte Kanalstrecken in einer Länge von 10 m praxisnah von Schacht zu Schacht saniert. Um die Hochdruckspülfestigkeit zu untersuchen, werden Steinzeugrohre offen verlegt und saniert. Anschließend wird die Hochdruckspülfestigkeit in einem Spülversuch getestet.

5.1 Sanierung einzelner Rohrverbindungen

5.1.1 Versuchsaufbau

Die praxisnahe Materialerprobung des weiterentwickelten Materials (s. Kapitel 4.1, S. 8) erfolgt zunächst an einzelne Rohrverbindungen. In den Versuchen soll die verfahrenstechnische Eignung des Materials bei verschiedenen Rohrmaterialien und Rohrbettungsarten sowie unter dem Einfluss von Grundwasser untersucht werden. Für die Sanierung einzelner Rohrverbindungen werden spezielle Versuchskästen aus Stahl verwendet, in denen anstehendes Grundwasser während der Injektion simuliert werden kann. Die Versuchskästen bestehen aus einem Rahmen aus U-Profilen, an denen die Bodenplatte und zwei gegenüberliegende Seitenwände angeschweißt sind. Die beiden anderen Seitenwände können mit Hilfe eines Krans eingesetzt und nach der Sanierung wieder herausgezogen werden. Auf diese Weise kann der Sanierungskörper ohne Beschädigungen von der Seite freigelegt werden. Die genauen Maße der Versuchskästen sind in Abbildung 5-1 dargestellt.

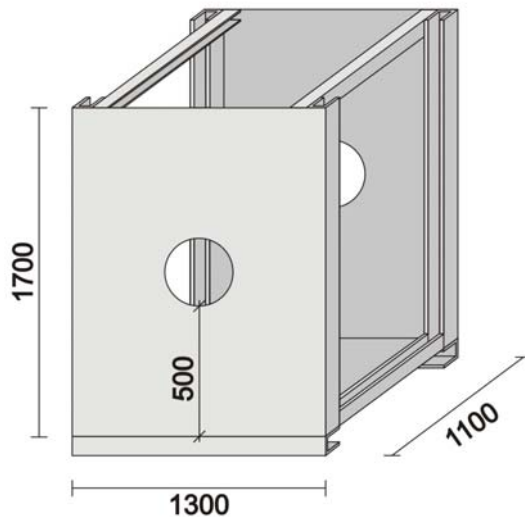


Abbildung 5-1: Versuchskasten mit freigelegtem Injektionskörper (links), Abmessungen (rechts)

In der Versuchsreihe der Einzelrohrverbindungen werden folgende Versuchsparameter variiert:

- Rohrwerkstoff (Steinzeug / Beton)
- Bettung (geringe / hohe Lagerungsdichte; mit / ohne Kies zur Simulation von Hohlräumen)
- Grundwasserdruck (mit / ohne Grundwasserdruck)
- Abflusssimulation (mit / ohne Beaufschlagung der frisch sanierten Muffenverbindung durch eine kontinuierliche Strömung)

Rohrwerkstoff

Für die Versuche werden DN 300 Steinzeug- und Betonrohre verwendet. Die Rohrverbindungsgeometrie ist bei beiden Rohrmaterialien eine Steckmuffenverbindung, die aus einem Spitz- und einem Muffenende besteht. Die Rohre haben eine Länge von 2,0 m und werden in der Mitte durchtrennt. Anschließend werden die beiden Rohrstücke mit Spitz- und Muffenende ineinander geschoben (s. Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: Steinzeugrohre

Die Kanalrohre werden beim Einbau nicht vollkommen ineinander gesteckt, sondern durch auf den Rohrspiegel aufgeklebte Abstandshalter mit einem Muffenspalt von 1 bis 2 cm eingebaut. Bei den Rohren wird die werksseitig montierte Dichtung an den Spitzenden entfernt. Um dennoch einen zentrischen Einbau zu gewährleisten, wird beim Heraustrennen der Dichtung jeweils in den Drittelpunkten ein kurzes Teilstück stehen gelassen.

Bettung

Die Versuchskästen werden mit einem weitgestuften Kies-Sand-Gemisch (Versuchsboden, s. Sieblinie in Abbildung 5-3) bei geringem oder hohem Verdichtungsgrad gefüllt. Der unmittelbar an der Rohrverbindung anstehende Boden besteht wahlweise aus dem Versuchsboden oder aus einer lokalen Kiespackung (Kies 16/32). Die Kiespackung wird um die Rohrverbindung angeordnet und dient der Simulation von Bodensauspülungen, die infolge von Grundwasserinfiltrationen an Rohrverbindungen entstehen können.

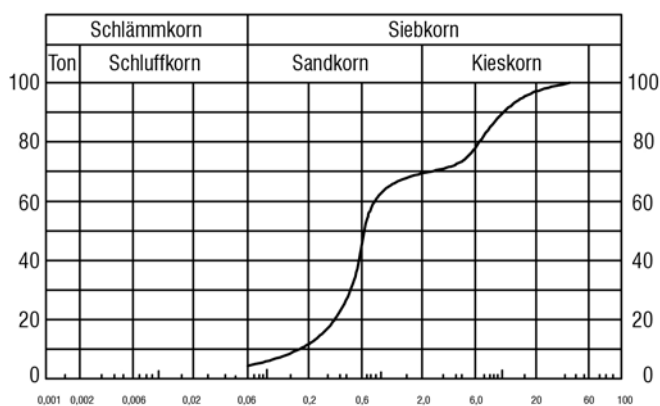


Abbildung 5-3: Sieblinie des Versuchsbodens

Simulation des Grundwasserdrucks

Für die Versuche mit simuliertem Grundwasserstand werden die Fugen der Stahlkästen abgedichtet, um eine Wasserfüllung bis zur Oberkante zu ermöglichen. Die Sohle der Rohrverbindung befindet sich in diesem Fall 1,20 m unterhalb der Wasseroberfläche. Nach entsprechender Vorfüllzeit fließt das Wasser durch die schadhafte Muffe in die Rohre und wird in einem Behälter vor dem Versuchskasten aufgefangen. Von dort wird das Wasser kontinuierlich mit einer Tauchpumpe wieder in den Versuchskasten gefördert, um den Wasserdruck konstant zu halten (Abbildung 5-4).



Abbildung 5-4: Vorerprobung mit Grundwassersimulation

Unmittelbar nach dem Ausbau des Injektionspackers ist bereits eine erste Einschätzung des Sanierungserfolges möglich, da im Falle einer dichten Rohrverbindung kein Wasser mehr in das Rohr eintritt.

Abflusssimulation

Nach der Sanierung kann die frisch injizierte Muffenverbindung mit einer kontinuierlichen Strömung beaufschlagt werden. Hierdurch soll überprüft werden, ob das noch plastisch verformbare Injektionsmaterial infolge eines hohen Abflusses durch die entstehenden Schleppspannungen aus der Fuge ausgewaschen wird. Mit Hilfe einer Absperrblase mit Durchgang wird das eine Ende des sanierten Rohrstrangs abgedichtet und ein hoher Wasserdurchfluss über den Blasendurchgang eingeleitet. Am freien Ende des Rohrstrangs

wird das Wasser in einem Behälter aufgefangen und durch eine Tauchpumpe wieder zurückgepumpt (s. Abbildung 5-5).

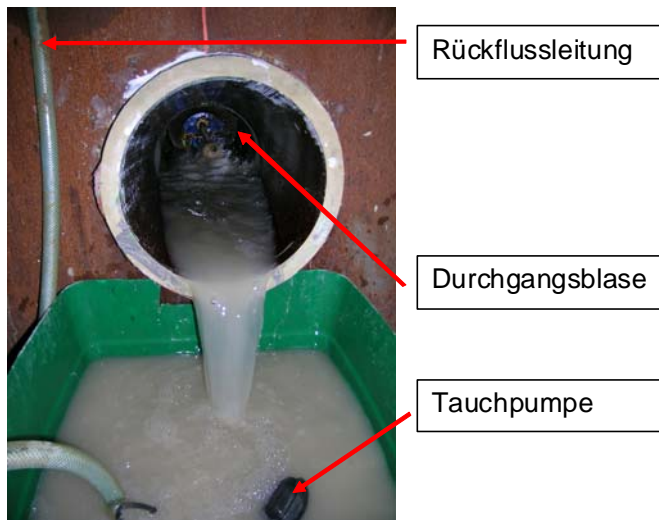


Abbildung 5-5: Strömungssimulation

Aus den beschriebenen Sanierungsrandbedingungen werden im Folgenden exemplarisch zwei Versuche vorgestellt:

Versuch 1

- Betonrohr DN 300
- Versuchsboden mit geringer Lagerungsdichte
- ohne Grundwassergegendruck
- keine Abflusssimulation nach der Sanierung

Versuch 2

- Steinzeugrohr DN 300
- Versuchsboden mit hoher Lagerungsdichte und einer Kiespackung um die Rohrverbindung
- mit Grundwassergegendruck (ca. 1,2 m)
- Abflusssimulation durch eine kontinuierliche Strömung

5.1.2 Versuchsdurchführung

Der Ablauf der Versuchsdurchführung kann in folgende Teilschritte untergliedert werden:

- Einbau und Verdichtung des Bodens bis zur Unterkante der Aussparungen für die Rohre (Rohraufleger)
- Einbau der Rohre und ggf. der Kiespackungen zur Simulation von Hohlräumen im Bereich der Rohrverbindung
- Einbau und Verdichtung des restlichen Bodens sowie Aufbringen einer zusätzlichen Auflast mit Stahlwürfeln (4 Würfel á 0,5 t je Versuchskasten)
- ggf. Erstellen einer Wasserhaltung zur Simulation des Grundwassers
- Injektion der Rohrverbindung
- ggf. Simulation einer kontinuierlichen Abflussströmung
- Untersuchung der sanierten Rohrverbindungen mittels Wasserdruckprüfung (1 Woche nach der Injektion)
- Freilegen und optische Kontrolle der sanierten Rohrverbindung

Das Injektionsmaterial wird in der Regel in mehreren Zyklen mit Verpressdauern von jeweils ca. 2 Minuten eingebracht. Im Falle eines deutlichen Druckanstieges wird die Injektion sofort unterbrochen und der Druckabfall beobachtet: Fällt der Druck schnell ab, wird dies als Indiz gewertet, dass die Hohlräume noch nicht vollständig verfüllt sind. Die Injektion wird dann für einen Zeitraum von ca. 2 bis 3 Minuten unterbrochen und anschließend fortgesetzt. Innerhalb dieser Injektionspause kann das bereits verpresste Material ansteifen und so die Injektionsreichweite für die nachfolgenden Zyklen reduziert werden. Bleibt beim nächsten Zyklus der Druckanstieg auch nach dem Ausschalten der Pumpe erhalten, wird die Injektion der Rohrverbindung beendet. Weiter Kriterien zur Beendigung der Injektion sind das Austreten von Injektionsmaterial aus dem Versuchskasten oder an der Oberfläche sowie ein unverhältnismäßig hoher Materialverbrauch. Zum Abschluss der Sanierung wird nach dem letzten Verpressvorgang die mittlere Kammer des Packers mit einem Druck von 2 bar beaufschlagt, so dass der Packer während der Beschleunigerwirkung als Schalung dient. Anschließend wird der Packer ausgebaut und die Rohrleitung mit dem Molch gereinigt.

Sieben Tage nach der Injektion wird eine Wasserdichtheitsprüfung mit dem Dichtheitsprüfgerät BSP 2500 der Fa. Hecht Electronic, Besigheim, durchgeführt (s. Abbildung 5-6).

