

# Abschlussbericht

- Thema:** Sanierungen an Grundstücksentwässerungsanlagen mit dem Flutungsverfahren
- Pilotvorhaben:** Anwendung des Flutungsverfahrens zur integralen Sanierung von Abwasserkanälen (zusammenfassende Darstellung)
- und**
- Ergänzungsvorhaben:** Ergänzungsvorhaben Teil I: Untersuchung der Wirksamkeit  
Ergänzungsvorhaben Teil II: Untersuchung der Dauerhaftigkeit und Umweltverträglichkeit
- 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, Dez. 2006

Univ. Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Das Flutungsverfahren .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Praxisuntersuchungen (Pilotvorhaben) .....</b>	<b>9</b>
3.1	Untersuchungsobjekt .....	9
3.2	Zustand der Grundleitungsnetze vor der Sanierung .....	10
3.2.1	Baulicher Zustand .....	11
3.2.2	Dichtheitzustand .....	11
3.2.3	Zustandsbeurteilung .....	13
3.3	Sanierung .....	13
3.3.1	Ausführungsmerkmale .....	14
3.3.2	Sanierungskosten .....	15
3.3.3	Materialeinsatz .....	16
3.4	Erfolgskontrollen .....	18
3.5	Zusammenfassung .....	18
<b>4</b>	<b>Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit (Ergänzungsvorhaben I und II) .....</b>	<b>20</b>
4.1	Wiederholungsprüfungen in situ .....	20
4.1.1	Druckprüfungen nach DIN 1986 Teil 30 .....	20
4.1.2	Wasserprüfungen mit verminderter Druckhöhe .....	21
4.2	Untersuchungen zu den Materialeigenschaften (Laborversuche) .....	23
4.2.1	Versuchskonzeption .....	23
4.2.2	Ergebnisse .....	25
4.2.2.1	Herstellung der Prüfkörper .....	25
4.2.2.2	Kenngößen .....	26
4.2.3	Zusammenfassung .....	26
4.3	Untersuchungen zur Wirksamkeit (Basisversuche) .....	28
4.3.1	Vorüberlegungen .....	28
4.3.1.1	Sanierungsbedingungen .....	28
4.3.1.2	Dichtwirkung .....	29
4.3.1.3	Abdichtungswirksamkeit .....	30
4.3.2	Konzeption der Basisversuchsreihe .....	30
4.3.2.1	Versuchsaufbau .....	31
4.3.2.2	Versuchsprogramm .....	32
4.3.2.3	Versuchsdurchführung .....	35

4.3.3	Versuchsauswertung .....	36
4.3.3.1	Randbedingungen des Injektionsmediums .....	37
4.3.3.1.1	Bodenart und Lagerungsdichte.....	37
4.3.3.1.2	Bodenfeuchte.....	42
4.3.3.1.3	Sonderfall „Hohlräume“ .....	44
4.3.3.1.4	Zusammenfassung .....	48
4.3.3.2	Randbedingungen des Rohrleitungssystems .....	49
4.3.3.2.1	Rohrmaterial .....	49
4.3.3.2.2	Schadensart.....	50
4.3.3.2.3	Schadensrichtung .....	52
4.3.3.2.4	Zusammenfassung .....	52
4.3.3.3	Verfahrenstechnische Parameter .....	54
4.3.3.3.1	Materialviskosität und Injektionsdruck .....	54
4.3.3.3.2	Temperatur .....	56
4.3.3.3.3	Sonderfall „Geringer Injektionsdruck“ .....	57
4.3.3.3.4	Zusammenfassung .....	58
4.3.4	Bewertung der Sanierungsqualität.....	59
4.4	Untersuchungen zur Beständigkeit (Basisversuchsreihe II) .....	63
4.4.1	Versuchskonzept .....	63
4.4.2	Ergebnisse .....	65
4.4.2.1	Beständigkeit gegenüber Temperaturwechsel.....	65
4.4.2.2	Beständigkeit gegenüber Wasserdruck infolge Rückstaus.....	66
4.4.2.3	Beständigkeit gegenüber Erschütterungen .....	66
4.4.2.4	Beständigkeit gegenüber Hochdruckspülungen .....	67
4.4.3	Zusammenfassung .....	68
<b>5</b>	<b>Umweltverträglichkeit (Ergänzungsvorhaben II) .....</b>	<b>69</b>
5.1	Problemstellung und Ziele der Untersuchungen.....	69
5.1.1	Bisherige Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit .....	69
5.1.2	Ziel der Untersuchungsreihe.....	69
5.2	Grundlagen der Planung .....	71
5.2.1	Randbedingungen der Sanierung.....	72
5.2.1.1	Randbedingungen der Umströmungsversuche .....	73
5.2.1.1.1	Randbedingungen des Injektionsmediums .....	73
5.2.1.1.2	Randbedingungen des Rohrleitungssystems .....	74
5.2.1.1.3	Randbedingungen der Verfahrenstechnik .....	75
5.2.1.2	Randbedingungen der Einlagerungsversuche.....	76
5.3	Untersuchungsprogramm .....	76

5.4	Versuchsaufbau.....	78
5.4.1	Umströmungsversuche.....	78
5.4.2	Einlagerungsversuche.....	80
5.5	Versuchsdurchführung.....	80
5.5.1	Umströmungsversuche.....	80
5.5.2	Einlagerungsversuche.....	87
5.6	Darstellung und Analyse der Ergebnisse.....	88
5.6.1	Sanierungsergebnisse.....	88
5.6.2	Ergebnisse der aquatischen Untersuchungen.....	90
5.6.2.1	Umströmungsversuche.....	90
5.6.2.2	Einlagerungsversuche.....	99
5.6.3	Ergebnisse der terrestrische Untersuchungen.....	106
5.7	Zusammenfassende Bewertung der ökologischen Auswirkungen.....	108
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>122</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 3-1: Sanierungsobjekt „Grüner Hof“ .....	9
Abbildung 3-2: Exemplarisches Grundleitungsnetz „Grüner Hof“ .....	10
Abbildung 3-3: Schadensverteilung.....	11
Abbildung 3-4: Einteilung der gemessenen Wasserverluste (WV).....	12
Abbildung 3-5: Sanierungsabschnitte „Grüner Hof“ .....	14
Abbildung 3-6: Kostenaufteilung .....	15
Abbildung 3-7: Materialmengen (Mittelwerte).....	16
Abbildung 3-8: Materialmengen (Einzelwerte) .....	17
Abbildung 4-1: Ergebnisse der Druckprüfungen .....	21
Abbildung 4-2: Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen mit verminderter Druckhöhe.....	22
Abbildung 4-3: Prüfkörperherstellung in der Laborversuchsreihe .....	25
Abbildung 4-4: Beschreibung der Sanierungsbedingungen .....	29
Abbildung 4-5: Versagensarten des Abdichtungskörpers .....	30
Abbildung 4-6: Versuchsaufbau Basisversuch .....	31
Abbildung 4-7: Injizierfähigkeit von Lockergesteinen .....	33
Abbildung 4-8: Abdichtungskörpergrößen bei unterschiedlichen Lagerungsdichten .....	38
Abbildung 4-9: Strukturstörungen bei Abdichtungskörpern in gemischtkörnigem Boden .....	40
Abbildung 4-10: Abdichtungskörper im gemischt- (links) und grobkörnigen (rechts) Boden..	42
Abbildung 4-11: Abdichtungskörper in wassergesättigtem (links) und erdfeuchtem (rechts) Boden .....	43
Abbildung 4-12: Abdichtungsgebilde nach Sanierung (links) und Aushärtung (rechts) .....	46
Abbildung 4-13: Abdichtungsgebilde nach Rohrausbau .....	47
Abbildung 4-14: Ergebnisübersicht zu den Randbedingungen des Injektionsmediums.....	48
Abbildung 4-15: Ergebnisübersicht zu den Randbedingungen des Rohrleitungssystems .....	53
Abbildung 4-16: Abdichtungskörper bei niedrigen Injektionsdrücken (0,035 / 0,020 / 0,005 bar) .....	58
Abbildung 4-17: Ergebnisübersicht zu den verfahrenstechnischen Parametern.....	59
Abbildung 5-1: Zwei-Zonen-Modell .....	70
Abbildung 5-2: Planung der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen .....	72
Abbildung 5-3: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus.....	78
Abbildung 5-4: Versuchseinrichtung, Umströmungsversuch.....	79
Abbildung 5-5: Einlagerung der Probekörper .....	80
Abbildung 5-6: Ablaufplan Umströmungsversuche .....	81
Abbildung 5-7: Leitungssystem im Umströmungsversuch .....	82
Abbildung 5-8: Umströmungsbeginn .....	83

Abbildung 5-9: Ablauf einer Sanierung.....	84
Abbildung 5-10: Versuchsaufbau und automatischer Probenehmer.....	86
Abbildung 5-11: Ablaufplan Einlagerungsversuche.....	87
Abbildung 5-12: Ablaufschema DIBt Merkblatt.....	91
Abbildung 5-13: pH-Wert- und Leitfähigkeitsverlauf.....	94
Abbildung 5-14: pH-Wert und Leitfähigkeitsverlauf [72 Stunden-Ausschnitt].....	95
Abbildung 5-15: TOC-, Natrium- und Calciumgehalt.....	97
Abbildung 5-16: Verlauf des pH-Wertes (Einlagerungsversuche).....	100
Abbildung 5-17: Leitfähigkeitsverläufe (Einlagerungsversuche).....	101
Abbildung 5-18: Verlauf TOC [Einlagerungsversuche, Tubogel].....	103
Abbildung 5-19: Verlauf Natriumkonzentration [Einlagerungsversuche, Tubogel].....	104
Abbildung 5-20: Abbaubarkeit der Einlagerungsversuche [Tubogel].....	106