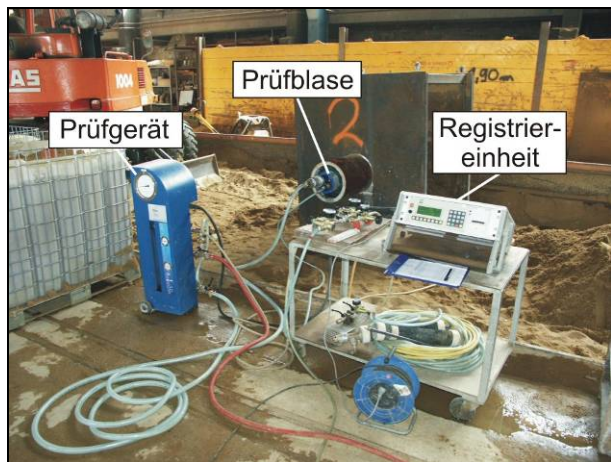


Abbildung 5-6: Wasserdichtheitsprüfung

Nach DIN EN 752-5 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 5: Sanierung“ sind an sanierte Kanalabschnitte die gleichen Dichtheitsanforderungen wie an neu verlegte Abwasserkanäle zu stellen. Daher gelten die Regelungen der DIN EN 1610 (neue Leitungen) auch für sanierte Abwasserleitungen. Gemäß DIN EN 1610 beträgt der maximal zulässige Wasserverlust bei der Dichtheitsprüfung mit Wasser $0,15 \text{ l/m}^2$ bezogen auf die Rohrrinnenfläche. Für die Einzelprüfung von Rohrverbindungen wird eine Länge von $1,0 \text{ m}$ für die Berechnung der Innenfläche angesetzt. Der maximale Prüfdruck ist in der DIN EN 1610 mit 500 mbar festgelegt. Der Prüfzeitraum, während dessen der Prüfdruck aufrecht gehalten werden muss, beträgt 30 Minuten . Innerhalb dieses Zeitraumes werden Wasserverluste im Prüfraum fortwährend durch eine Wasserzugabemenge ausgeglichen, so dass der Druck konstant bleibt. Diese Wasserzugabemenge wird von der Registriereinheit angezeigt und protokolliert.

5.1.3 Versuchsergebnisse

In Versuch 1 wird die Betonrohrverbindung mit dem in Abbildung 5-7 dargestellten Injektionsprotokoll saniert. In dem Protokoll werden über die Injektionszeit (Abszisse) die verpressten Materialmengen (linke Ordinate) und der Injektionsdruck (rechte Ordinate) aufgezeichnet.

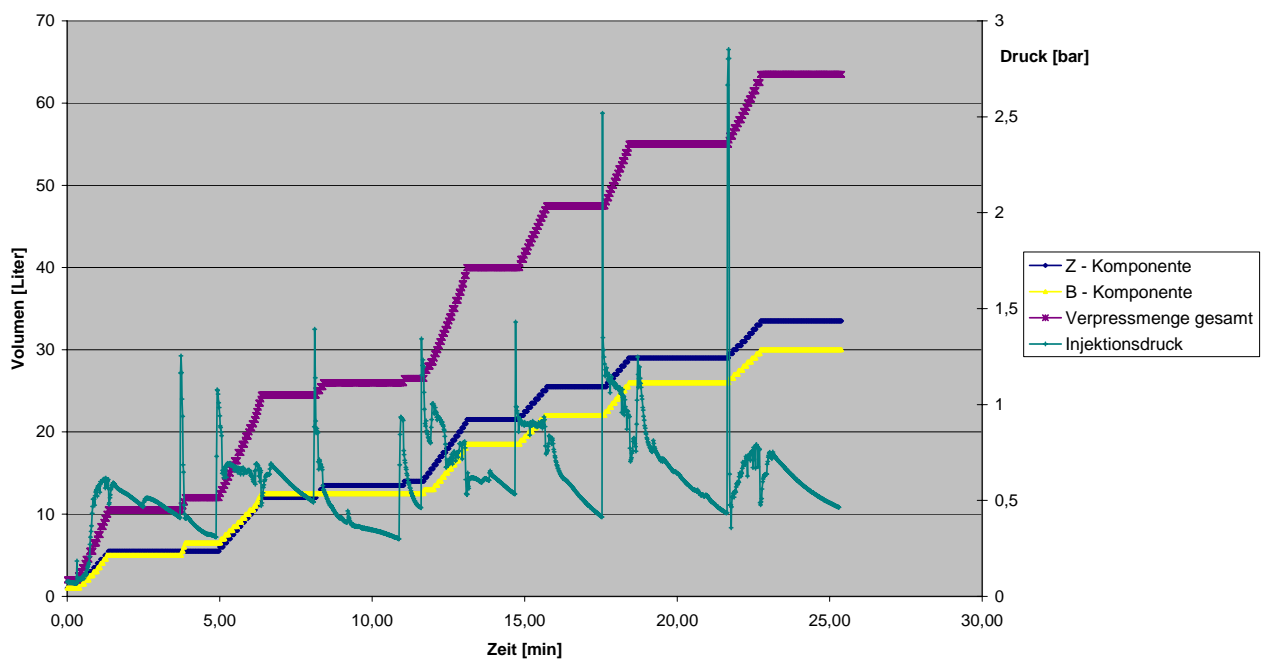


Abbildung 5-7: Injektionsprotokoll über die Sanierung der Betonrohrverbindung (Versuch 1)

Die optimierten Materialkomponenten (s. Kapitel 4.1) können mit der neuen Misch- und Injektionsanlage gut verarbeitet werden. Da der Versuchsboden im Leitungszonenbereich mit einer sehr geringen Lagerungsdichte eingebaut ist, werden in mehreren Injektionszyklen sehr große Mengen Injektionsmaterial verpresst, ohne dadurch hohe Injektionsdrücke zu erreichen. Der Versuchsboden wird sehr leicht aufgerissen, so dass das Injektionsmaterial auch bei geringen Drücken in großen Mengen verpresst werden kann. Die Injektion wird aufgrund der enormen Verpressmengen nach ca. 25 Minuten abgebrochen. Nach einer Woche Erhärtungszeit kann der Sanierungserfolg durch die Dichtheitsprüfung nachgewiesen werden. In Abbildung 5-8 ist die sanierte Rohrverbindung von innen und der Injektionskörper dargestellt. Durch die Molchreinigung wird das überschüssige Material entfernt und ein glatter Übergang erzeugt. Außerhalb der Rohrverbindung verläuft das Injektionsmaterial als großer Abdichtungskörper entlang des Rohres, da es den locker gelagerten Versuchsboden seitlich verdrängt hat.



Abbildung 5-8: Sanierte Betonrohrverbindung

In der Regel ist die Lagerungsdichte von realen Kanalhaltungen jedoch höher, so dass in-situ mit geringeren Verpressmengen und höheren Injektionsdrücken zu rechnen ist.

Bei der im 2. Versuch sanierten Steinzeugrohrverbindung wird das in Abbildung 5-9 abgebildete Injektionsprotokoll aufgenommen. Durch die hohe Lagerungsdichte hinter der Kiespackung wird in zwei Zyklen nur der durch die Kiespackung simulierte Hohlraum aufgefüllt. Schon während der Injektion in die Kiespackung steigt der Injektionsdruck auf über 1 bar an. Da der Druck nach dem ersten Injektionszyklus in der Injektionspause noch deutlich abfällt, wird nach ca. 2 Minuten erneut verpresst. Im zweiten Injektionszyklus steigt der Druck bis auf ca. 1,7 bar und fällt in der Injektionspause nicht mehr ab. Daher wird die Injektion beendet und zum Abschluss die Mittelkammer des Packers mit ca. 2 bar Luftdruck beaufschlagt. Dies führt zu einem Injektionsdruckanstieg (s. Minute 7) ohne, dass Material verpresst wird, da der Luftdruck über das Material auf den Druckmittler übertragen wird.

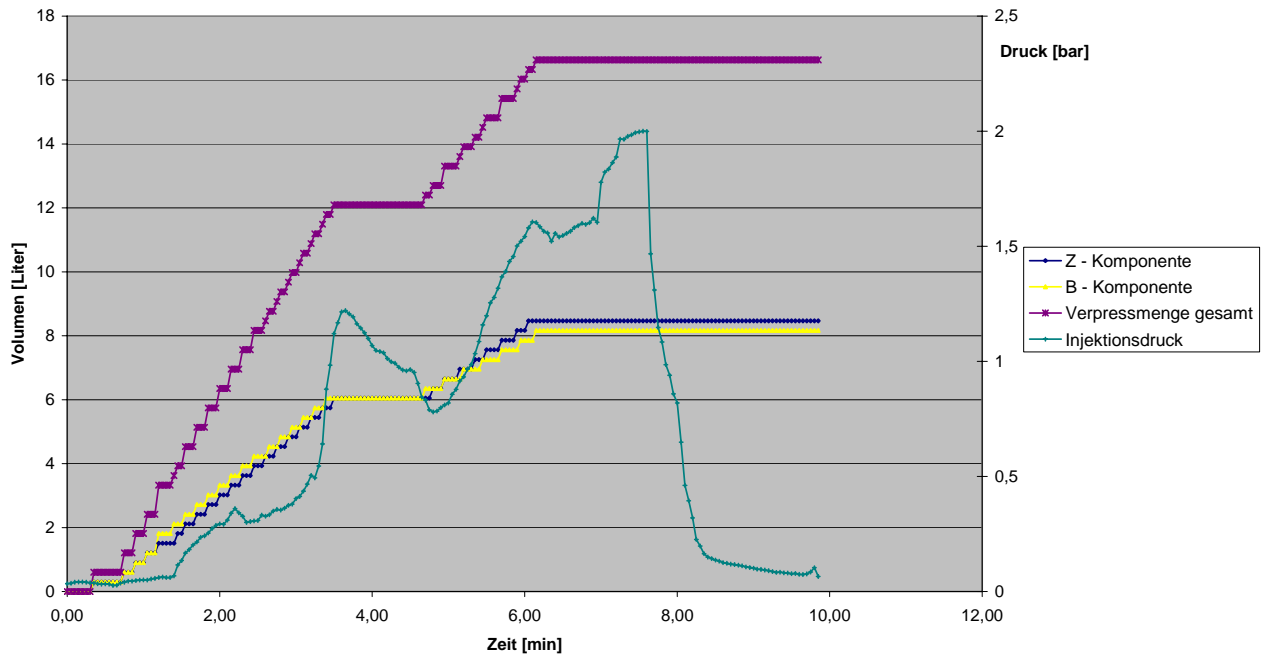


Abbildung 5-9: Injektionsprotokoll über die Sanierung der Steinzeugrohrverbindung (Versuch 2)

Nach der Sanierung wird die Rohrverbindung mit dem Molch gereinigt und optisch überprüft. Im Versuch wird die Sanierung gegen einen Grundwassergegendruck durchgeführt, so dass direkt eine Beurteilung der Sanierung vorgenommen werden kann. Da nach Abschluss der Sanierungsarbeiten kein Wasser von außen durch die Rohrverbindung eindringt, kann von einer erfolgreichen Sanierung ausgegangen werden. Im Anschluss an die Sanierung wird die frisch sanierte Fuge mehrere Stunden lang einer starken Abflussströmung ausgesetzt (s. Abbildung 5-5). Eine optische Beurteilung nach der Abflusssimulation zeigt keine Erosionserscheinungen infolge der Schleppspannungen. Daher kann das Material bereits kurz nach der Injektion als erosionsstabil eingestuft werden.



Abbildung 5-10: Sanierte Steinzeugrohrverbindung

Die nach 7 Tagen durchgeführte Dichtheitsprüfung bestätigt den Sanierungserfolg. Die Freilegung des Injektionskörpers zeigt die volle Verfüllung der Kiespackung umlaufend um die Rohrverbindung (s. Abbildung 5-10).

5.2 Sanierung präparierter Kanalhaltungen

Die Sanierungen einzelner Rohrverbindungen lassen keine abschließende Beurteilung des Injektionsmaterials und der verwendeten Gerätetechnik zu. Bei dem geplanten Praxiseinsatz erstrecken sich die Sanierungsarbeiten über Zeiträume von mehreren Stunden, innerhalb derer es zu längeren Stillstandszeiten der Injektionspumpe kommen kann. Für die praktische Anwendung des neuen Sanierungsverfahrens ist es daher wichtig, dass

- bei Stillstandszeiten keine Verstopfungen in den Pumpenventilen oder den Materialschläuchen auftreten,
- der statische Mischer nicht durch erhärtete Materialreste in seiner Funktion eingeschränkt wird,
- der Injektionspacker nicht durch das an der Außenhaut haftende, angesteifte Injektionsmaterial die Injektion von frischem Material in die Schadstelle verhindert und
- die Suspensionen während der Vorhaltezeit in den Materialbehältern nicht so weit ansteifen, dass sie nicht mehr verarbeitet werden können.

Vor der In-situ-Erprobung werden daher in praxisnahen Versuchen Rohrhaltungen mit verschiedenen Randbedingungen in der Institutsversuchsbahn verlegt und mit der neuen Gerätetechnik saniert.

5.2.1 Versuchsaufbau

Für die praxisnahe Erprobung werden 4 Teststrecken aus Steinzeug- oder Betonrohren verlegt. Hierzu werden kurze Rohre ausgewählt, um möglichst viele Rohrverbindungen innerhalb einer Teststrecke sanieren und prüfen zu können. Die eingebauten Betonrohre

haben eine Standardlänge von 1,0 m, während bei den Teststrecken aus Steinzeug auf so genannte „Gelenkstücke“ mit einer Länge von 0,7 m zurückgegriffen wird. In den Teststrecken werden folgende Versuchsparameter variiert:

- Rohrwerkstoff (Steinzeug / Beton)
- Bettung (geringe / hohe Lagerungsdichte; mit / ohne Kies zur Simulation von Hohlräumen)
- Anzahl der Rohrverbindungen (6, 7, 10)
- Schadstellengeometrie (Schadstellengröße und –position)
- Injektionsmaterial (Institutszusammensetzung, HeidelbergCement – Sackware)

Die ersten beiden Versuchsrandbedingungen wurden bereits im Kapitel 5.1.1 näher erläutert.

Anzahl der Rohrverbindungen

Für die Versuche werden fabrikneue DN 300 Steinzeug- und Betonrohre verwendet. Die Rohre werden als Haltung zwischen zwei Betonschächten verlegt. Über den Abstand der Schächte und die unterschiedlichen Längen von Steinzeug- und Betonrohre werden die 4 Haltungen mit 6, 7 oder 10 Rohrverbindungen vorbereitet.

Schadstellengeometrie

Die Steinzeug- und Betonrohre werden werkseitig mit fest applizierten Gummidichtungen angeliefert. Zur Simulation einer Schadstelle werden die Dichtelemente entfernt. Die Größe und Position der Schadstellen unterscheidet sich in drei verschiedene Schadstellengeometrien (s. Abbildung 5-11):

- Entfernung eines ca. 5 cm breiten Streifens der Dichtung in der Firste
- Entfernung eines ca. 5 cm breiten Streifens der Dichtung im Kämpfer
- Fast vollständige Entfernung der Dichtung, bis auf drei Stellen zum zentrierten Einbau der Rohrverbindung



Abbildung 5-11: Unterschiedliche Schadstellengeometrien

Die Breite des Muffenspaltes wird beim Zusammenstecken der Rohre über den Einbau von 10 mm breiten Abstandshaltern definiert.

Injektionsmaterial

Die Haltungen 1 und 2 werden noch mit dem Injektionsmaterial saniert, das im Rahmen der Materialoptimierung am Institut im Labormaßstab (s. Kapitel 4.1) hergestellt wurde. Die Haltungen 3 und 4 werden mit dem von HeidelbergCement industriell in Sackware hergestellten Material (s. Kapitel 4.4) saniert.

In Abbildung 5-12 bis Abbildung 5-15 sind die 4 Sanierungsstrecken mit den jeweiligen Versuchsrandbedingungen dargestellt:

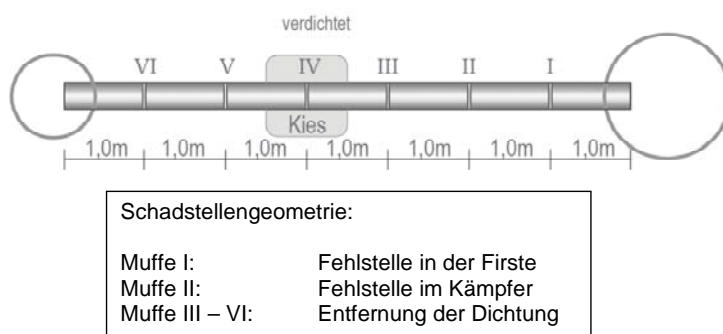


Abbildung 5-12: Sanierungsstrecke 1, Betonrohrhaltung

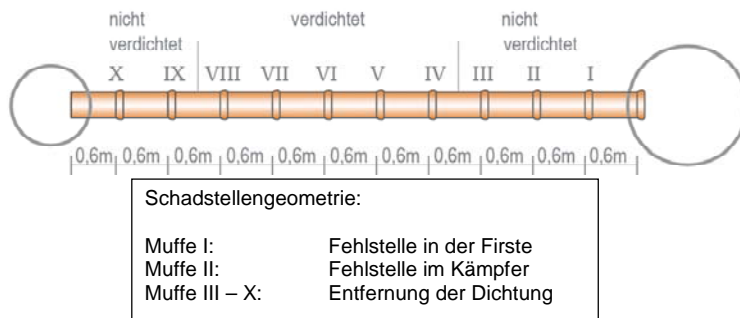


Abbildung 5-13: Sanierungsstrecke 2, Steinzeugrohrhaltung

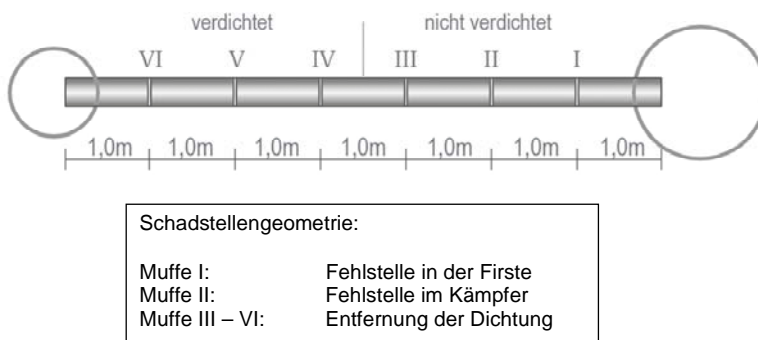


Abbildung 5-14: Sanierungsstrecke 3, Betonrohrhaltung

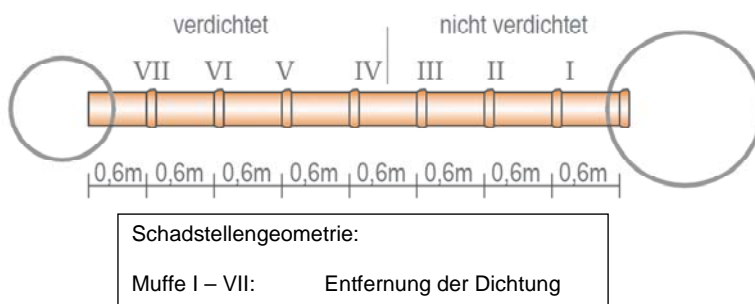


Abbildung 5-15: Sanierungsstrecke 4, Steinzeugrohrhaltung

5.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der praxisnahen Erprobung in den Teststrecken lässt sich in die folgenden Arbeitsschritte untergliedern:

- Einbau der Rohre und ggf. Anordnung der Kiespackungen
- Einbau und Verdichtung des Versuchsbodens sowie Aufbringen einer zusätzlichen Auflast aus dem Versuchsboden (Gesamtüberdeckungshöhe oberhalb des Rohrscheitels ca. 1,5 m)
- Sanierung der Teststrecke

- Untersuchung der sanierten Rohrverbindungen mittels TV-Kanalkamera und einer Wasserdruckprüfung (ca. 1 Woche nach der Injektion)
- Freilegen und optische Kontrolle der sanierten Rohrverbindungen

5.2.3 Versuchsergebnisse

Sanierungsstrecke 1

Aufgrund der erstmaligen Anwendung der neuen Verfahrenstechnik in einer Kanalstrecke ergeben sich bei der ersten Teststrecke zeitliche Verzögerungen während des Sanierungsablaufes. Im Verlauf der Ersterprobung müssen die einzelnen Verfahrensschritte, wie z.B. das Positionieren des Packers, das Anmischen der Materialkomponenten und das Überwachen des Injektionsprozesses aufeinander abgestimmt werden. Während von der Misch- und Injektionsanlage die sich hieraus ergebenden Stillstandszeiten problemlos überbrückt werden, führt eine unzureichende Reinigung des statischen Mixers durch eine Spülung mit der Z - Komponente zu Materialstopfern, so dass der Injektionspacker geborgen und der statische Mischer manuell gereinigt werden muss. Dennoch kann in der praxisnahen Erprobung eine grundsätzliche Eignung der gesamten Verfahrenstechnik festgestellt werden.

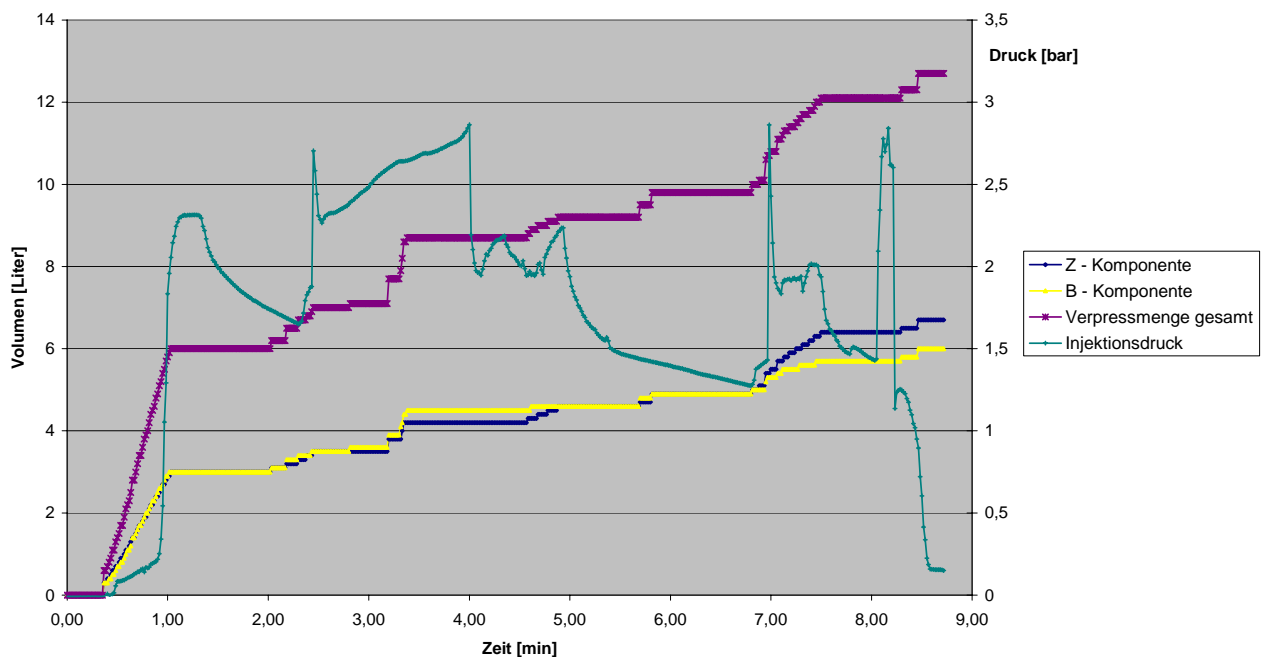


Abbildung 5-16: Injektionsprotokoll, Sanierungsstrecke 1, Rohrverbindung 1

Beispielhaft für alle 6 sanierten Rohrverbindungen wird nachfolgend das Injektionsprotokoll der ersten Rohrverbindung (s. Abbildung 5-16) ausgewertet.