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Durchschnittliche Leitungsdaten .....	10
Tabelle 3-2: Wasserdruckprüfung vor der Sanierung.....	12
Tabelle 4-1: Kenngrößen der Prüfkörper.....	26
Tabelle 4-2: Versuchsprogramm der Basisversuchsreihe.....	32
Tabelle 4-3: Bodenkennwerte und einzubauende Bodenmassen.....	34
Tabelle 4-4: Versuchsergebnisse Bodenart und Lagerungsdichte (Grobkörniger Boden).....	37
Tabelle 4-5: Versuchsergebnisse Bodenart und Lagerungsdichte (Gemischtkörniger Boden) .....	39
Tabelle 4-6: Versuchsergebnisse Bodenfeuchte.....	43
Tabelle 4-7: Versuchsergebnisse Hohlräume .....	45
Tabelle 4-8: Versuchsergebnisse Rohrmaterial .....	49
Tabelle 4-9: Versuchsergebnisse Schadensart.....	51
Tabelle 4-10: Versuchsergebnisse Schadensrichtung .....	52
Tabelle 4-11: Versuchsergebnisse Materialviskosität und Injektionsdruck .....	54
Tabelle 4-12: Versuchsergebnisse Temperatur .....	56
Tabelle 4-13: Versuchsergebnisse „Geringer Injektionsdruck“ .....	57
Tabelle 4-14: Sanierungsqualität bei verschiedenen Einflussvarianten .....	61
Tabelle 4-15: Beanspruchungsarten .....	63
Tabelle 5-1: Randbedingungen der Umströmungsversuche.....	73
Tabelle 5-2: Durchschnittliche Grundwassergefälle und Abstandsgeschwindigkeiten.....	74
Tabelle 5-3: Untersuchungsmatrix der Umströmungsversuche .....	77
Tabelle 5-4: Untersuchungsmatrix der Einlagerungsversuche.....	77
Tabelle 5-5: Intervalle der ph-Wert- und Leitfähigkeitsmessung .....	85
Tabelle 5-6: Beprobungsintervall und -umfang .....	86
Tabelle 5-7: Zusammenstellung der Sanierungsdaten (Umströmungsversuche) .....	88
Tabelle 5-8: Zusammenstellung der Sanierungsdaten (Einlagerungsversuche).....	89
Tabelle 5-9: physikochemische Parameter .....	96
Tabelle 5-10: Ergebnisübersicht der Toxizitätstests (Umströmungsversuche) .....	99
Tabelle 5-11: Ergebnisübersicht der Toxizitätstests (Einlagerungsversuche).....	105
Tabelle 5-12: Eluate der terrestrischen Untersuchungen.....	107
Tabelle 5-13: Kriterien zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser.....	109
Tabelle 5-14: Vergleich der Injektionsmittelverbräuche .....	113

## 1 Einleitung

Im August 1999 erhielt das „ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb“ der RWTH Aachen den Auftrag zur Durchführung eines Pilotvorhabens mit dem Thema „Anwendung des Flutungsverfahrens zur integralen Sanierung von Abwasserkanälen“. Wesentlicher Bestandteil dieses Pilotvorhabens war die Erprobung und Bewertung unterschiedlicher Vorgehensweisen und Materialien zur Sanierung von Kanälen, Hausanschlüssen und Grundstücksentwässerungsanlagen in situ.

Schon während der Durchführung des Pilotprojekts wurde deutlich, dass verschiedene Aspekte, bedingt durch die in situ vorgegebenen nicht steuer- und reproduzierbaren Randbedingungen, nur unzureichend analysiert und bewertet werden konnten. Daher wurde ein zweiteiliges Ergänzungsvorhaben geplant, in dem die Fragestellungen nach der Wirksamkeit einerseits und der Dauerhaftigkeit und Umweltverträglichkeit andererseits unter praxisnahen, reproduzierbaren Randbedingungen untersucht werden sollten.

Der Teil I des Ergänzungsvorhabens, der die Wirksamkeit von Sanierungen an Grundstücksentwässerungsanlagen mit dem Flutungsverfahren behandelt, wurde vom „ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb“ im März 2000 beantragt, von der Expertenkommission in der Sitzung am 27. März 2000 einstimmig zur Förderung empfohlen und mit dem Schreiben vom 26. Juni 2001 durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen beauftragt. Der Teil I des Ergänzungsvorhabens wurde im Dezember 2003 abgeschlossen.

Der Teil II des Ergänzungsvorhabens, der sich insbesondere mit der Dauerhaftigkeit und Umweltverträglichkeit von Sanierungen mit dem Flutungsverfahren befasst, wurde Ende 2003 vom „ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb“ beantragt, in der Sitzung am 01.03.2004 von der Expertenkommission einstimmig zur Förderung empfohlen und mit dem Schreiben vom 15.06.2005 durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen beauftragt. Der Teil II des Ergänzungsvorhabens wurde im Dezember 2006 abgeschlossen.

In dem vorliegenden Abschlussbericht zum Teil II werden die durchgeführten Untersuchungen und analysierten Zusammenhänge beider Vorhabensteile sowie des Pilotprojekts dargestellt.

## 2 Das Flutungsverfahren

Bei den Sanierungen mit dem Flutungsverfahren werden zwei chemische Lösungen, Komponente 1 und Komponente 2, nacheinander durch die Schadstellen der Leitungen und Kanäle in die Leitungszone injiziert. Die Injektionen beruhen auf dem Prinzip der Auffüllinjektion, bei der die Porenräume des Bodens möglichst gleichmäßig mit den Injektionsmitteln gefüllt werden.

Die Abdichtung der Schadstellen wird durch die Ausbildung lokaler Boden-Gel-Körper erzielt, die sich aus den Feststoffen des Bodens und dem Reaktionsprodukt der Injektionskomponenten zusammensetzen. Aufgrund der Festigkeitseigenschaften des Reaktionsproduktes geht mit der Abdichtung der Schadstellen auch eine Verfestigung des injizierten Bodenbereiches einher.

Die Verfahrenstechnik des Flutungsverfahrens ist gekennzeichnet durch die Nutzung des zu sanierenden Leitungssystems als Förder- und Verteilleitung und durch das Verpressen der Injektionsmittel mittels einer hydrostatischen Druckhöhe.<sup>1</sup> Diese Merkmale erübrigen den Einsatz einer aufwändigen Gerätetechnik. Neben Absperreinrichtungen zur Begrenzung der Sanierungsabschnitte werden für die Sanierungsausführung hauptsächlich Materialvorräte für die Komponenten und eine Pumpe mit entsprechenden Zuleitungen benötigt.

Die in dem Forschungsvorhaben verwendeten Injektionsmaterialien sind durch bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt zertifiziert worden. In den Zulassungen wird das Einsatzgebiet des Flutungsverfahrens als ein „... Abdichtungsverfahren für Abwasserkanäle, Abwasserleitungen und Schächte aus Beton, Steinzeug, Faserzement, Mauerwerk (nur für Schächte) und Gusseisen [eingegrenzt]. Es dürfen auch Muffenverbindungen in Abwasserleitungen aus PVC – U mit diesem Verfahren saniert werden. Es darf für die Sanierung von Rissbildungen, undichten Rohrverbindungen und Anschlussstellen (unabhängig vom Rohrmaterial) unter folgenden Bedingungen verwendet werden:

- Radialrisse mit einer breite  $\leq 5$  mm
- Axialrisse mit einer Breite  $\leq 3$  mm
- Kombination von Rissen in Längs- und Radialrichtung mit vorgenannten Bedingungen
- undichte Muffenspalte (Rohrverbindungen)
- keine Wurzeleinwüchse“<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Stein, D., Kanalisationen, 1999, S. 409.

<sup>2</sup> o.V., Bauaufsichtliche Zulassung TUBOGEL, 2003, S.3.

### 3 Praxisuntersuchungen (Pilotvorhaben)

Zur Einschätzung des Flutungsverfahrens im Anwendungsbereich häuslicher Grundleitungsnetze wurde eine exemplarische Sanierungsmaßnahme in situ (Untersuchungsobjekt „Grüner Hof“ in Köln) über die verschiedenen Ausführungsphasen wissenschaftlich begleitet. Insbesondere wurden der Zustand der Leitungen vor der Sanierung und die Sanierungsdurchführung dokumentiert sowie das Ergebnis nach der Sanierung geprüft.

#### 3.1 Untersuchungsobjekt

Als Untersuchungsobjekt wurde die Wohnanlage „Grüner Hof“, nachfolgend auch „Sanierungsobjekt“ genannt, in Köln-Mauenheim ausgewählt. Die Wohnanlage, die um 1930 errichtet wurde, umfasst 67 Mehrfamilienhäuser mit jeweils 6 bis 8 Wohneinheiten und steht unter Besitzverwaltung der Kölner Wohnungsbaugesellschaft GAG<sup>3</sup> (Abbildung 3-1).

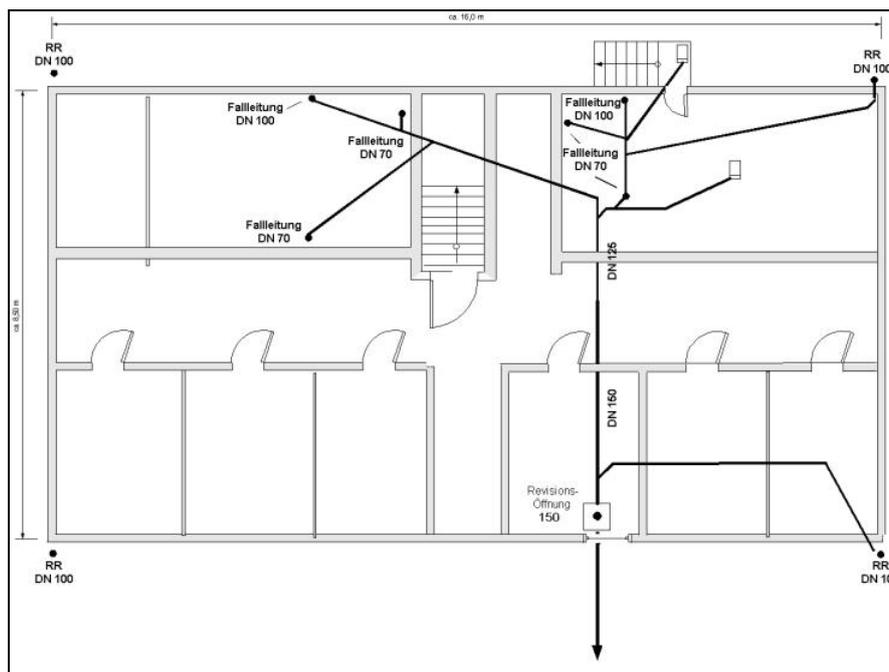


Abbildung 3-1: Sanierungsobjekt „Grüner Hof“

Das Entwässerungsnetz des Sanierungsobjektes besteht aus öffentlichen Kanälen, Hausanschlussleitungen und Grundleitungsnetzen, von denen letztere den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit darstellen. In Abbildung 3-2 ist stellvertretend für alle Grundleitungsnetze, die im allgemeinen den gleichen Aufbau und ähnliche Abmessungen aufweisen, das Grundleitungsnetz des Gebäudes Grüner Hof 16 dargestellt. Regen- und Abwasser werden bei dem als Mischsystem betriebenen Grundleitungsnetz über vertikale Fallleitungen und horizontale Nebenstränge dem Hauptstrang zugeführt und jenseits der Revisionsöffnung durch den Hausanschlusskanal in den öffentlichen Kanal geleitet.

---

<sup>3</sup> GAG Immobilien AG, Josef-Lammerting-Allee 20-22, 50993 Köln.



**Abbildung 3-2: Exemplarisches Grundleitungsnetz „Grüner Hof“**

Für die vertikalen Leitungsteile wurden Gussrohre mit den Leitungsdurchmessern DN 100 und DN 70 verwendet. Die horizontalen Leitungsteile bestehen aus Steinzeugrohren (DN 150/ DN 125/ DN 100) und sind mit einem Gefälle von etwa 2 % in einer Tiefenlage von 0,3 bis 1,2 m (durchschnittlich 0,6 m) unterhalb der Bodenplatte (Oberkante) verlegt. Bei einer durchschnittlichen Leitungslänge von ca. 30 m verfügen die Grundleitungsnetze über ein Volumen von 340 l und eine Rohrrinnenfläche von 12 m<sup>2</sup> (Tabelle 3-1). Die aufgeführten mittleren Leitungsdaten werden bei den folgenden Auswertungen als Referenzgrößen herangezogen.