Zu Beginn der Sanierung werden die beiden Komponenten gleichmäßig verpresst und das Injektionsmaterial verteilt sich im Injektionsraum zwischen der Packerhaut und der Rohrinnenwandung bei geringem Injektionsdruck. Nach Verfüllung des Injektionsraums dringt das Material in die Fehlstelle in die Rohrfirste und den dahinter liegenden Leitungszonenbereich ein. Da das Material durch eine kleine Schadstelle gegen einen verdichteten Boden injiziert werden muss, ergeben sich direkt hohe Injektionsdrücke von 2,3 bar.

Wenn der Injektionsdruck über ca. 2,5 bar ansteigt, wird das Material zwischen der Packerhaut und der Rohrinnenwandung in den Kanal verpresst. Daher wird die Injektion bei Injektionsdrücken oberhalb von 2 bar planmäßig unterbrochen und anhand des Druckabfalls der Sanierungszustand bewertet. Der Druck fällt in der Injektionspause kontinuierlich ab, so dass ab Minute 2 mit einem 2. Injektionszyklus begonnen wird. Während der 2. Verpressung steigt der Druck direkt steil an und ab 2,5 bar fließt das Material in die Kanalhaltung. Zu Erprobungszwecken wird die Injektion fortgesetzt, um die Reaktion der Verfahrenstechnik bei zu hohen Injektionsdrücken zu untersuchen. Es kommt zu einem unregelmäßigen Materialfluss in den Kanal, da an der Packerhaut vorbeifließendes Material kurzfristig zu einem Druckabfall führt, so dass die Packeraußenblasen wieder abdichten, bis der Druck wieder über den kritischen Wert von 2,5 bar ansteigt.

Ab der 4. Minute schließt sich wieder eine Injektionspause an den Verpressvorgang an, innerhalb derer sich der Injektionsdruck asymptotisch einem Wert von ca. 1,5 bar nähert. Die Injektion hätte an dieser Stelle beendet werden können, da ein konstant bleibender Druck für eine vollständige Verfüllung aller Hohlräume spricht. Die erneut hohen Injektionsdrücke des 3. Injektionszyklus bestätigen diese Annahme, so dass jede weitere Injektion nur zum Aufreißen des Bodens führt, da alle bestehenden Schadstellen oder Hohlräume bereits verfüllt sind. Die Sanierung wird deshalb mit der Spülung des statischen Mischers durch Verpressen der reinen Z – Komponente und mit dem Aufblasen der Packermittelkammer (s. Minute 8) abgeschlossen.

Bei den übrigen 5 Sanierungen ergeben sich ähnliche Injektionsverläufe, die alle durch hohe Injektionsdrücke nach der Verfüllung des Injektionsraums zwischen den Packer Außenblasen gekennzeichnet sind. Die Verdichtung des Leitungszonenbereichs bewirkt einen hohen Injektionswiderstand, der nur durch ein Aufreißen des Bodens bei Injektionsdrücken oberhalb von ca. 1,5 bar überwunden wird. Die auf diese Weise entstehenden Injektionskörper dienen jedoch nicht mehr dem Zweck der Abdichtung, so dass für den Praxiseinsatz bei Injektionsdrücken oberhalb von ca. 1,5 bar von einer Verfüllung aller bestehenden Hohlräume ausgegangen werden kann.



Abbildung 5-17: Freigelegte Sanierungsstrecke 1

Die Wasserdichtheitsprüfung sieben Tage nach der Sanierung wird von den Rohrverbindungen 1 bis 5 bestanden. Die Rohrverbindung 6 weist nach dem Freilegen der Versuchsstrecke unverfüllte Muffenspaltbereiche auf. Eine mögliche Erklärung liegt in der Tatsache, dass der Injektionspacker bei der letzten zu verpressenden Rohrverbindung bereits von außen sehr verschmutzt ist und die anhaftenden Restmaterialien eine Verteilung der frischen Injektionssuspension verhindern.

In einer gesonderten Versuchsreihe wird daher erprobt, ob eine Verwendung von andern Packerhäuten oder Trennmitteln das Anhaften von Materialresten verhindern kann. Mit anderen Packerhäuten werden nur vergleichsweise geringe Verbesserungen erzielt und

die Trennwirkung vom Beschichtungsmitteln beschränkt sich nur auf einen einmaligen Effekt. Daher wird bei dem DN 400 Packer mit dem Aufblasen der Mittelkammer vor Injektionsbeginn eine andere Sanierungsmethodik verfolgt (s. Kapitel 4.6.2), um die Anhaftungen zu minimieren.

In Abbildung 5-17 ist die freigelegte erste Sanierungstrecke abgebildet. Die Injektionskörper befinden sich mit Ausnahme der Kiespackung an Rohrverbindung 4 zum Großteil unterhalb des Rohrstrangs, da hier offensichtlich eine einbaubedingte geringere Lagerungsdichte und damit der geringste Injektionswiderstand vorliegt.

Sanierungstrecke 2

Die Sanierung der Steinzeugrohrhaltung 2 baut auf den verfahrenstechnischen Erfahrungen auf, die bei der ersten Teststrecke gewonnen wurden. Der gesamte Sanierungsablauf verläuft zwar reibungsloser, dennoch führen Verstopfungen des statischen Mischers zu Unterbrechungen. Eine Ursache liegt in einer ungenügenden Reinigung der Misch- und Injektionsanlage sowie den Materialschläuchen begründet. Erhärtete Materialreste von der letzten Sanierung lösen sich während des Misch- und Pumpbetriebes in der Anlage oder in den Schlauchleitungen und setzen mit der Zeit den statischen Mischer zu. Eine andere Ursache ist die nur geringe Reinigungswirkung, wenn der statische Mischer anstatt mit Wasser nur mit der Z – Komponente gereinigt wird.

Die Auswertung der Injektionsprotokolle zeigt eine deutliche Anhängigkeit der Verpressmengen und der Injektionsdrücke von dem Verdichtungsgrad des Bodens. Beispielhaft sind in Abbildung 5-18 die Protokolle der Rohrverbindung 1 (unverdichteter Bereich) und der Rohrverbindung 5 (verdichteter Bereich) dargestellt. Während in nicht verdichteten Bereichen durchschnittlich 12 Liter Material bei geringen Injektionsdrücken in mehreren Zyklen verpresst werden können, sind die Verpressraten bei den Rohrverbindungen 4 bis 8 (verdichteter Bereich) mit durchschnittlich 4,5 Litern und hohen Injektionsdrücken wesentlich geringer.

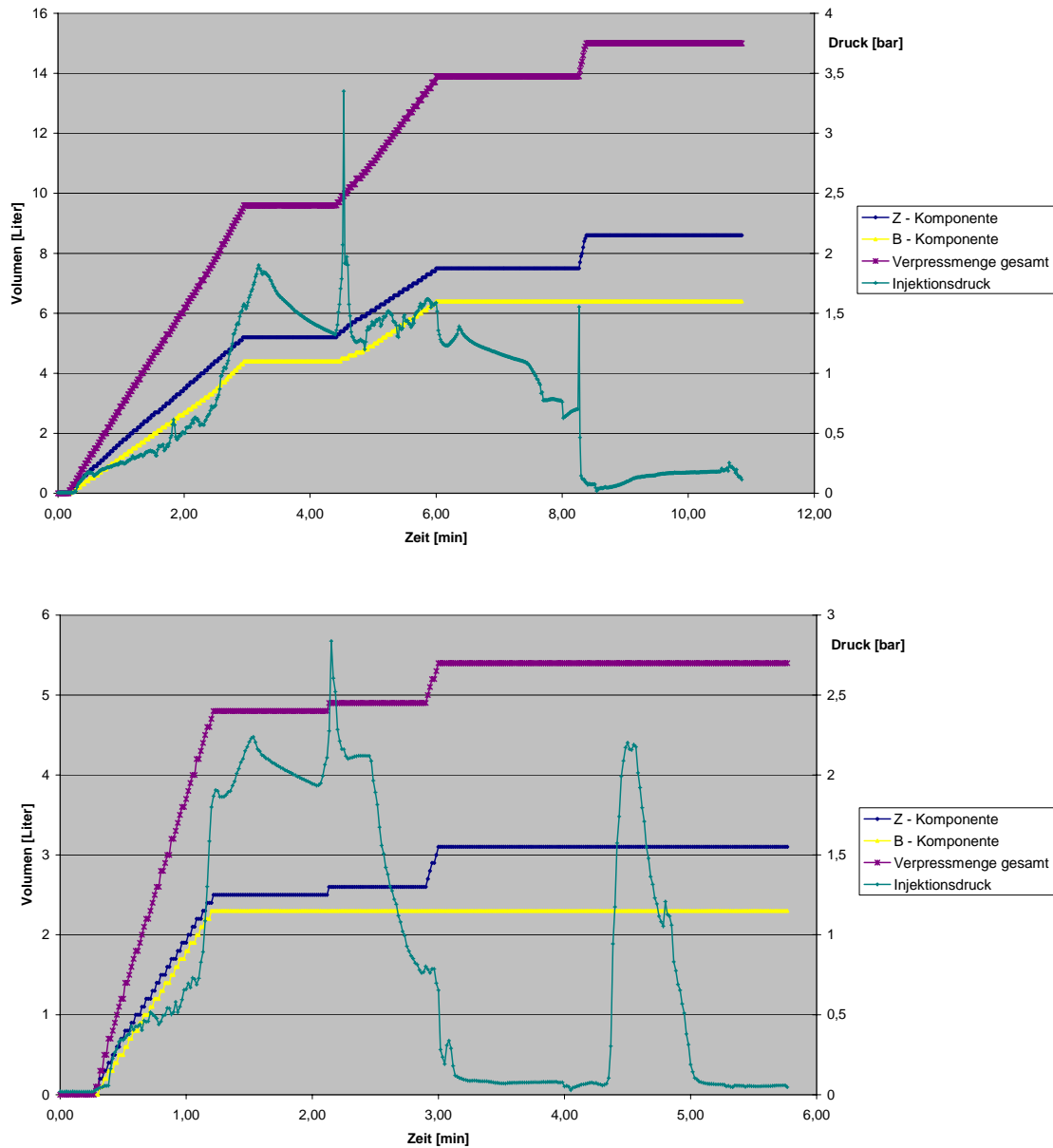


Abbildung 5-18: Injektionsprotokoll, Sanierungsstrecke 2, Rohrverbindung 1 (oben), Rohrverbindung 2 (unten)

Die Dichtheitsprüfung wird von allen sanierten Rohrverbindungen bestanden und die Freilegung der Teststrecke zeigt den bereits während der Sanierung festgestellten Zusammenhang zwischen Bodenverdichtungsgrad und Injektionsmaterialverbrauch. Während sich in den unverdichteten Bereichen große Abdichtungskörper entlang des Rohres ausbilden (s. Abbildung 5-19, links, Rohrverbindung 1), werden in verdichteten Bereichen lediglich die Hohlräume innerhalb der Rohrverbindung ausgefüllt (s. Abbildung 5-19, rechts, Rohrverbindung 5).



Abbildung 5-19: Freigelegte Rohrverbindungen der Sanierungsstrecke 2

Sanierungsstrecke 3

Die Sanierungsstrecke 3 wird zur Vorbereitung der In-situ-Erprobung gemeinsam mit der Fa. Kuchem saniert. Hierzu wird auf Sanierungsgeräte der Fa. Kuchem, wie eine Kanal-kamera zur Positionierung und eine Stahlseilwinde zum Versetzen des Packers, zurückgegriffen. Außerdem wird die Sanierung durch Mitarbeiter der Fa. Kuchem begleitet, damit schon frühzeitig ein Wissenstransfer zwischen der Forschung und den Bedürfnissen der Praxis stattfindet.

Im Unterschied zu den bisherigen Sanierungsstrecken 1 und 2 wird in der Sanierungsstrecke 3 erstmals das HeidelbergCement Material eingesetzt. Die in Sackware gelieferten Komponenten erleichtern den Anmischprozess, da ein aufwändiges Dosieren entfällt.



Abbildung 5-20: Freigelegte Rohrverbindungen der Sanierungsstrecke 3

Die bei der Sanierung der Sanierungsstrecken 1 und 2 bereits gefundenen Zusammenhänge zwischen der Rohrbettung und dem Verlauf der Injektionsparameter bestätigen sich auch in Sanierungsstrecke 3. In unverdichteten Bereichen (Rohrverbindung 1 bis 3) wird mit durchschnittlich 14 Liter mehr Material verpresst, als im verdichteten Bereich (Rohrverbindung 4 bis 6) mit nur ca. 5,5 Liter. Die dadurch entstehenden Unterschiede in den Abdichtungskörpern werden in Abbildung 5-20 verdeutlicht.

Obwohl die Verpressmengen und die Injektionsdrücke bei allen Rohrverbindungen auf eine erfolgreiche Sanierung schließen lassen, wird die Dichtheitsprüfung nur von den Rohrverbindungen 1 und 2 bestanden. Nach dem Freilegen der Versuchsstrecke wird die Ursache für die undichten Rohrverbindungen mit Sandablagerungen in der Sole der Muffenspalte gefunden (s. Abbildung 5-21). Da bei den Rohrverbindungen 3 bis 6 im Unterschied zu den Rohrverbindungen 1 und 2 die werkseitige Dichtung fast vollständig entfernt wird, kann vor Versuchsbeginn ausgetrockneter Boden durch die Rohrverbindung einrieseln und sich in der Sole des Muffenspalts ablagern. Dieser Boden wird bei der Injektion nicht verdrängt, jedoch bei der Wasserdichtheitsprüfung ausgespült, so dass die sanierte Rohrverbindung infolge der Fehlstelle im Sohlbereich undicht ist. Bei den Rohrverbindungen 1 und 2 muss eine in der Firste oder im Kämpfer befindliche kleinere Fehlstelle verpresst werden, die aufgrund Ihrer Lage im Rohr nicht durch Sandablagerungen überdeckt wird. Für den Praxiseinsatz des Verfahrens ist daher eine vorausgehende Hochdruckreinigung der zu sanierenden Haltung unerlässlich, damit Ablagerungen im Muffenspalt vor der Sanierung entfernt werden.



Abbildung 5-21: Sanierte Betonrohrverbindung mit Sandablagerungen in der Sole des Muffenspalts

Sanierungsstrecke 4

Die 4. Sanierungsstrecke besteht aus 7 Steinzeugrohrverbindungen, von denen die Verbindungen 1 bis 3 im unverdichteten Bereich und die Verbindungen 4 bis 7 im verdichteten Bettungsbereich verlegt sind. Die Schadstellen werden alle durch annähernd vollkommen entfernte Dichtungen simuliert. Zur Vermeidung von Sandablagerungen im Sohlbereich der Muffenspalte wird der Versuchsboden angefeuchtet eingebaut und die Sanierung zeitnah nach dem Versuchsaufbau durchgeführt. Außerdem sind Steinzeugrohrverbindungen aufgrund ihrer Geometrie nicht so anfällig für das Eindringen von trockenem Sand. Das Glockenende überragt das Spitzende des nächsten Rohres weiter, als dies bei Betonrohrverbindungen der Fall ist. Zusätzlich wird jede Rohrverbindung kurz vor der Sanierung mit einer Kanalkamera abgeschwenkt und ggf. mit Druckluft ausgeblasen.

Die Injektionsprotokolle zeigen wieder den Zusammenhang zwischen Bodenverdichtungsgrad zum Injektionsmittelverbrauch und Injektionsdruck. Im unverdichteten Bereich werden durchschnittlich 9 Liter und im verdichteten Bereich durchschnittlich 4 Liter verpresst. Die freigelegten Injektionskörper bestätigen die protokollierten Mengenverbräuche (s. Abbildung 5-22).



Abbildung 5-22: Freigelegte Rohrverbindungen der Sanierungsstrecke 4

Um das Vorbeifließen des Injektionsmaterials in die Rohrleitung bei hohen Injektionsdrücken zu verhindern wird bei der Sanierungsstrecke 4 mit höheren Packeraußenblasendrücken (ca. 3,7 bar) gearbeitet. Die Dichtheitsprüfung ergibt, dass bis auf die Rohrverbindungen 1 und 2 alle übrigen Rohrverbindungen erfolgreich saniert wurden. Bei den hohen Drücken der Packeraußenblasen wurde das 2. Steinzeugrohr zerstört, so dass die Sanierung der ersten beiden Rohrverbindungen nicht sachgerecht geprüft werden kann, da

durch einen Riss im 2. Steinzeugrohr kein dichter Prüfraum erzeugt werden kann. Da im Praxiseinsatz überwiegend Haltungen mit einem Alter von über 40 Jahren saniert werden sollen, muss der geringeren Festigkeit von alten Rohren bei der Sanierung Rechnung getragen werden. Damit die Rohre nicht infolge eines zu hohen Drucks durch den Injektionspacker zerstört werden, ist der Packeraußenblasendruck auf maximal 3 bar zu begrenzen.

Fazit:

Mit dem zweikomponentigen Injektionsmaterial und der neu entwickelten Verfahrenstechnik können in den praxisnahen Erprobungen Rohrverbindungen erfolgreich abgedichtet werden. Durch die Verwendung industriell gefertigter Sackware kann zudem die praktische Anwendung vereinfacht werden. Für die In-situ-Erprobung ergeben sich durch die Auswertung der Injektionsprotokolle und eine Gegenüberstellung mit den jeweiligen Sanierungsrandbedingungen Erfahrungs- und Anhaltswerte im Bezug auf die einzusetzenden Materialmengen und Injektionsdrücke.

5.3 Hochdruckspülfestigkeit

Die Hochdruckspülfestigkeit einer Sanierungsmaßnahme wird in der Regel mit Spülversuchen an simulierten Sanierungen überprüft. Eine Untersuchungsmethode ist der Hochdruckspülversuch nach dem „Hamburger Modell“. Diese Prüfmethode wurde zur realistischen Prüfung des Einflusses einer jährlichen Hochdruckspülung an Schlauchlinern von der Hamburger Stadtentwässerung entwickelt.

Der Versuchsaufbau ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet: An einer zuvor an der Oberfläche verlegten und sanierten Haltung werden mehrere Spüldurchgänge durchgeführt. Ein Spülzyklus besteht aus dem kompletten Hin- und Rückweg der Spüldüse durch die Haltung. Der Spüldruck bei Schlauchlinern liegt bei 100 bis 120 bar. Die mindestens 8 Düsen sollten ca. $2,4\text{mm} \pm 1,0\text{mm}$ im Durchmesser haben und in einem Winkel von 30° stehen. Die Vorlaufgeschwindigkeit liegt bei $1,0\text{m/s}$, die Rücklaufgeschwindigkeit zwischen $0,1\text{m/s}$ und $0,3\text{m/s}$. Die Durchflussmenge hängt von der Düse ab und liegt bei ca. 320 Litern/min. Um eine realitätsnahe Belastung zu erzeugen, wird beim Rückzug der Spüldüse ein Splittgeschiebe (5 Liter gebrochenes Material der Körnung 3-6 mm) vorgelegt und durch die Wasserstrahlen auf den Liner gedüst. Abschließend wird die Spüldüse drei Mi-

nuten lang bei 100 bis 120 bar im Liner an einer Stelle gehalten, um den Schlauchliner auf die punktuelle Belastung durch die Düse zu prüfen. Die Zahl der durchzuführenden Spülversuche orientiert sich an der geschätzten Lebenserwartung (ca. 30 Jahre) des Inliners. Bei einer jährlichen Spülung wird daher die Zahl der Spülzyklen auf 30 festgelegt. Die Beurteilung erfolgt optisch im Anschluss an die Hochdruckspülungen durch eine Kamerabefahrung.

Die Hochdruckspülfestigkeit des neuen Sanierungsverfahrens wird in Anlehnung an das Hamburger Modell untersucht. Die Testhaltung wird aus 6 DN 400 Steinzeugrohren von jeweils 1 m Länge erstellt. Die Rohre sind offen verlegt und die Rohrverbindungen mit Textilvliesbahnen umwickelt (s. Abbildung 5-23). Die Vliesbahnen werden mit Spanngurten an den Rohren befestigt, so dass sich zwischen den Spanngurten unter dem Vlies ein Injektionsraum bildet. Die Sanierung wird mit dem DN 400 Prüf und Sanierungspacker durchgeführt (s. Kapitel 4.6.2). Da die Rohrverbindungen offen verlegt sind, kann die Injektion während der Sanierung verfolgt werden und bei vollständiger Verfüllung beendet werden.



Abbildung 5-23: Testhaltung für Hochdruckspülversuch

Nach einer Erhärtungszeit von 28 Tagen wird der Hochdruckspülversuch durchgeführt. Um den Null-Zustand der sanierten Verbindungen festzuhalten, wird vor Versuchsbeginn jede sanierte Rohrverbindung durch eine Kamerabefahrung auf ihre optische Beschaffenheit hin überprüft. Die Hochdruckspülung wird wie bei den Schlauchlinern ebenfalls mit 30 Spülzyklen bei 110 bar und Vorlage von Geschiebesplitt nach den Vorgaben des Hamburger Modells durchgeführt. Zusätzlich wird eine 3 minütige, punktuelle Spülung an einer Rohrverbindung durchgeführt. Zur Überprüfung möglicher Schadstellen an den sanierten

Rohrverbindungen infolge der Hochdruckspülung wird nach dem 5., dem 15. und dem 30 Spülzyklus sowie nach der punktuellen Spülung jeweils eine Kamerabefahrung durchgeführt.

Die Spülung wird mit einem Spülfahrzeug der Fa. Kuchem (s. Abbildung 5-24, links) durchgeführt, das folgende Leistungsparameter aufweist:

- Erzeugter Wasserdruck: 110 bar
- Bei einem Volumenstrom von 320 l/min



Abbildung 5-24: Spülfahrzeug (links) und Spüldüse im Steinzeugrohr (rechts)

Die eingesetzte Spüldüse (s. Abbildung 5-24, rechts) hat folgende Parameter:

- Anzahl der Düsen: 10 Stk.
- Durchmesser der Düsen: 2,3 mm
- Strahlwinkel: 30°

Im Anschluss an die Hochdruckspülung werden die Kameraaufnahmen ausgewertet. Die in Abbildung 5-25 dargestellte Bildserie zeigt beispielhaft die Veränderung einer sanierten Rohrfuge nach verschiedenen Spülzyklen und der 3 minütigen Dauerbelastung.