**Tabelle 3-1: Durchschnittliche Leitungsdaten**

Sanierungseinheit	Tiefenlage [m]	Leitungslänge [m]	Leitungsvolumen [l]	Rohrrinnenfläche [m <sup>2</sup> ]
Mittelwert	0,60	30	342	11,87

Die Darstellung der Untersuchungsergebnisse erfolgt in Anlehnung an das in DIN EN 752 festgelegte Ablaufschema einer Sanierung.

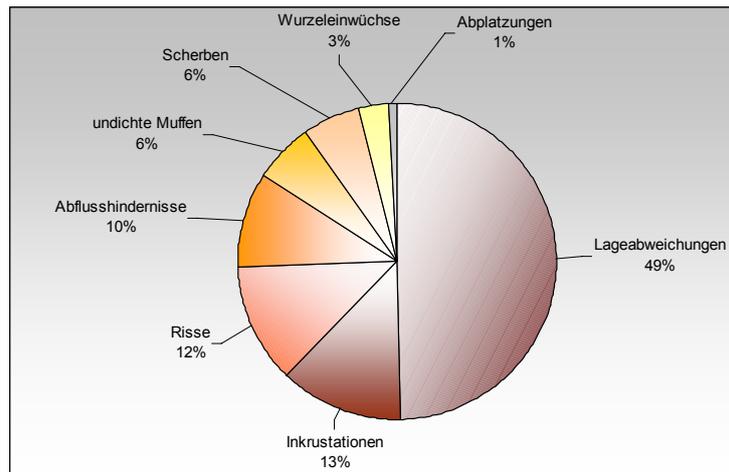
### 3.2 Zustand der Grundleitungsnetze vor der Sanierung

Der Ist-Zustand der Grundleitungsnetze wurde anhand baulicher und umweltrelevanter Untersuchungen festgestellt und beurteilt. Dazu wurden die Grundleitungsnetze durch

Kamerabefahrungen optisch inspiziert und mittels Wasserdruckprüfungen auf Dichtheit überprüft.

### 3.2.1 Baulicher Zustand

Bei den Kamerabefahrungen der 67 Grundleitungsnetze wurden zahlreiche Schadensbilder und ein insgesamt hoher Schädigungsgrad festgestellt. Die detektierten Schäden sind in Abbildung 3-3 gemäß ATV-M 143-2 klassifiziert.



**Abbildung 3-3: Schadensverteilung**

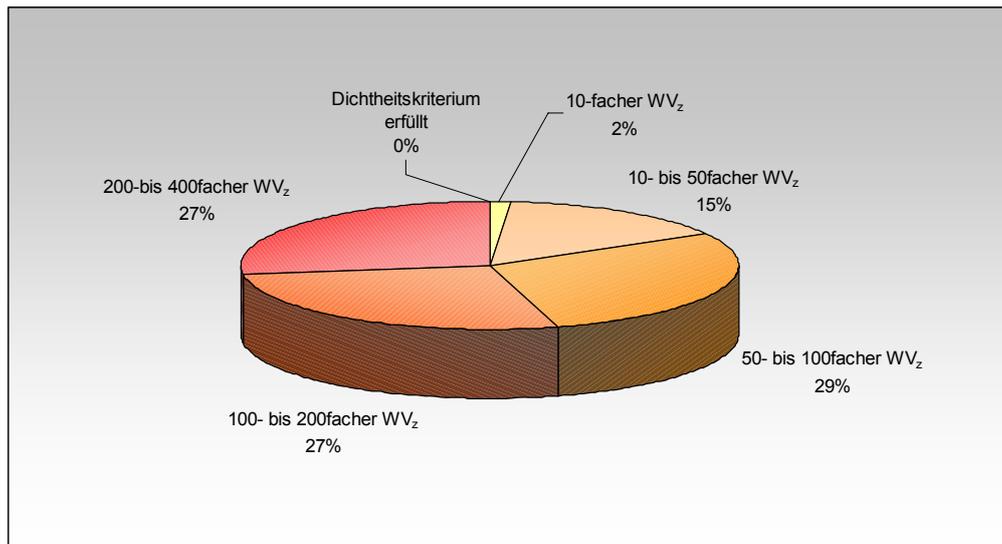
Als häufigste Schadensarten wurden bei den Grundleitungsnetzen „Lageabweichungen“, „Inkrustationen“ und „Risse“ festgestellt. Diese Schadensarten machten etwa 75 % aller Schäden aus. Dagegen betrug der Anteil der Schadensarten „Abflusshindernis“, „undichte Muffe“, „Scherbe“, „Wurzeleinwuchs“ und „Abplatzung“ nur etwa 25 %. Die Schäden außerhalb der Anwendungsgrenzen des Flutungsverfahrens (Abflusshindernisse, Wurzeleinwüchse, Scherben) wurden vor den Sanierungen mit dem Flutungsverfahren anderweitig behoben.

### 3.2.2 Dichtheitszustand

Der Dichtheitszustand der Grundleitungsnetze wurde mit einer Wasserdruckprüfung nach DIN 1986-30 überprüft. Als Dichtheitskriterium ergab sich hieraus ein zulässiger Wasserverlust ( $WV_z$ ) von durchschnittlich 2,4 l pro Grundleitungsnetz. Der Prüfdruck, der über eine Wassersäule bis zur Oberkante der Bodenplatte eingestellt wurde, betrug entsprechend der Tiefenlage der Leitungen etwa 0,06 bar am Rohrscheitel.

Die Wasserdruckprüfungen ergaben, dass keines der geprüften Leitungssysteme das geforderte Dichtheitskriterium erfüllte und die gemessenen Wasserverluste (WV) in den meisten Fällen um ein Vielfaches über den zulässigen Wasserverlusten lagen.

Zur Darstellung der Prüfergebnisse wurden die gemessenen Wasserverluste auf den zulässigen Wasserverlust bezogen und nach dem Faktor der Überschreitung gruppiert (Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4: Einteilung der gemessenen Wasserverluste (WV)**

Im Mittel betrug der gemessene Wasserverlust 396 l, was einer etwa 165-fachen Überschreitung des zulässigen Wertes von 2,4 l entspricht. Das Minimum der gemessenen Wasserverluste lag bei 24 l und damit um das 10-fache über dem zulässigen Wasserverlust. Für das Maximum ergab sich aus dem gemessenen Wasserverlust von 800 l eine etwa 350-fache Überschreitung (Tabelle 3-2).

**Tabelle 3-2: Wasserdruckprüfung vor der Sanierung**

	Sanierungseinheit*	Leitungsvolumen [l]	Rohrinnenfläche [m <sup>2</sup> ]	Wasserverlust (WV) [l]	Dichtheitskriterium ( $WV_{zul}$ ) [l]	Anwendungsgrenze Flutungsverfahren (70 % d. Leitungsvol.) [l]
Minimum	FKS 8	336	11,84	24	2,4	235
Mittelwert		342	11,87	396	2,4	239
Maximum	N 509	327	11,50	800	2,3	229

Der mittlere gemessene Wasserverlust (396 l) entspricht einer Menge von etwa 116 % des Rohrleitungsvolumens (342 l) und lag damit deutlich über der empfohlenen Anwendungsgrenze<sup>4</sup> für das Flutungsverfahren (239 l).

### 3.2.3 Zustandsbeurteilung

Die baulichen und umweltrelevanten Untersuchungen am Sanierungsobjekt ergaben, dass die Grundleitungsnetze ausnahmslos in einem schlechten Zustand waren. Die ermittelten Schadensbilder und das Ausmaß der Undichtigkeiten zeigen dabei weitgehende Übereinstimmungen zu Untersuchungsergebnissen an anderen Grundleitungsnetzen.<sup>5</sup> Insgesamt stellt das gewählte Sanierungsobjekt damit eine geeignete Grundlage zur repräsentativen Untersuchung des Flutungsverfahrens im Anwendungsbereich häuslicher Grundleitungsnetze dar.

Zu Untersuchungszwecken wurden die Grundleitungsnetze auch dann mit dem Flutungsverfahren saniert, wenn die gemessenen Wasserverluste oberhalb der empfohlenen Anwendungsgrenze lagen.

### 3.3 Sanierung

Bei der Sanierungsmaßnahme sollten drei verschiedene Injektionsmittel des Flutungsverfahrens zum Einsatz kommen. Dementsprechend wurde das Sanierungsobjekt in drei Abschnitte eingeteilt und mit verschiedenen Injektionsmitteln von unterschiedlichen Fachfirmen saniert (Abbildung 3-5). Weiterhin sollten ebenfalls zwei verschiedene Ausführungsarten, die Einzelsanierung und die integrale Sanierung<sup>6</sup>, erprobt werden.

Der Abschnitt 1 (blau) umfasste 31 Grundleitungsnetze, die von Oktober 2000 bis Januar 2001 mit dem Injektionsmittel RATHOSAN einzeln saniert wurden. Im Abschnitt 2 (grün), zu dem 32 Grundleitungsnetze zählten, wurden die Sanierungen im Juli und August 2001 mit dem Injektionsmittel SANIPOR ausgeführt. Als Ausführungsvariante kam hier überwiegend die integrale Sanierung zur Anwendung. Der Abschnitt 3 (gelb) bestand aus 4 Grundleitungsnetzen, bei denen die Sanierungen im Dezember 2001 mit dem Injektionsmittel TU-BOGEL als Einzelsanierungen durchgeführt wurden.

---

<sup>4</sup> In den bauaufsichtlichen Zulassungen der Injektionsmaterialien wird die Anwendung des Flutungsverfahrens nur bis zu einem Wasserverlust unterhalb von 70 % des gesamten Leitungsvolumens empfohlen.

<sup>5</sup> Vgl. Kipp, B., Möllers, K., Grundstücksentwässerungsleitungen - Projekterfahrung, 1992 S. 17-24; Fiedler, M., TV-Untersuchungen in Hausanschlusskanälen, 1997, S. 440-447; Thoma, R., Grundstücksentwässerungsanlagen, 2005, S. 725-730.

<sup>6</sup> Der Begriff „integrale Sanierung“ beschreibt die Sanierung mehrerer Grundleitungsnetze indem die Flutung der Leitungen gleichzeitig über den öffentlichen Kanal vorgenommen wird.



**Abbildung 3-5: Sanierungsabschnitte „Grüner Hof“**

Die Sanierungen, deren Planung und Ausführung im Verantwortungsbereich der Sanierungsfirmen lagen, wurden grundsätzlich mit Injektionszeiten von jeweils 45 Minuten und einem Injektionsdruck von durchschnittlich 0,06 bar, der über eine hydrostatische Druckhöhe bis zur Oberkante der Bodenplatte aufgebaut wurde, durchgeführt.

### **3.3.1 Ausführungsmerkmale**

Zur Sanierung der Grundleitungsnetze waren ein bis sechs, im Mittel ca. drei Injektionszyklen erforderlich. Hierbei wurden folgende wesentlichen Ausführungsmerkmale beobachtet:

#### Ausführungszeiten:

Durchschnittlich wurden für die Sanierung eines Grundleitungsnetzes 0,5 Arbeitstage benötigt.

#### Geräteausstattung:

Für die Sanierungsdurchführung war nur eine geringe Geräteausstattung erforderlich. Dazu zählten im Wesentlichen Tankbehälter für die Injektionsmaterialien, Absperrlemente zur Begrenzung der Sanierungseinheiten und eine Pumpe mit Schläuchen zum Befüllen und Entleeren der Sanierungseinheiten. Von Vorteil waren Messeinrichtungen zur Vereinfachung und Präzisierung der Verbrauchsbestimmung.

### Umgebungsbeeinträchtigungen:

Bei der Sanierungsausführung kam es lediglich zu kurzzeitigen und geringfügigen Umgebungsbeeinträchtigungen in Form von Verkehrsbehinderungen oder Nutzungseinschränkungen im Sanierungsbereich.

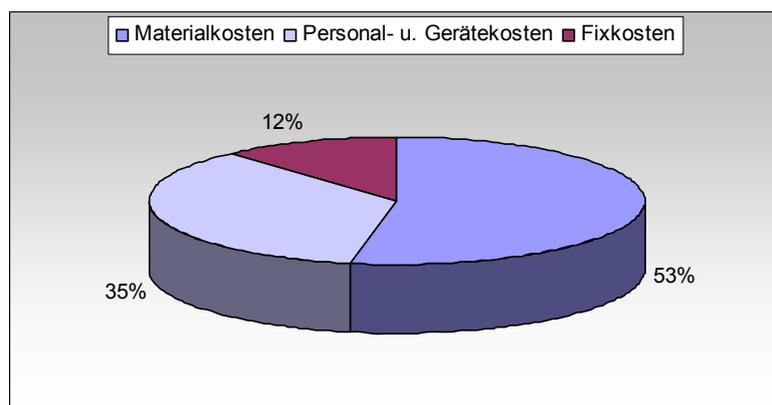
### Materialverbrauch:

Die eingesetzten Materialmengen unterlagen starken Schwankungen. Dabei war ein einheitliches Mengenverhältnis der Komponenten untereinander sowie eine Korrelation zwischen den Materialmengen und den zur Mengenabschätzung in der Praxis verwendeten Referenzgrößen „Wasserverlust“ und „Rohrleitungsvolumen“ nicht erkennbar.

### **3.3.2 Sanierungskosten**

Die Sanierungskosten je Grundleitungsnetz wurden anteilig aus den Gesamtkosten der einzelnen Verfahrensvarianten errechnet.<sup>7</sup> Für die Aufteilung der Sanierungskosten in fixe und variable Kostenbestandteile wurden zusätzlich die Erkenntnisse weiterer Praxisuntersuchungen herangezogen.<sup>8</sup>

Die Sanierungskosten je Grundleitungsnetz variierten bei der Sanierungsmaßnahme zwischen 2.440 € und 4.220 €; durchschnittlich betrugen sie 3.285 €. Die Durchschnittskosten setzten sich aus variablen Kosten in Höhe von ca. 2.885 € (88 %) und fixen Kosten in Höhe von etwa 400 € (12 %) zusammen (Abbildung 3-6). Von den variablen Kosten wiederum entfielen etwa 60 % auf die Materialkosten und 40 % auf die Personal- und Gerätekosten.



**Abbildung 3-6: Kostenaufteilung**

<sup>7</sup> Vgl. Dornbusch, J., Integrale Sanierungen mit dem Flutungsverfahren, 2002, S. 39-40.

<sup>8</sup> Vgl. Dornbusch, J., Sanierungen auf Chemischreinigungsstandorten, 2004, S. 35.

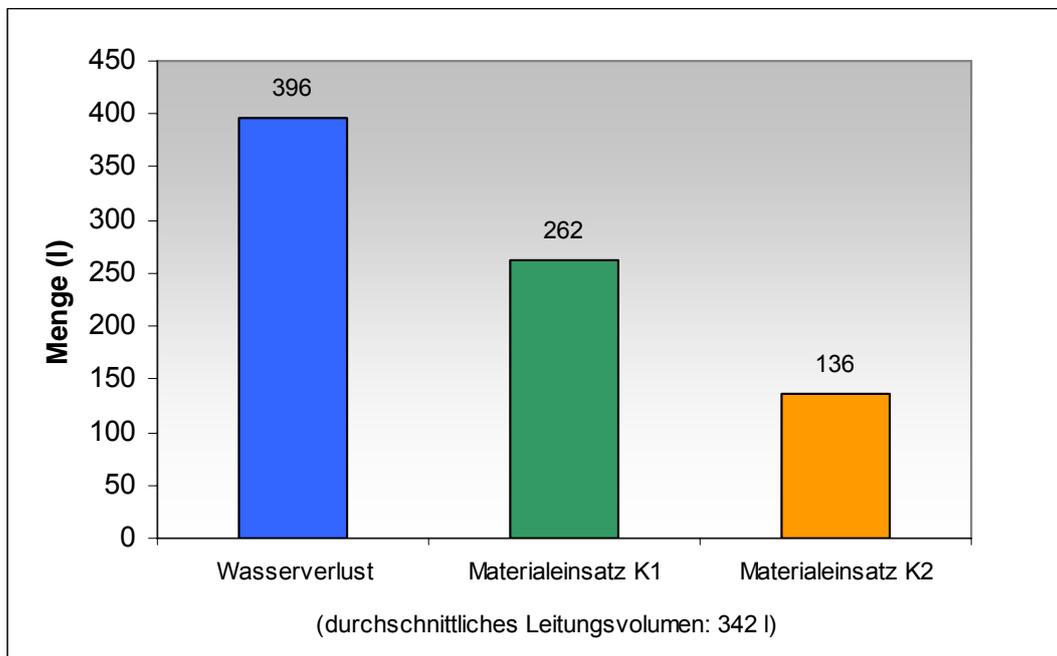
Die Analyse zeigte weiter, dass die integrale Sanierung im Vergleich zur Einzelsanierung zu Kosten- und Zeitersparnissen führte. Die Fixkosten konnten hier auf mehrere Eigentümer verteilt und die Sanierungsleistung durch die Einsparung zeitintensiver Arbeiten wie das separate Füllen und Leeren der Leitungen gesteigert werden. Schwierig war bei der integralen Sanierung allerdings der organisatorische Zusammenschluss des Kanalnetzbetreibers und der verschiedenen Grundstückseigentümer für Ausschreibung, Durchführung sowie Abrechnung.

Da die Sanierungskosten in hohem Maß von den eingesetzten Materialmengen abhängen, wurde der Materialeinsatz weitergehend untersucht.

### 3.3.3 Materialeinsatz

Zur Auswertung des Materialeinsatzes wurden die Materialmengen um Verlustmengen bereinigt, die auf eine unsachgemäße Vorgehensweise beim Abpumpen der in der Leitung verbliebenen Restmengen zurückzuführen waren.

Durchschnittlich wurden bei der Sanierungsmaßnahme 262 l der Komponente 1 (K1) und 136 l der Komponente 2 (K2) je Grundleitungsnetz injiziert (Abbildung 3-7).

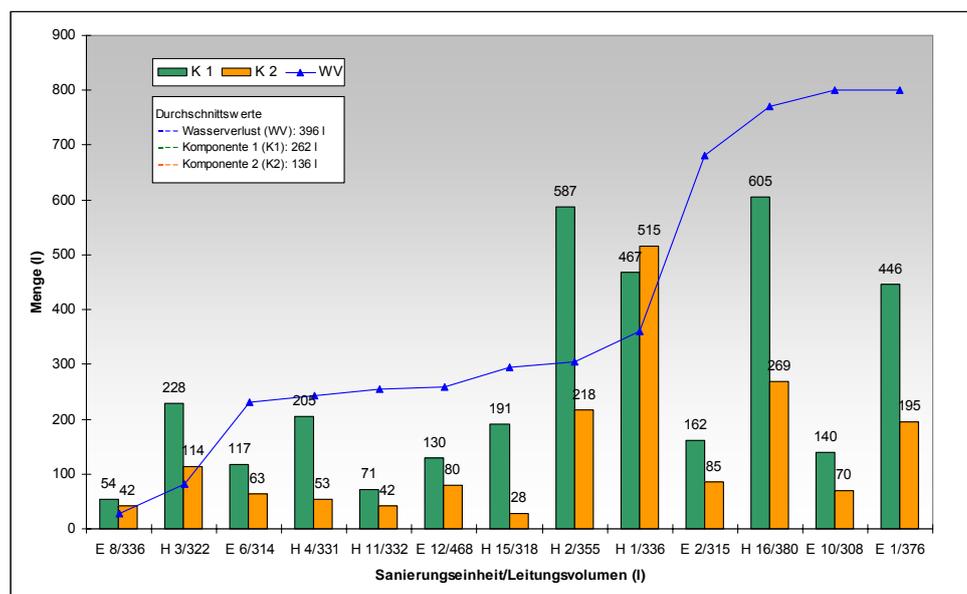


**Abbildung 3-7: Materialmengen (Mittelwerte)**

Aus dem *durchschnittlichen Materialeinsatz* ergeben sich Verhältniswerte von

- 1,92 : 1 für die Komponenten untereinander (K1 : K2),
- 0,67 (K1) und 0,35 (K2) für die Referenzgröße Wasserverlust (396 l),
- 0,77 (K1) und 0,40 (K2) für die Referenzgröße Leitungsvolumen (342 l).

Die *Einzelauswertung der Sanierungseinheiten* macht allerdings deutlich, dass die Durchschnittswerte eine erhebliche Varianz aufweisen (Abbildung 3-8). So variierten die Injektionsmengen für die Komponente 1 zwischen 54 l und 605 l und für die Komponente 2 zwischen 28 l und 515 l. In der Abbildung 3-8 sind exemplarisch die Injektionsmittelmengen der Sanierungsabschnitte 2 und 3 dargestellt. Die Sanierungseinheiten sind entsprechend den Wasserverlusten in aufsteigender Reihenfolge angeordnet. Bei der Bezeichnung der Sanierungseinheiten steht „E“ für einzeln sanierte Grundleitungssysteme und der Buchstabe „H“ für die integrale Sanierungsdurchführung. Die Bezeichnung ist um das jeweilige Rohrleitungsvolumen erweitert.