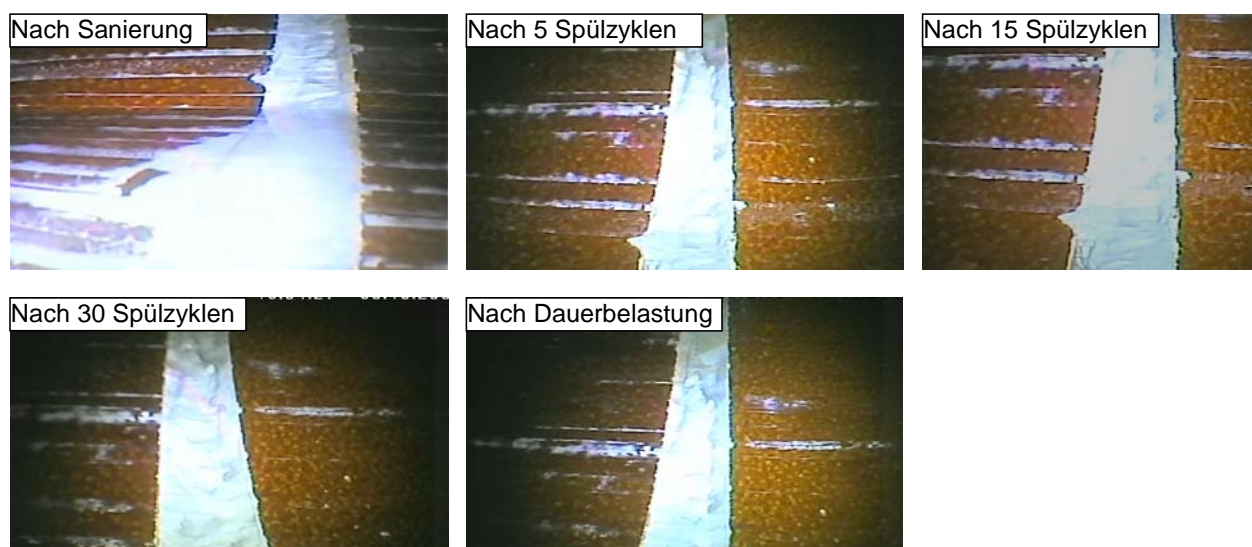


Abbildung 5-25: Bildserie der Hochdruckspülversuche

Die Optische Beurteilung ergibt, dass das eingebrachte Sanierungsmaterial in den Rohrverbindungen verbleibt und auch nach Ablauf der 30 Zyklen keine Schäden aufweist. Materialabplatzungen finden nur teilweise auf der glasierten Steinzeugrohroberfläche statt, jedoch nicht im Fugenspalt. Nach dem punktuellen Hochdruckspülvorgang können ebenfalls keine Schädigungen festgestellt werden. Daher kann das Sanierungsmaterial als hochdruckspülfest für eine Lebensdauer von mindestens 30 Jahren eingestuft werden.

6 In-situ-Erprobung

Nachdem im Rahmen der praxisnahen Erprobung die grundsätzliche Eignung der Maschinenteknik unter verschiedenen Randbedingungen erprobt wurde, müssen die In-situ-Versuche die Praxistauglichkeit der Verfahrenstechnik zeigen. Nur durch den Einsatz des Sanierungsverfahrens in bestehender Kanalisation und dessen Anwendung durch Mitarbeiter eines Unternehmens aus der Kanalsanierung lassen sich in einer abschließenden Beurteilung des Sanierungsverfahrens die Einsatzgrenzen und Anwendungsgebiete für das Verfahren genau definieren.

6.1 Versuchsvorbereitung

Die In-situ-Sanierungen werden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Kuchem GmbH, Neunkirchen und den Städten Niederkassel und Aachen durchgeführt. Die Mitarbeiter des öffentlichen Kanalnetzbetreibers werden in ausführlichen Gesprächen über das neue Sanierungsverfahren und die geplanten Sanierungsarbeiten informiert, um die Zustimmung für einen Einsatz in der Kanalisation zu erhalten. Rechtliche, organisatorische und terminliche Fragestellungen werden vor der Durchführung der geplanten Sanierungsarbeiten in Gesprächen zwischen allen Beteiligten geklärt, um die Vorgehensweise eindeutig und transparent abzustimmen. Anschließend wird eine Auswahl geeigneter Kanalstrecken für die Erprobung mit einer Kanalkamera befahren und begutachtet. Das Verfahren ist insbesondere für ältere Kanäle geeignet, die zum Teil mit sehr schlechten Dichtungen eingebaut wurden und heute in hohem Maße undicht sind. Durch jahrelange Ex- und Infiltrationen ist der Bettungsbereich der Rohrverbindungen oft ausgespült, so dass hohe Materialverbräuche bei der Anwendung von Injektionsverfahren zu erwarten sind. Eine Sanierung mit Kunstharzen wäre gerade in diesen Fällen aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll. Der Schwerpunkt bei der Auswahl der Kanalstrecken liegt daher auf älteren und stark undichten Kanalabschnitten.



Abbildung 6-1: Steinzeughaltung DN 300 mit Wurzeleinwuchs (links) und einragenden Stützen (rechts)

Die Praxiserprobung erfolgt an diversen DN 300 Steinzeughaltungen und DN 300 Betonrohrhaltungen sowie an DN 400 Steinzeughaltungen.

Exemplarisch wird nachfolgend die Praxiserprobung an 2 DN 300 Steinzeugkanalhaltungen aus dem Baujahr 1965 beschrieben, die hauptsächlich Lageabweichungen und Wurzeleinwüchse in den Muffen aufweisen (s. Anhang, Haltungsbericht), so dass bereits bei der Kamerabefahrung von undichten Rohrverbindungen ausgegangen werden konnte (s. Abbildung 6-1). Die Dichtheitsprüfungen an den Muffen bestätigen diese Vermutung. Zur Vorbereitung der Sanierung werden mit einem Fräsroboter die Wurzeln aus dem Muffenspalt und einragende Stützen entfernt.

6.2 Versuchsdurchführung

Während der Sanierung steht die Erprobung der Verfahrenstechnik hinsichtlich des Sanierungsablaufs, der Gerätetechnik, und des personellen und zeitlichen Aufwands bei realen Schadensbildern im Vordergrund. Die Erprobung wird in einem Wohngebiet in Niederkassel in einer wenig befahrenen Strasse durchgeführt.



Abbildung 6-2: In-situ-Erprobung in Niederkassel

Für die Positionierung des Packers und die Injektion einer Muffe werden durchschnittlich 5 Minuten benötigt, so dass je nach Randbedingung inklusive „Einrichten und Räumen der Baustelle“ ein bis zwei Haltungen pro Arbeitstag saniert werden können. Die Auswertung der Injektionsprotokolle ergibt einen Materialverbrauch von 0,8 bis 11 Litern pro Rohrverbindung und durchschnittlich etwa 4 Liter. Die Injektionsdrücke bewegen sich wie bei der Vorerprobung zwischen 1 und 2,5 bar. Für die Sanierung einer Rohrverbindung wird überwiegend nur ein Injektionszyklus benötigt. In einem Fall wird ein größerer Hohlraum mit 3 Injektionszyklen und 11 Litern verfüllt.

6.3 Versuchsergebnisse

Die Gerätetechnik und die Abstimmung der Arbeitsschritte erweisen sich auch in der Praxis als grundsätzlich geeignet. Die bereits in der Vorerprobung festgestellten Probleme von Verstopfungen infolge des Zusetzens des statischen Mixers treten auch in der Praxis auf. Dies führt zu Verzögerungen, die wiederum die Verarbeitung des bereits angemischten Materials erschweren. Daher wird im Konzept des DN 400 Packers eine separate Spülleitung zur Reinigung des statischen Mixers vorgesehen (s. Kapitel 4.6.2). Des Weiteren muss der erhebliche zeitliche Aufwand zur Reinigung der Gerätetechnik nach Abschluss aller Sanierungsarbeiten auf dem Gelände der Sanierungsfirma durch gerätetechnische Veränderungen und Übungs- sowie Wiederholungseffekte beim Bedienpersonal noch optimiert werden.

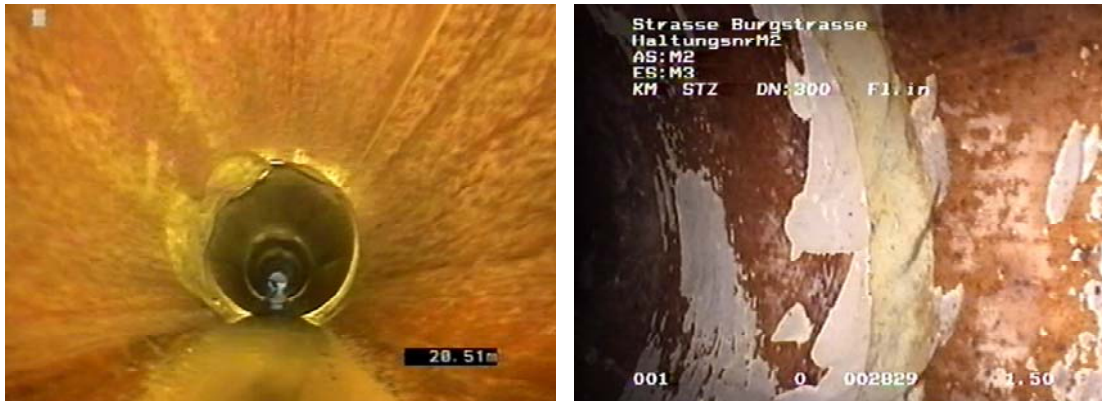


Abbildung 6-3: Kanalkamera - Befahrung nach der Sanierung mit Materialrückständen (links), Nach dem Abfräsen der Materialrückstände (rechts)

Die Dichtheitsprüfungen werden vier Wochen nach der Sanierung durchgeführt. Aufgrund von anhaftenden Restmaterialien (s. Abbildung 6-3, links) im Muffenbereich kann nicht jede Muffe zuverlässig geprüft werden, da der Prüfpacker teilweise keinen luftdichten Prüfraum aufbauen kann. Außerdem müssen die Materialreste zurückgefräst werden, um eine Durchfahrt des Prüfpackers zu ermöglichen (s. Abbildung 6-3, rechts). Um Materialrückstände zu vermeiden, wird beim DN 400 Packer die Packermittelkammer schon vor der Injektion aufgeblasen. Dies setzt eine exakte Positionierung der Injektionsöffnung vor den Muffenspalt voraus, die mit einem selbstfahrenden Kamerawagen über den Prüfbereich aus Plexiglas vorgenommen werden kann.



Abbildung 6-4: Kanalkamera - Befahrung nach der Sanierung (links), gut verfüllter Muffenspalt (rechts)

Bei Muffen mit geringen Ablagerungen und einem optisch guten Erscheinungsbild kann die Dichtheit immer nachgewiesen werden (s. Abbildung 6-4). Somit wird durch den ersten In-situ-Einsatz des neuen Sanierungsverfahrens die Übertragbarkeit der Laborversuche auf den praktischen Anwendungsfall nachgewiesen. Darüber hinaus werden wertvolle Informationen bezüglich einer weiteren Verbesserung des Sanierungsverfahrens gesam-

melt, die vor allem den passgenauen Einbau sowie eine arbeitsfreundliche Bedienung der Maschinenteknik betreffen.

7 Kostenvergleich mit anderen Sanierungsverfahren

Das neue mineralische Sanierungsverfahren bietet neben verfahrenstechnischen Vorteilen und einer guten Umweltverträglichkeit auch erhebliche Kostenvorteile zu anderen Sanierungsverfahren. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird im Folgenden eine dynamische Kostenvergleichsrechnung nach den „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR)“ der Ländergemeinschaft Wasser (LAWA) durchgeführt. Für die Vergleichsrechnung werden als alternative Sanierungsverfahren die Renovierung mit dem Reliningverfahren und die Erneuerung in offener Bauweise eingesetzt. Auf Basis der Vergleichsrechnung soll untersucht werden, ob und unter welchen Randbedingungen das neu entwickelte Injektionsverfahren, das zur Gruppe der Reparaturverfahren zählt, wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Renovierung und der Erneuerung besitzt. Die kostengünstigste Sanierungsmethode kann direkt durch den Vergleich der entsprechenden Projektkostenbarwerte (PKBW) ermittelt werden.