**Abbildung 3-8: Materialmengen (Einzelwerte)**

Die Darstellung zeigt, dass keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den Materialmengen und den Referenzgrößen „Wasserverlust“ und „Leitungsvolumen“ bestehen. Beispielsweise ergaben sich bei Sanierungseinheit E 10 trotz eines hohen Wasserverlustes von 800 l relativ geringe Materialmengen, wohingegen bei der Sanierungseinheit H 3 mit einem geringen Wasserverlust von unter 100 l vergleichsweise viel Material injiziert wurde. Ebenso unerwartet wurden beim kleinsten Grundleitungsnetz (E 10/308 l) und größten Grundleitungsnetz (E 12/468 l) annähernd gleiche Materialmengen eingesetzt.

Weiterhin wird aus Abbildung 3-8 ersichtlich, dass die Verhältniswerte der Komponenten ( $K_1 : K_2$ ) starken Schwankungen unterliegen. So variieren die Werte zwischen 1,3 : 1 (Sanierungseinheit E 8) und 6,8 : 1 (Sanierungseinheit H 15). Bei Sanierungseinheit H 1 übersteigt die Materialmenge von Komponente 2 sogar die Menge von Komponente 1 (Verhältniswert: 1 : 1,1).

Insgesamt ist der Materialeinsatz bei der Sanierungsmaßnahme, vor allem aufgrund der fehlenden Zusammenhänge der Materialmengen zum Wasserverlust und der starken Schwankungen der Verhältniswerte ( $K_1 : K_2$ ), als äußerst indifferent zu bewerten.

### **3.4 Erfolgskontrollen**

Zur Feststellung des Sanierungserfolges wurden innerhalb von 14 Tagen nach den Sanierungen Wasserdruckprüfungen gemäß den bauaufsichtlichen Zulassungen durchgeführt. Die Erfolgskontrollen ergaben, dass sämtliche Grundleitungsnetze das vorgegebene Dichtheitskriterium erfüllten und damit als erfolgreich saniert eingestuft werden konnten.

Obwohl die Sanierungen zunächst zur vollständigen Abdichtung der Grundleitungsnetze geführt hatten, war bei dem Großteil der Sanierungen nach 3 bis 4 Jahren die erforderliche Abdichtungswirkung nicht mehr vorhanden.

### **3.5 Zusammenfassung**

Aus den Untersuchungen an der Sanierungsmaßnahme „Grüner Hof“ lässt sich festhalten, dass die Sanierung von Grundleitungsnetzen mit dem Flutungsverfahren in relativ kurzer Zeit, mit geringem Geräteaufwand und ohne größere Umgebungsbeeinträchtigungen durchführbar ist. Bezüglich der wichtigen Verfahrensanforderungen „Dauerhaftigkeit“ und „Materialeinsatz“ fallen die Untersuchungsergebnisse jedoch unbefriedigend aus.

Die eingesetzten Materialmengen, die den Großteil der Sanierungskosten ausmachten, unterlagen starken Schwankungen. Dabei war ein einheitliches Mengenverhältnis der Komponenten untereinander sowie eine Korrelation zwischen den Materialmengen und den zur Mengenabschätzung verwendeten Referenzgrößen „Wasserverlust“ und „Rohrleitungsvolumen“ nicht erkennbar.

Den Vorteilen des hohen Praxisbezuges stehen bei Untersuchungen in situ die Nachteile mangelnder Auswert- und Vergleichbarkeit gegenüber. In situ sind die Randbedingungen für eine Sanierung, was Art und Umfang der Schadstellen sowie die Eigenschaften des Bodens - im Besonderen seine Art und Lagerungsdichte- betrifft, vorgegeben und weitgehend unbe-

kannt. Damit ist die Reproduzierbarkeit gleicher Randbedingungen zum Zweck einer statistischen Ergebnisanalyse nicht möglich. Auch die Erfolgskontrolle nach der Sanierung ist nur mit den üblichen Maßnahmen, wie Kamerabefahrung und Wasserdichtheitsprüfung, durchführbar. Die weitergehende Untersuchung der Sanierungsergebnisse, z.B. durch Freilegung der Leitungen, steht den Interessen der Grundstückseigentümer entgegen.

Aus den oben genannten Einschränkungen beim Pilotvorhaben „Grüner Hof“ ergaben sich Fragestellungen, die geklärt werden sollten, bevor diese Sanierungsmethode in größerem Umfang zur Anwendung kommt:

- Welchen Einfluss haben die jeweiligen Randbedingungen, insbesondere die Art und der Zustand des Rohrleitungsnetzes sowie die Beschaffenheit des Bodens, auf die **Wirksamkeit** bzw. die **Dauerhaftigkeit** der Sanierung?
- Welche **ökologischen Auswirkungen** sind bei Sanierungen mit dem Flutungsverfahren zu erwarten?

## **4 Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit (Ergänzungsvorhaben I und II)**

Den Ausgangspunkt für die Untersuchungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit stellten die Wiederholungsprüfungen der Sanierungen am „Grünen Hof“ dar. Hierbei wurde deutlich, dass der Großteil der sanierten Grundleitungssysteme nach 3 bis 4 Jahren Leitungsbetrieb die geforderten Dichtheitskriterien nicht mehr erfüllte. Da die Nutzung der Wohnanlage einer weitergehenden Untersuchung der Ursachen entgegenstand, wurden spezielle Versuchsreihen in der Institutshalle des „ibb“ durchgeführt. Im Zuge der Versuchsreihen wurden zunächst durch Materialprüfungen maßgebende Kenngrößen ermittelt und im Hinblick auf die Wirksamkeit bzw. Dauerhaftigkeit ausgewertet. Anschließend wurden in einer realitätsnahen Versuchsreihe zur Abdichtungswirksamkeit geeignete und problematische Sanierungsbedingungen identifiziert. In der abschließenden Versuchsreihe zur Beständigkeit wurde die Wirksamkeit der Sanierungen unter ausgewählten Beanspruchungen (Hochdruckspülungen, Temperaturwechsel, Erschütterungen, etc.) festgestellt. Durch die Untersuchungen wird zum einen die Erklärung der in situ Ergebnisse möglich. Zum anderen liefern sie wichtige Ansätze zur Verbesserung des Flutungsverfahrens.

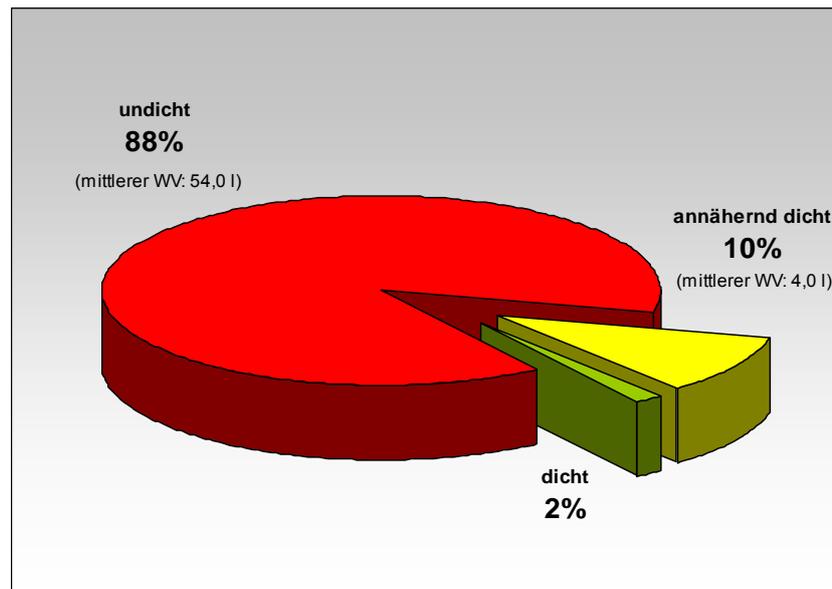
### **4.1 Wiederholungsprüfungen in situ**

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit der Sanierungen wurden an den Grundleitungsnetzen in der Zeit von November 2004 bis Januar 2005, d. h. etwa 3 bis 4 Jahre nach Sanierungsausführung, Wiederholungsprüfungen durchgeführt. Die Wiederholungsprüfungen setzten sich aus Wasserdruckprüfungen nach DIN 1986-30 und Wasserprüfungen mit einer verminderten Druckhöhe zusammen. Mit Ausnahme von sechs Grundleitungsnetzen, bei denen die Durchführung der Dichtheitsprüfungen aus organisatorischen Gründen nicht möglich war, wurden sämtliche Grundleitungsnetze in die Untersuchungen einbezogen.

#### **4.1.1 Druckprüfungen nach DIN 1986 Teil 30**

Die Wasserdruckprüfungen wurden gemäß DIN 1986-30 mit einer Prüfzeit von 15 Minuten und einer hydrostatischen Prüfdruckhöhe bis zur Oberkante der Bodenplatte ( $\varnothing$  0,06 bar) durchgeführt.

In Abbildung 4-1 ist das Gesamtergebnis der Druckprüfungen qualitativ, d. h. eingeteilt in dichte, annähernd dichte und undichte Grundleitungsnetze, dargestellt.



**Abbildung 4-1: Ergebnisse der Druckprüfungen**

Bei den Druckprüfungen erfüllten 2 % der Grundleitungsnetze das Dichtheitskriterium ( $WV_z = 2,4 \text{ l}$ ). Bei weiteren 10 % der Grundleitungsnetze lag der gemessene Wasserverlust (WV) unterhalb des zweifachen Grenzwertes ( $2 \times WV_z = 4,8 \text{ l}$ ). Diese Grundleitungsnetze sind in Abbildung 4-1 als annähernd dicht bezeichnet. Für den Großteil der Grundleitungsnetze (88 %) wurden mit durchschnittlich 54 l Wasserverluste deutlich oberhalb des zulässigen Wasserverlustes gemessen.

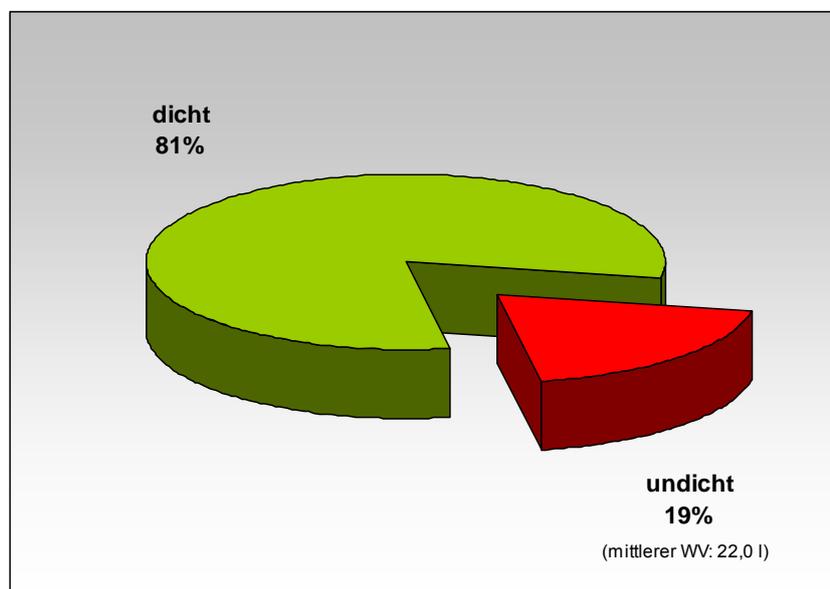
Die Druckprüfungen verdeutlichen, dass der Dichtheitszustand der Grundleitungsnetze 3 bis 4 Jahre nach der Sanierung insgesamt zwar besser ist als vor der Sanierung, der überwiegende Teil der Sanierungen die erforderliche Dichtwirkung jedoch verloren hat. Die weitergehende Analyse der Prüfergebnisse ergab keine Aufschlüsse hinsichtlich der Ergebniskausalität. So waren Zusammenhänge zwischen den gemessenen Wasserverlusten und den bekannten Sanierungsbedingungen (Dichtheitszustand vor der Sanierung, Verfahrensvarianten, Ausführungsarten, Leitungstiefen, usw.) nicht feststellbar.

#### **4.1.2 Wasserprüfungen mit verminderter Druckhöhe**

Zur lokalen Eingrenzung der Undichtigkeiten wurden an den Grundleitungsnetzen im zweiten Schritt Wasserprüfungen mit verminderter Druckhöhe durchgeführt. Bei diesen Prüfungen wurde ein Wasserpegel bis zur Oberkante des höchstliegenden Rohrscheitels eingestellt, so dass der Prüfungsabschnitt primär nur die horizontalen Leitungsteile umfasste. Analog zu den Druckprüfungen wurde die Prüfzeit auf 15 Minuten und das Dichtheitskriterium auf  $0,20 \text{ l/m}^2$  ( $WV_z = 2,4 \text{ l}$ ) festgelegt.

Weiterhin sollten die Prüfungen mit verminderter Druckhöhe, die zu diesem Zweck jeweils vor und nach den Druckprüfungen durchgeführt wurden, Erkenntnisse über die Auswirkungen der Prüfdruckbelastung nach DIN 1986-30 auf die Abdichtungswirkung liefern.

In Abbildung 4-2 ist das Gesamtergebnis der Dichtheitsprüfungen mit verminderter Druckhöhe eingeteilt in dichte und undichte Grundleitungsnetze dargestellt. Bei den Prüfungen mit verminderter Druckhöhe erfüllten 81 % der sanierten Grundleitungsnetze das geforderte Dichtheitskriterium ( $WV_z = 2,4 \text{ l}$ ). Bei 19 % der Prüfungen lag der gemessene Wasserverlust mit durchschnittlich ca. 22 l über dem zulässigen Wasserverlust. Unabhängig vom Prüfungszeitpunkt – vor bzw. nach der Druckprüfung gemäß DIN 1986-30 – wurden bei den Prüfungen mit verminderter Druckhöhe die gleichen Ergebnisse gewonnen.



**Abbildung 4-2: Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen mit verminderter Druckhöhe**

Die Prüfungen mit verminderter Druckhöhe haben gezeigt, dass die Belastung der Abdichtungskörper durch die Wasserdruckprüfungen nach DIN 1986-30 nicht zu einer Beeinträchtigung der Abdichtungswirkung geführt hat. Weiterhin kann aus den Ergebnissen gefolgert werden, dass in erster Linie die vertikalen Leitungsteile für die bei den Druckprüfungen gemessenen Wasserverluste verantwortlich waren und dass darüber hinaus bei einigen Grundleitungsnetzen auch Wasserverluste in den horizontalen Leitungsteilen auftraten.

Zur Klärung der Ursachen für das unbefriedigende Sanierungsergebnis wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zu den Materialeigenschaften (Kap. 4.2), zur Wirksamkeit (Kap. 4.3) und zur Beständigkeit (Kap. 4.4) durchgeführt.

## 4.2 Untersuchungen zu den Materialeigenschaften (Laborversuche)

Ziel der Laborversuchsreihe war es, die Materialeigenschaften der Abdichtungskörper unter verschiedenen Randbedingungen zu ermitteln und damit eine Abschätzung der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit vorzunehmen. Zu diesem Zweck wurden gleichförmige Prüfkörper hergestellt und untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Erklärung der in den weitergehenden Versuchsreihen zur Wirksamkeit und Beständigkeit gewonnen Versuchsergebnisse.

### 4.2.1 Versuchskonzeption

Aus den maßgebenden Beanspruchungs- und Anforderungsprofilen der Abdichtungskörper sowie den schon bereits im Rahmen der Zulassungen getesteten Materialkenngrößen wird deutlich, dass der Ursprungszustand der Abdichtungskörper aufgrund der dauerhaft stattfindenden Beanspruchungen, z. B. durch mechanische Kräfte, Temperatureinflüsse, Änderungen der Feuchtigkeit sowie chemische und biologische Beanspruchungen, nicht erhalten bleibt. Unter diesen Beanspruchungen kann sich der Körper in Aufbau, Struktur, Gestalt, Abmessungen, Masse und Oberflächenmerkmalen verändern.

Vor diesem Hintergrund wurden bei den Materialprüfungen folgende Kenngrößen ermittelt:

- Druckfestigkeit
- Punktlastfestigkeit
- Haftfestigkeit
- Thermische Ausdehnung
- Wasserundurchlässigkeit
- Abriebfestigkeit
- Alterung

#### Druckfestigkeit:

Zur erfolgreichen Abdichtung einer Leckage muss der Abdichtungskörper eine gewisse Druckfestigkeit aufweisen, um die Wasserdruckprüfung schadlos zu überstehen. Mit der Druckfestigkeit wird ein Wert gewonnen, mit dem ebenfalls der Erhärtungsverlauf des Materials beschrieben werden kann.

#### Punktlastfestigkeit:

Der Punktlastversuch dient zur indirekten Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit an unregelmäßig geformten Prüfkörpern und zur Ermittlung von Vergleichswerten für die einaxiale Druckfestigkeit von Abdichtungskörpern. Durch diese Kenngröße wird ein Vergleich der re-

gelmäßigen Laborprüfkörper mit den unregelmäßig geformten Abdichtungskörpern in situ möglich.

#### Haftfestigkeit:

Um die Schadstellen dauerhaft abzudichten, muss der chemisch verfestigte Körper so gut an dem Rohr haften, dass kein Wasser zwischen dem Abdichtungskörper und der Rohrwandung entlang fließen kann. Daher ist die Haftfestigkeit die entscheidende Größe für den Verbund von Abdichtungskörper und Rohrmaterial.

#### Thermische Ausdehnung:

Falls eine zu große Diskrepanz zwischen den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Rohwerkstoffe und des Abdichtungskörpers auftritt, kann die Haftverbindung durch thermisch induzierte Spannungen z.B. infolge der Einleitung von hochtemperierten Flüssigkeiten zerstört werden. Dies führt auf Dauer zu Undichtigkeiten zwischen Abdichtungskörper und Rohraußenwand.

#### Wasserundurchlässigkeit:

Der Abdichtungskörper muss dauerhaft wasserundurchlässig bzw. wasserdicht sein, damit die sanierte Leckage gegen Ex- und Infiltration abgedichtet ist. Transportvorgänge wie Diffusion oder kapillares Saugen müssen innerhalb des Abdichtungskörpers in so weit unterbunden werden, dass die Wasserundurchlässigkeit den Ansprüchen der Dichtheitsprüfung genügt.

#### Abnutzung:

Der Abdichtungskörper wird durch Reibung feinsten Partikel beansprucht. Durch einen geeigneten Versuch muss nachgewiesen werden, dass der Körper diesen kleinen, aber dauerhaften abrasiven Beanspruchungen standhalten kann.

#### Alterung:

Dieser Versuch soll die Dauerhaftigkeit des Abdichtungskörpers im Hinblick auf Klima-Feuchte-Wechsel darstellen, denen er im Kanal ausgesetzt ist. Die Synärese ist eine Erscheinung des Alterungsprozesses des Abdichtungskörpers (Schrumpfung). Durch ihre Prüfung sollen Anhaltspunkte für die Auswirkung dieses Prozesses gewonnen werden.

Zur Gewinnung interpretierbarer Ergebnisse sollten die für die Materialprüfungen erforderlichen Prüfkörper der Laborversuchsreihe möglichst in Anlehnung an in situ Bedingungen hergestellt werden. Eine weitere Anforderung war die Herstellung von gleichartigen Prüfkörpern, die vergleichend ausgewertet werden können. Weiterhin mussten Versuchsaufbau und

–durchführung so gestaltet werden, dass unter möglichst geringem Arbeits- und Materialaufwand eine Vielzahl an reproduzierbaren Probekörpern in kurzer Zeit hergestellt werden konnte. Die Ermittlung der ausgewählten Kenngrößen wurde in Anlehnung an bestehende Normen für Materialprüfungen durchgeführt.

#### 4.2.2 Ergebnisse

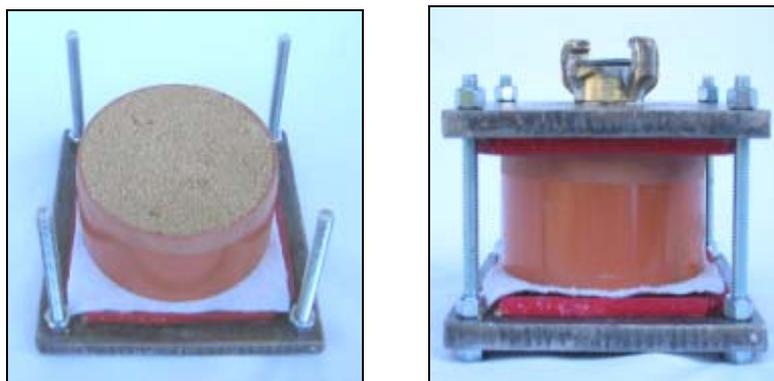
Nachfolgend werden die Erfahrungen mit dem gewählten Versuchsaufbau beschrieben und die Ergebnisse der Materialprüfung zusammengefasst. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Materialeigenschaften hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Abdichtungskörper.

##### 4.2.2.1 Herstellung der Prüfkörper

Zur Herstellung der Prüfkörper wurde das in Abbildung 4-3 dargestellte Schalungssystem eingesetzt. Die Schalung bestand aus folgenden Einzelteilen:

Perforierte Bodenplatte (Stahl):	140 x 140 x 4 [mm]
Schalungswand (PVC):	DN 100 / 50 [mm]
Obere Abdeckplatte (Stahl):	140 x 140 x 4 [mm] mit Injektionsanschluss

Zuerst wurde die erste Komponente mit einer Druckhöhe von 0.20 bar injiziert. Nachdem die Flüssigkeit aus dem perforierten Boden der Metallplatte austrat, wurde die Zugabe eingestellt. Unter gleichen Randbedingungen wurde die zweite Komponente injiziert. Die Zugabe wurde beendet, sobald der Flüssigkeitsspiegel 10 Minuten konstant blieb. Nach weiteren 10 Minuten wurde der Probekörper aus der Schalung gelöst.