Szenario		1	2	3	4	5	6	7	8
Länge der Haltung:	m	50	50	50	50	50	50	50	50
Nennweite DN	mm	300	300	300	300	600	600	600	600
Tiefenlage des Kanals:	m	3,00	3,00	6,00	6,00	3,00	3,00	6,00	6,00
Lage des Grundwasserspiegels:		oberhalb	oberhalb	oberhalb	oberhalb	oberhalb	oberhalb	oberhalb	oberhalb
Anzahl der seitlichen Zuläufe:	St.	2	12	2	12	2	12	2	12
Anteil der undichten Rohrverbindungen	%	50	50	50	50	50	50	50	50
Abstand der Muffen (Rohrlänge)	m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
⇒ Anzahl der zu sanierenden Muffen:	St.	25	25	25	25	25	25	25	25
Sanierungskosten Mineralische Injektion:									
Angebotspreis Baustelleneinrichtungskosten:	€/d	500	500	500	500	500	500	500	500
Angebotspreis pro Muffe:	€/St.	50,00	50,00	50,00	50,00	60,00	60,00	60,00	60,00
⇒ Sanierungskosten gesamt:	€	1.750	1.750	1.750	1.750	2.000	2.000	2.000	2.000
Sanierungskosten Schlauchlining:									
Preis für Einbau des Liners pro Meter:	€/m	150	150	150	150	310	310	310	310
⇒ Preis für Einbau des Liners pro Haltung:	€	7.500	7.500	7.500	7.500	15.500	15.500	15.500	15.500
Preis für Schachthanbindung:	€	260	260	260	260	260	260	260	260
Preis für Öffnen der seitl. Zuläufe:	€	420	2520	420	2520	420	2520	420	2520
⇒ Sanierungskosten gesamt:	€	8.180	10.280	8.180	10.280	16.180	18.280	16.180	18.280
Sanierungskosten Neuverlegung:									
Grundpreis pro lfm Kanal:	€/m	268	268	396	396	329	329	612	612
Grundpreis pro Haltung:	€	13.400	13.400	19.800	19.800	16.450	16.450	30.600	30.600
Zuschlag für Wasserhaltung:	€	650	650	650	650	650	650	650	650
Zuschlag für Sparten und Hausanschlüsse:	€	500	500	500	500	500	500	500	500
⇒ Sanierungskosten gesamt:	€	14.550	14.550	20.950	20.950	17.600	17.600	31.750	31.750

Abbildung 7-1: Eingangsparameter für die Berechnung der KVR

Um die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Sanierungsverfahren unter verschiedenen Randbedingungen vergleichen zu können, werden 8 unterschiedliche Sanierungsrandbedingungen/ -kombinationen (s. Abbildung 7-1) definiert.

Weiterhin sind in Abbildung 7-1 die Kosten zu den einzelnen Sanierungsmethoden für jedes Szenario aufgeführt. Die Sanierungskosten für das Schlauchlining und die Erneuerung werden auf der Grundlage von marktüblichen Preisen kalkuliert. Die Kosten für das neue Injektionsverfahren ergeben sich aus Materialkosten und Zeitaufwandswerten, die über die In-situ-Erprobungen ermittelt werden. Während den Schätzungen für die einzelnen Sanierungskosten eine große Datenbasis zugrunde liegt, sind die Schätzungen für die Nutzungsdauern der Sanierungsverfahren mit einer deutlich größeren Unsicherheit behaftet. Für die Neuverlegung und die Renovierung werden daher die Nutzungsdauern „auf der sicheren Seite liegend“ nach oben abgeschätzt, um eine hohe Prüfhürde für die Wirtschaftlichkeit des Injektionsverfahrens zu erzeugen. Für das Reliningverfahren wird die Nutzungsdauer zu 40 Jahren angesetzt und für eine Neuverlegung zu 80 Jahren. Die Nutzungsdauer der Reparatur mit dem neuen Injektionsverfahren wird zunächst mit 10 und 20 Jahren variiert. Zusätzlich wird ein so genannter kritischer Wert für die Nutzungsdauer des Injektionsverfahrens ermittelt, ab dem sich die gleichen PKBW wie bei der jeweils günstigsten Alternativvariante ergeben.

Szenario			1	2	3	4	5	6	7	8
Betrachtungsdauer	N	[a]	80	80	80	80	80	80	80	80
Zinssatz	i	[-]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
⇒ Zinsfaktor	q=1+i	[-]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Preissteigerungsrate	r	[-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
⇒ Preissteigerungsfaktor	s=1+r	[-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Nutzungsdauern										
Reparatur min.	N1	[a]	10	10	10	10	10	10	10	10
Reparatur max.	N2	[a]	20	20	20	20	20	20	20	20
Renovierung	N3	[a]	40	40	40	40	40	40	40	40
Neuverlegung	N4	[a]	80	80	80	80	80	80	80	80
Investitionskosten										
Reparatur	IK ₁ =IK ₂	[€]	1.750	1.750	1.750	1.750	2.000	2.000	2.000	2.000
Renovierung	IK ₃	[€]	8.180	10.280	8.180	10.280	16.180	18.280	16.180	18.280
Neuverlegung	IK ₄	[€]	14.550	14.550	20.950	20.950	17.600	17.600	31.750	31.750
Diskontierungsfaktor										
Reparatur min.	DFRW ₁	[-]	3,54045	3,54045	3,54045	3,54045	3,54045	3,54045	3,54045	3,54045
Reparatur max.	DFRW ₂	[-]	2,02997	2,02997	2,02997	2,02997	2,02997	2,02997	2,02997	2,02997
Renovierung	DFRW ₃	[-]	1,30656	1,30656	1,30656	1,30656	1,30656	1,30656	1,30656	1,30656
Neuverlegung	DFRW ₄	[-]	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
Projektkostenbarwert										
Reparatur min.	PKBW ₁	[€]	6.196	6.196	6.196	6.196	7.081	7.081	7.081	7.081
Reparatur max.	PKBW ₂	[€]	3.552	3.552	3.552	3.552	4.060	4.060	4.060	4.060
Renovierung	PKBW ₃	[€]	10.688	13.431	10.688	13.431	21.140	23.884	21.140	23.884
Neuverlegung	PKBW ₄	[€]	14.550	14.550	20.950	20.950	17.600	17.600	31.750	31.750
Kritische Nutzungsdauer										
Minimaler PKBW	PKBW _{Min}		10.688	13.431	10.688	13.431	17.600	17.600	21.140	23.884
zugehörige Investitionskosten	IK _{Min}		8.180	10.280	8.180	10.280	17.600	17.600	16.180	18.280
zugehörige Nutzungsdauer	L _{min}		40	40	40	40	80	80	40	40
erf. Nutzungsdauer Reparatur	kritLREP		5,4	4,2	5,4	4,2	3,7	3,7	3,0	2,7

Abbildung 7-2: Dynamische Kostenvergleichsrechnung

In Abbildung 7-2 sind aufgeteilt nach den 8 Szenarien die PKBW für jede Sanierungsmethode dargestellt. Der Zinsfaktor wurde mit 3 % relativ niedrig angesetzt, um eine Bevorzugung des Injektionsverfahrens aufgrund von später anfallenden Reinvestitionskosten zu

vermeiden. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 9 die PKBW und die kritische Nutzungsdauer grafisch zusammengestellt.

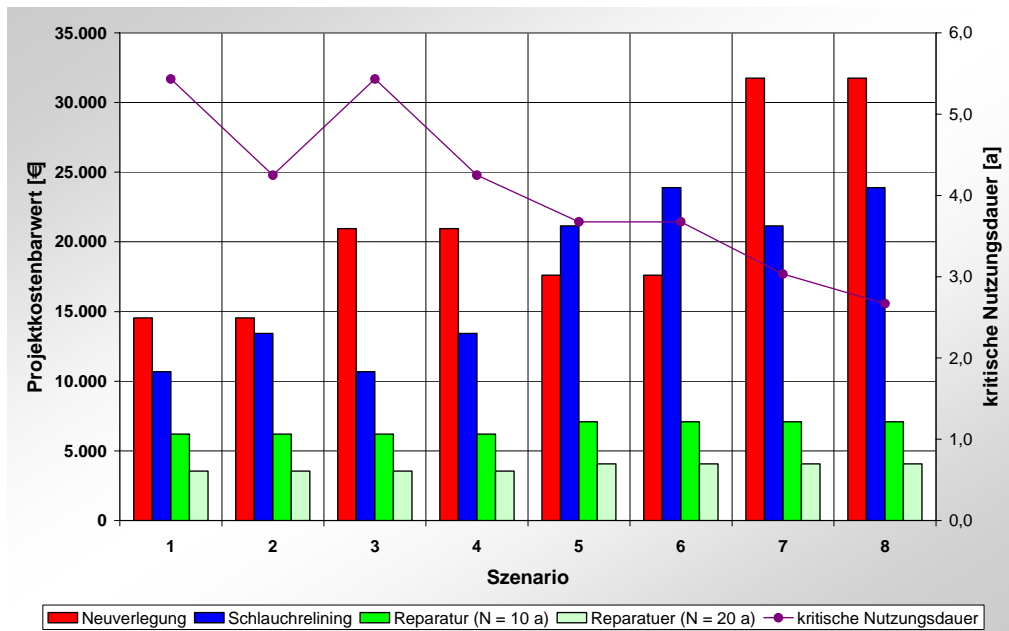


Abbildung 7-3: Projektkostenbarwerte und kritische Nutzungsdauern

In allen 8 Szenarien bietet die Reparatur deutliche Kostenvorteile gegenüber den beiden anderen Sanierungsverfahren. Dies gilt sowohl für eine Nutzungsdauer des Injektionsverfahrens von 20 Jahren als auch von 10 Jahren. Die für eine Kostengleichheit mindestens erforderliche Nutzungsdauer des Reparaturverfahrens (kritische Nutzungsdauer) liegt bei allen Sanierungsszenarien immer unterhalb von 5,5 Jahren⁸. Auch unter Randbedingungen, die für Schlauchliner ideal sind (wenige Zuläufe, geringe Nennweiten), ergeben sich ab dieser kritischen Nutzungsdauer Kostenvorteile der Reparatur gegenüber der Renovierung.⁹

⁸ Um Restwertprobleme auszuschließen, wurde als Betrachtungsdauer für die Ermittlung der Projektkostenbarwerte entsprechend den Forderungen der KVR-Leitlinien ein Zeitraum von 80 Jahren als das kleinste gemeinsame Vielfache der jeweiligen Nutzungsdauern gewählt. In der Praxis wird man Kanäle selbstverständlich nicht 80 Jahre lang wiederholt reparieren. Der wirtschaftliche Vorteil eines kostengünstigen Reparaturverfahrens stellt sich bereits nach einer einmaligen Reparatur ein, wenn dadurch die anderenfalls erforderliche sofortige Renovierung oder Erneuerung um die Nutzungsdauer der Reparatur aufgeschoben werden kann.

⁹ Vgl. Schreiber, J., Zementbasiertes Injektionsverfahren, 2008, S. 169 ff.

8 Zusammenfassung

Zur Sanierung von undichten Kanalrohrverbindungen wurden in der Vergangenheit Kunstharz basierte Injektionsverfahren eingesetzt. Mit dem Ziel einer technischen und wirtschaftlichen Optimierung wurde am ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH Aachen in dem Forschungsvorhaben „Entwicklung und Erprobung von mineralischen Injektionsmaterialien zur Sanierung von Kanalrohren“ vom Januar 2002 bis Dezember 2004 ein neuartiges Sanierungsverfahren entwickelt. Der Anwendungsbereich des Injektionsmaterials umfasst die Sanierung von undichten Rohrverbindungen in nicht begehbaren Kanälen oberhalb und unterhalb des Grundwasserspiegels. In der vorliegenden Arbeit wird aufbauend auf den positiven Forschungsergebnissen des ersten Vorhabens das Injektionsmaterial im Hinblick auf eine gute Verarbeitbarkeit und eine dauerhafte Wirksamkeit weiterentwickelt und mit einer neuen, praxistauglichen Gerätetechnik abschließend im In-situ-Einsatz erprobt.