**Abbildung 4-3: Prüfkörperherstellung in der Laborversuchsreihe**

Mit der Vereinheitlichung der Prüfkörperherstellung war es möglich, folgenden Anforderungen gerecht zu werden:

- Herstellung unter praxisnahen Bedingungen (Injektion)

- Homogene Prüfkörper mit ebenen Oberflächen
- Regelmäßig geformte Prüfkörper
- Gleichmäßig reproduzierbare Prüfkörper
- Kurze Injektionszeiten
- Geringer Komponentenverbrauch
- Erzeugung von verschiedenen Bodenfeuchten
- Kurze Ausschalzeiten

#### 4.2.2.2 Kenngrößen

Da durch die einheitliche Probekörperherstellung mit den eingesetzten Injektionslösungen gleichmäßig aussehende und reproduzierbare Abdichtungskörper mit definierten Abmessungen hergestellt werden konnten, war es möglich, sämtliche Randbedingungen gezielt zu beeinflussen und miteinander zu kombinieren. Die wesentlichen Ergebnisse werden nachfolgend in der Tabelle 4-1 zusammengefasst.

**Tabelle 4-1: Kenngrößen der Prüfkörper**

Materialprüfungen und Kenngrößen		
Druckfestigkeit $\sigma_{63}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1.19 – 1.91
Punktlastfestigkeit $I_s$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	0.008 – 0.017
Haftfestigkeit $\sigma_{V28}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	0.0019 – 0.1539
Wasserundurchlässigkeit $m_{28}$	[%]	1.66 – 2.38
Abnutzung $\Delta l$	[mm]	4.55 – 5.49
Alterungsbeständigkeit		
Synärese	[%]	3.26 - 5.60
Klimazyklus $\sigma_{70}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1.15 – 1.80

#### 4.2.3 Zusammenfassung

Die Dauerhaftigkeit des Abdichtungskörpers ist unabdingbar für die langfristige Abdichtung des Kanal- oder Leitungsabschnittes. Hierbei ist Voraussetzung, dass der Abdichtungskörper über einen längeren Zeitraum die an ihn gestellten Eigenschaften erfüllt und sich durch alle exogenen Beanspruchungen (Erschütterungen, kontaminiertes Grundwasser) sowie Beanspruchungen aus dem Rohrrinnern (thermische, mechanische, chemische und biologische) nicht negativ beeinflussen lässt. Weiterhin dürfen auch endogene Prozesse nicht zu einer Beeinträchtigung der Abdichtungswirkung führen.

Durch die Untersuchungen wurde festgestellt, dass homogene Boden-Gel-Körper stabil, wasserdicht und weitgehend widerstandsfähig gegenüber den üblichen exogenen chemischen, physikalischen und mechanischen Beanspruchungen sind. Problematisch sind dagegen inhomogene Abdichtungskörper, bei denen der Gelanteil vergleichsweise hoch ist. In diesen Fällen führen materialspezifische endogene Beanspruchungen im Zuge der Gelalterung zu einer deutlichen Kontraktion des Gelkörpers (Synärese). Die Synärese fällt umso stärker aus, je geringer der Bodenanteil am Prüfkörper war. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass durch die Stützwirkung des Korngerüsts im Injektionskörper dem Injektionsmedium (Boden der Leitungszone) bei den Sanierungen mit dem Flutungsverfahren eine entscheidende Bedeutung zukommt.

### 4.3 Untersuchungen zur Wirksamkeit (Basisversuche)

Wie zuvor erläutert, wurde der Abdichtungserfolg beim Untersuchungsobjekt „Grüner Hof“ direkt nach der Sanierung für alle, 3 bis 4 Jahre nach der Sanierung jedoch nur noch für wenige Grundleitungsnetze festgestellt. Die Analyse der Praxisdaten ergab keine Hinweise auf Kausalitäten. Deshalb konnte lediglich festgehalten werden, dass sich die Dichtwirkung nicht generell, sondern einzelfallabhängig über die Zeit verminderte. Die Praxisuntersuchungen führten damit zu dem Schluss, dass die Qualität der Sanierungen mit dem Flutungsverfahren maßgeblich von den im Einzelfall vorliegenden Sanierungsbedingungen abhängt.

Zur realitätsnahen Erforschung der Sanierungsqualität werden nachfolgend Sanierungen, die in einer Versuchsreihe unter gezielter Variation maßgebender Einflussgrößen simuliert wurden, auf den *Abdichtungserfolg* und die *Abdichtungswirksamkeit* hin untersucht. Am Ende des Kapitels werden die beiden Ergebniswerte zu einer Bewertungszahl für die *Sanierungsqualität* zusammengefasst. Hierdurch wird zum einen der Einfluss der im Einzelfall vorliegenden Sanierungsbedingungen auf die Abdichtungsergebnisse deutlich. Zum anderen lässt die Bewertungszahl auch Rückschlüsse auf die Dauerhaftigkeit der Abdichtungen zu.<sup>9</sup>

#### 4.3.1 Vorüberlegungen

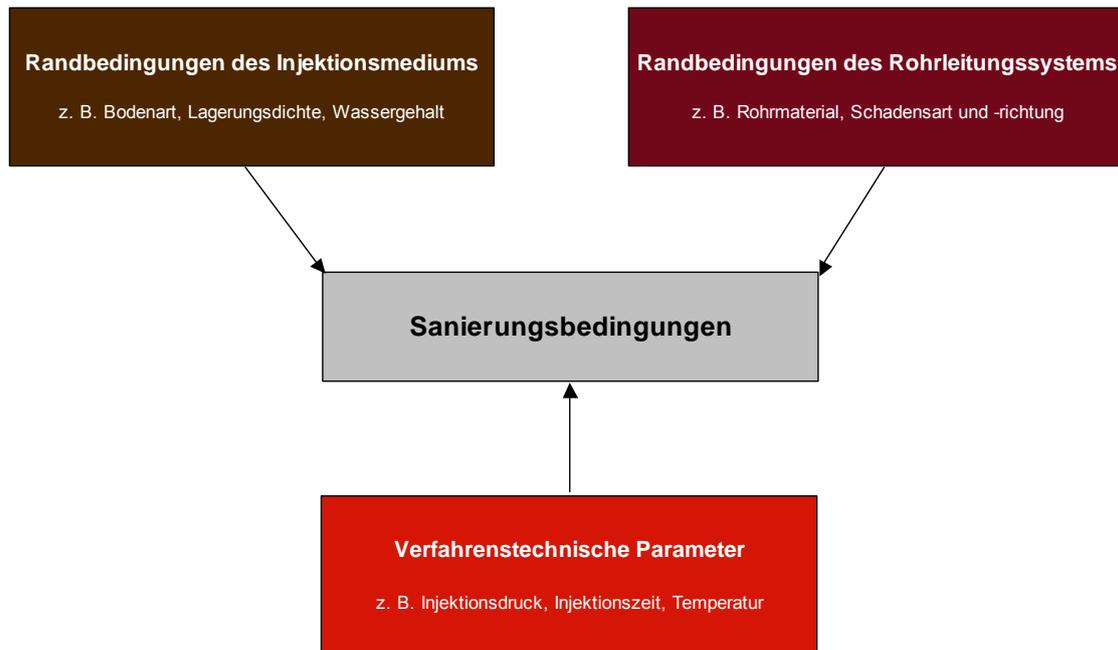
Für die experimentellen Untersuchungen sind zunächst Festlegungen zu den Versuchsbedingungen und Prüfmethoden vorzunehmen.

##### 4.3.1.1 Sanierungsbedingungen

Die Sanierungsbedingungen ergeben sich einzelfallabhängig aus der Bettung und dem Zustand eines Leitungsnetzes sowie den verfahrenstechnischen Parametern, die individuell festgelegt werden können (Abbildung 4-4).

---

<sup>9</sup> Vgl. Sindermann, T., Sanierung mit dem Flutungsverfahren, 2006, S. 68. ff.



**Abbildung 4-4: Beschreibung der Sanierungsbedingungen**

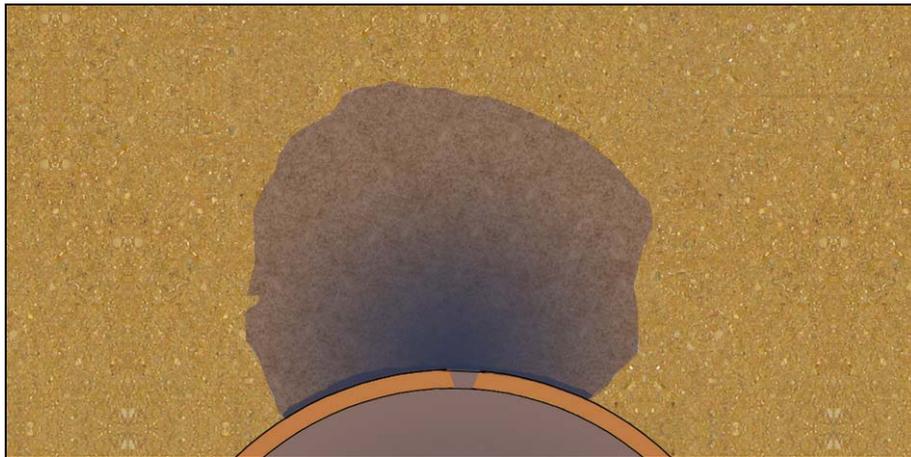
Die praxisnahe Untersuchung der Sanierungsqualität bedingt den Transfer realer Verhältnisse in ein Versuchskonzept. In der Versuchsreihe werden daher maßgebende Sanierungsbedingungen anhand wesentlicher Einflussgrößen (Bodenart, Schadensarten, Injektionsdruck, etc.) nachgebildet.

Durch die gezielte Variation einzelner Einflussgrößen können so experimentell verschiedene Sanierungsbedingungen geschaffen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Dichtwirkung untersucht werden. Die in der Versuchsreihe untersuchten Einflussgrößen sind in Kapitel 4.3.2.2 zusammengestellt.

#### **4.3.1.2 Dichtwirkung**

Aus der Anschauung heraus wird klar, dass zur Abdichtung einer Schadstelle zwei notwendige Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Zum einen ist dies die Wasserdichtheit des Boden-Gel-Gefüges, zum anderen ist zudem die Dichtheit der Kontaktfläche zwischen dem Abdichtungskörper und der Rohroberfläche erforderlich.

Das beschriebene Wirkungsprinzip führt zu zwei möglichen Versagensursachen für den Abdichtungskörper. Wasserverluste können demnach durch die Undichtheit des Boden-Gel-Gefüges und/oder durch die Undichtheit der Kontaktfläche „Abdichtungskörper-Rohrleitung“ entstehen (Abbildung 4-5).