Das neue Verfahren saniert undichte Muffen durch die Injektion eines mineralischen Abdichtungsmaterials in die Muffenverbindung und dahinter befindliche Hohlräume. Das Sanierungsmaterial besteht aus zwei mineralischen Komponenten, die in gleichem Volumenstrom in einem Statikmischer vermischt und über einen Sanierungspacker injiziert werden. Nach der Vermischung steift das Material schnell zu einer pastösen Masse an, die auch bei Grundwassergegendruck in der frisch sanierten Muffe verbleibt.

Die Ergebnisse aus der praxisnahen Erprobung, die in der Institutshalle an präparierten Kanaltteststrecken durchgeführt werden, zeigen bereits gute Erfolgchancen für eine umweltfreundliche und kostengünstige Abdichtung undichter Rohrverbindungen. Im nächsten Schritt wird die Praxistauglichkeit des neuen Sanierungsverfahrens an bestehenden Kanälen mit undichten Rohrverbindungen untersucht. Mit dem In-situ-Einsatz kann die Funktionsfähigkeit des neuen Verfahrens auch unter realen Sanierungsbedingungen nachgewiesen werden. Für eine wirtschaftlichere Anwendung muss die Verfahrenstechnik allerdings noch dahingehen optimiert werden. Die Praxisanwendung wird durch Übungs- und Wiederholungseffekte und sich daraus ergebene neue Entwicklungen für eine bedienerfreundliche Anwendung zu einem effizienten und störungsfreien Sanierungsablauf beitragen.

Auch die Prüfung der Wirtschaftlichkeit gegenüber anderen Sanierungsmethoden zeigt, dass sich unter verschiedensten Randbedingungen zum Teil deutliche Kostenvorteile des mineralischen Injektionsverfahrens gegenüber einer Renovierung oder Erneuerung ergeben. Damit steht dem Markt ein neues Sanierungsverfahren zur Verfügung, mit dem kostengünstig schadhafte Rohrverbindungen dauerhaft abgedichtet werden können und die Nutzungsdauer von Kanälen deutlich verlängert werden. Dies kommt nicht nur den Kommunen, sondern auch dem Gebührenzahler zu Gute.

9 Literatur

Gehm, L.: [Rheologie, 1998]: Rheologie – Praxisorientierte Grundlagen und Glossar, Hannover, Vincent Verlag, 1998

Kutzner, C.:[Injektionen im Baugrund, 1991]: Injektionen im Baugrund, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1991

Maagh, Peter [Sanierung von Rohrverbindungen, 1999]: Sanierung von Rohrverbindungen, Diss. RWTH Aachen, Hennef: GFA – Verlag für Abwasser, Abfall und Gewässerschutz, 1999

o. V.: [DIN EN 1610, 1997]: DIN EN 1610, Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 1997

o. V.: [Mineralische Injektionsmaterialien zur Sanierung von Kanalrohrverbindungen, 2004]: Entwicklung und praxisnahe Erprobung von mineralischen Injektionsmaterialien zur Sanierung von Kanalrohrverbindungen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2004

o. V.: [Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen, 2008]: Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2008

Schreiber, J.:[Zementbasiertes Injektionsverfahren, 2008] Entwicklung eines zementbasierten Injektionsverfahrens unter Einsatz eines Erstarrungsbeschleunigers zur Sanierung nicht begehrbarer Abwasserkanäle, Aachen: Shaker – Verlag, 2008

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

10 Anhang

10.1 Haltungsberichte

Haltungsgrafik

Haltung	713270910	oberer Schacht	713270910	Insp.-Nr.	1
Insp.-Richtung	in Fließrichtung	unterer Schacht	713270908	Insp.-Datum	22.04.2008
Videoband	A01	Ort	Niederkassel		
Profilform	Kreisprofil	Straße	Burgstr.		
Höhe (DN)	300 mm	Firma/ Operator	Kuchem GmbH / U. Ruffer		
Breite		Entw.-System	Mischwasserkanal		
Rohrlänge		Material	Steinzeug		
Halt.-Länge	27,80 m	Innenschutz			
Insp.-Länge	27,80 m	Bemerkung			

Maßstab 1/ 210 Darstellung in Untersuchungsrichtung Grafikseite 1

Foto	Video	Entf./m	Zustand	Beschreibung
		713270910		
	00:00:05	0.00	HA	Haltungsanfang
	00:00:12	0.50	PA	Rohranfang
	00:02:15	5.40	HP--	(A) Wurzeleinwuchs, Querschnittsreduzierung = 0%; in Muffe
	00:02:59	7.40	HP-U	Pos: 7 - 0; Wurzeleinwuchs, Sohle, Querschnittsreduzierung = 1%
	00:05:08	16.00	SE-R	Pos: 2 - 3; Einragender Stutzen, rechter Kämpfer, einragend = 1cm, Querschnittsreduzierung = 1%
	00:05:50	18.40	HP--	(E) Wurzeleinwuchs, Querschnittsreduzierung = 0%
	00:06:38	20.90	SE-L	Pos: 9 - 0; Einragender Stutzen, linker Kämpfer, einragend = 2cm, Querschnittsreduzierung = 5%; Dichtung eingedrueckt
	00:07:18	24.30	HP-R	Pos: 4 - 0; Wurzeleinwuchs, rechter Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 1%
	00:08:02	25.30	HP-L	Pos: 8 - 0; Wurzeleinwuchs, linker Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%
	00:08:20	26.30	HP-R	Pos: 4 - 0; Wurzeleinwuchs, rechter Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%
	00:08:34	27.30	PE	Rohrende
	00:08:54	27.80	EH	Haltungsende
	00:08:59		HL	Haltungslänge = 27,8m
		713270908		

Haltungsbericht

Haltung 713270910	oberer Schacht 713270910	Insp.-Nr. 1
Insp.-Richtung in Fließrichtung	unterer Schacht 713270908	Insp.-Datum 22.04.2008
Videoband A01	Ort Niederkassel	
Videoanfang 00:00:05	Straße Burgstr.	
Videoende 00:08:59	Firma/Operator Kuchem GmbH / U. Ruffer	
Unters.-art TV Untersuchung	Wetter Trocken	
Bildsp.-medium	Entw.-System Mischwasserkanal	
Profilform Kreisprofil	Material Steinzeug	
Höhe (DN) 300 mm	Innenschutz	
Breite	Bemerkung	
Rohrlänge		
Halt.-Länge 27,80 m		
Insp.-Länge 27,80 m		

Foto	Video	Entf./m	G	Zustand	V	Beschreibung
	00:00:05	0,00		HA		Haltungsanfang
	00:00:12	0,50		PA		Rohranfang
	00:02:15	5,40		HP--	A	Anfang > Wurzeleinwuchs, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1; in Muffe
	00:02:59	7,40		HP-U		Pos: 7; Wurzeleinwuchs, Sohle, Querschnittsreduzierung = 1%; Kl: 1
	00:05:08	16,00		SE-R		Pos: 2- 3; Einragender Stutzen, rechter Kämpfer, einragend = 1cm, Querschnittsreduzierung = 1%; Kl: 2
	00:05:50	18,40		HP--	E	Ende > Wurzeleinwuchs, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1
	00:06:38	20,90		SE-L		Pos: 9; Einragender Stutzen, linker Kämpfer, einragend = 2cm, Querschnittsreduzierung = 5%; Kl: 3; Dichtung eingedrueckt
	00:07:18	24,30		HP-R		Pos: 4; Wurzeleinwuchs, rechter Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 1%; Kl: 1
	00:08:02	25,30		HP-L		Pos: 8; Wurzeleinwuchs, linker Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1
	00:08:20	26,30		HP-R		Pos: 4; Wurzeleinwuchs, rechter Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1
	00:08:34	27,30		PE		Rohrende
	00:08:54	27,80		EH		Haltungsende
	00:08:59	27,80		HL		Haltungslänge = 27,80m

Haltungsgrafik

Haltung	713270908	oberer Schacht	713270908	Insp.-Nr.	2
Insp.-Richtung	in Fließrichtung	unterer Schacht	713270906	Insp.-Datum	22.04.2008
Videoband	A01	Ort	Niederkassel		
Profilform	Kreisprofil	Straße	Burgstr.		
Höhe (DN)	300 mm	Firma/ Operator	Kuchem GmbH / U. Ruffer		
Breite		Entw.-System	Mischwasserkanal		
Rohrlänge		Material	Steinzeug		
Halt.-Länge	26,90 m	Innenschutz			
Insp.-Länge	26,90 m	Bemerkung			
Maßstab 1/	203	Darstellung in Untersuchungsrichtung		Grafikseite	1

Foto	Video	Entf./m	Zustand	Beschreibung
		713270908		
	00:09:22	0.00	HA	Haltungsanfang
	00:09:34	0.50	PA	Rohranfang
	00:09:57	1.40	HP-L	Pos: 9 - 0; Wurzeleinwuchs , linker Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%
	00:11:01	5.50	HP-R	Pos: 3 - 0; Wurzeleinwuchs , rechter Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%
	00:12:50	15.70	SE-L	Pos: 9 - 0; Einragender Stutzen , linker Kämpfer, einragend = 2cm, Querschnittsreduzierung = 5%; Dichtung eingedrueckt
	00:13:41	20.40	HP-L	Pos: 9 - 0; Wurzeleinwuchs , linker Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%
	00:14:50	26.40	PE	Rohrende
	00:15:00	26.90	LV-U (G)	Pos: 6 - 0; Lageabweichung , vertikaler Versatz, Sohle, Versatz = 1,5cm
	00:15:22	26.90	EH	Haltungsende
	00:15:27		HL	Haltungslänge = 26,9m
		713270906		

Haltungsbericht

Haltung	713270908	oberer Schacht	713270908	Insp.-Nr.	2
Insp.-Richtung	in Fließrichtung	unterer Schacht	713270906	Insp.-Datum	22.04.2008
Videoband	A01	Ort	Niederkassel		
Videoanfang	00:09:22	Straße	Burgstr.		
Videoende	00:15:27	Firma/Operator	Kuchem GmbH / U. Ruffer		
Unters.-art	TV Untersuchung	Wetter	Trocken		
Bildsp.-medium		Entw.-System	Mischwasserkanal		
Profilform	Kreisprofil	Material	Steinzeug		
Höhe (DN)	300 mm	Innenschutz			
Breite		Bemerkung			
Rohrlänge					
Halt.-Länge	26,90 m				
Insp.-Länge	26,90 m				

Foto	Video	Entf./m	G	Zustand	V	Beschreibung
	00:09:22	0,00		HA		Haltungsanfang
	00:09:34	0,50		PA		Rohranfang
	00:09:57	1,40		HP-L		Pos: 9; Wurzeleinwuchs, linker Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1
	00:11:01	5,50		HP-R		Pos: 3; Wurzeleinwuchs, rechter Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1
	00:12:50	15,70		SE-L		Pos: 9; Einragender Stutzen, linker Kämpfer, einragend = 2cm, Querschnittsreduzierung = 5%; Kl: 3; Dichtung eingedrueckt
	00:13:41	20,40		HP-L		Pos: 9; Wurzeleinwuchs, linker Kämpfer, Querschnittsreduzierung = 0%; Kl: 1
	00:14:50	26,40		PE		Rohrende
	00:15:00	26,40		LV-U	G	gesamte Haltung > Pos: 6; Lageabweichung, vertikaler Versatz, Sohle, Versatz = 1,50cm; Kl: 3
	00:15:22	26,90		EH		Haltungsende
	00:15:27	26,90		HL		Haltungslänge = 26,90m