**Abbildung 4-5: Versagensarten des Abdichtungskörpers**

#### **4.3.1.3 Abdichtungswirksamkeit**

Organisatorische Gründe bei der Versuchsdurchführung erfordern die Ermittlung der Dichtwirkung zu einem festgelegten Zeitpunkt (hier: 7 Tage nach der Sanierung) und stehen damit Langzeituntersuchungen zur Sanierungsqualität entgegen. Um dennoch Rückschlüsse auf die längerfristige Qualität der Sanierungen zu erhalten, wird in den Versuchen die *Abdichtungswirksamkeit* ermittelt. In Anlehnung an DIN ISO 9000: 2000, die unter Wirksamkeit das „Ausmaß, in dem geplante Tätigkeiten verwirklicht und geplante Ergebnisse erreicht werden“, versteht, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens die dauerhafte Abdichtungswirksamkeit als das *Ausmaß der Dichtwirkung* definiert.<sup>10</sup> Als Maßstab für die Abdichtungswirksamkeit wird die Kenngröße „Grenzprüfdruck“ eingeführt. Der Grenzprüfdruck [bar], der durch ein spezielles Prüfverfahren ermittelt wird (Kap. 4.3.2.3), ist derjenige Druck, welcher zur Undichtigkeit des Abdichtungskörpers, also zum Verlust der Abdichtungswirkung führt.

Der beschriebenen Vorgehensweise liegt der Analogieschluss zwischen der Wirksamkeit und der Dauerhaftigkeit der Sanierungen zu Grunde (Je höher die Wirksamkeit, desto besser die Dauerhaftigkeit).

#### **4.3.2 Konzeption der Basisversuchsreihe**

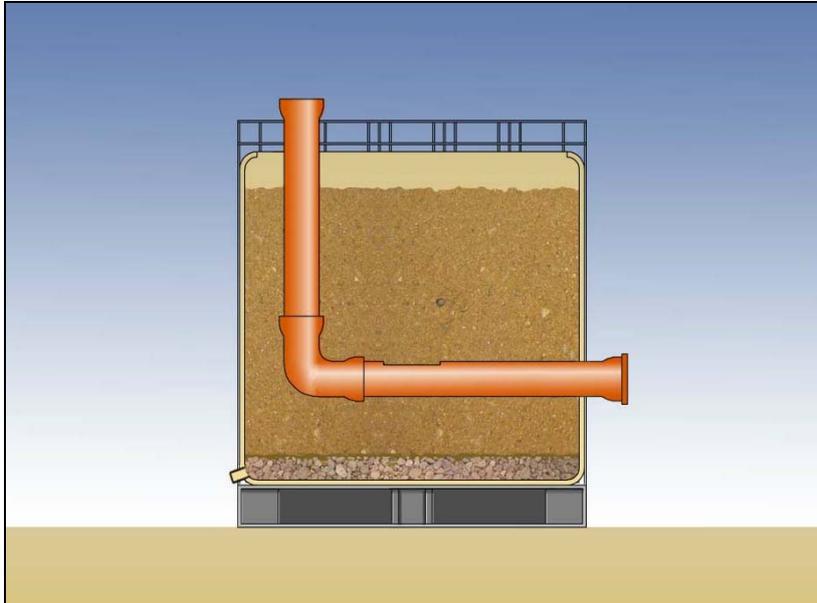
Für die Untersuchungen zur Sanierungsqualität wurde ein spezieller Versuchsaufbau erstellt sowie ein Versuchsprogramm festgelegt, welches wesentliche der in situ auftretenden Sanierungsbedingungen beinhaltet. Der Versuchsaufbau wurde so konzipiert, dass die gezielte Herstellung der zu untersuchenden Sanierungsbedingungen sowie die realitätsnahe und einheitliche Ausführung der Sanierungen einfach möglich war.

---

<sup>10</sup> DIN EN ISO 9000: 2000, Qualitätsmanagementsysteme, 2000, S. 25.f.

#### 4.3.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau setzt sich im Wesentlichen aus einem Injektionsbehälter und einem darin integrierten Rohrleitungsabschnitt zusammen (Abbildung 4-6).



**Abbildung 4-6: Versuchsaufbau Basisversuch**

Der Injektionsbehälter besteht aus einem würfelförmigen, an der Oberseite offenen Kunststoffbehälter mit einer Kantenlänge von ca. 100 cm. Der Behälter besitzt an der hinteren Unterkante einen Abfluss, aus dem im Bedarfsfall injizierte Flüssigkeiten austreten können. An der Vorderseite befindet sich im Abstand von 27 cm vom Behälterboden eine kreisrunde Öffnung, durch die der Rohrleitungsabschnitt aus dem Behälter geführt wird. Zur Stabilisierung ist der Kunststoffbehälter in ein metallisches Gittergestell eingefasst. Auf dem Boden des Behälters befindet sich eine 7 cm starke Drainageschicht aus Filterkies der Körnung 16/32, in welche die Abflussöffnung (s. o.) einbindet. Zur Trennung von Filterkies und Versuchsboden ist auf der Drainageschicht ein Geotextil angeordnet.

In den Injektionsbehälter wird ein L-förmiger Rohrleitungsabschnitt aus PVC- bzw. Steinzeugrohren eingebaut. Der horizontale Schenkel hat eine Länge von ca. 100 cm, die Länge des vertikalen Schenkels beträgt ca. 60 cm. Die beiden Schenkel sind mit einem 90° Bogen verbunden.

Der Rohrleitungsabschnitt enthält eine definierte Schadstelle als Injektionsöffnung. Abhängig von der zu untersuchenden Einflussvariante kann es sich dabei um einen Längsriss, Querriss oder eine schadhafte Muffe handeln.

#### 4.3.2.2 Versuchsprogramm

Es war das Ziel, in die Untersuchungen zur Sanierungsqualität diejenigen der in situ auftretenden Sanierungsbedingungen einzubeziehen, von denen wesentliche Auswirkungen auf die Abdichtungswirksamkeit zu erwarten sind. Dazu wurden anhand von praktischen und theoretischen Untersuchungen zu den üblichen Sanierungsbedingungen bei häuslichen Grundleitungsnetzen die maßgebenden Einflussgrößen und entsprechenden Einflussvarianten ermittelt und zu einem Versuchsprogramm zusammengestellt. Aufgeteilt nach den Randbedingungen des Injektionsmediums und des Rohrleitungssystems sowie den verfahrenstechnischen Parametern, sind die gewählten Einflussgrößen und ihre Varianten in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Die in den Versuchen standardmäßig verwendeten Einflussvarianten (Standardvarianten) sind in der Tabelle grau unterlegt. Abhängig von der zu untersuchenden Einflussgröße wurden die Standardvarianten bezüglich der übrigen Einflussvarianten modifiziert. Für jede Kombination wurden jeweils fünf Einzelversuche durchgeführt.

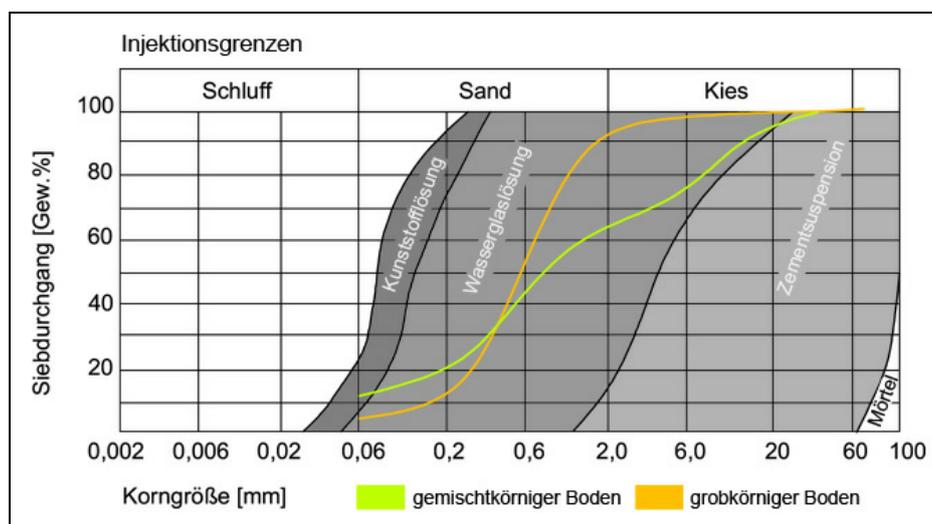
**Tabelle 4-2: Versuchsprogramm der Basisversuchsreihe**

Sanierungsbedingungen	Einflussgrößen	Varianten		
Randbedingungen des Injektionsmediums	Bodenart	grobkörnig		gemischtkörnig
	Lagerungsdichte	dicht	mitteldicht	locker
	Wassergehalt	erdfeucht (7 %)		wassergesättigt
	Sonderfall „Hohlräume“	Hohlraum oben		Hohlraum unten
Randbedingungen des Rohrleitungssystems	Rohrmaterial	PVC (DN 100)		Steinzeug (DN 150)
	Schadensart	Längsriss	Querriss	undichte Muffe
		L/B= 160/3 mm	L/B=2x80/3 mm	L= 2 x 80 mm
	Schadensrichtung	oben		unten
Verfahrenstechnische Parameter	Materialviskosität	Niedrig (~75 mPa s)		hoch (~150 mPa s)
	Materialtemperatur	10° C	18° C	25° C
	Injektionsdruck	0,05 bar		0,20 bar
	Injektionszeit (K1/K2)	45 Min./bis Stillstand		
	Sonderfall „Geringer Injektionsdruck“	0,035 bar	0,020 bar	0,005 bar

Besondere Aspekte des Versuchsprogramms sind nachfolgend erläutert.

### Bodenart und Lagerungsdichte:

Zur Verfüllung von Leitungsgräben sind gemäß der Vorschriften körnige, nichtbindige Böden (z. B. Ein-Korn-Kiese, Bodenmaterialien mit abgestufter Körnung, Sande oder andere Kornmische) zu verwenden, die gute Verdichtungseigenschaften aufweisen.<sup>11</sup> Von den in Frage kommenden Böden wurden für die Untersuchungen zur Sanierungsqualität zwei Bodenarten mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt. Der grobkörnige Boden<sup>12</sup> besitzt eine enggestufte Körnungslinie mit einer Sandkornfraktion von 90 %. Jeweils 5 % des Kornanteils entfallen auf die Fein- bzw. Kieskornfraktion. Der gemischtkörnige Boden weist eine weitgestufte Körnungslinie mit einer Sandkornfraktion von 53 %, einer Kieskornfraktion von 34 % und einem Feinkornanteil von 13 % auf. Gemäß ihrer Zusammensetzung sind beide Bodenarten für Injektionen mit Wasserglaslösungen geeignet (Abbildung 4-7).<sup>13</sup>



**Abbildung 4-7: Injizierfähigkeit von Lockergesteinen**

Mit dem gemischtkörnigen Boden wurde für die Untersuchungen eine Bodenart in der Nähe der unteren Anwendungsgrenze von Wasserglaslösungen gewählt. Es ist zu erwarten, dass die Injizierfähigkeit dieses Bodens deshalb eingeschränkt ist. Der grobkörnige Boden liegt in der Mitte des Anwendungsbereiches und gilt damit als gut injizierfähig.

Die Lagerungsdichten werden in Anlehnung an DIN 18126<sup>14</sup> als lockere, mitteldichte und dichte Lagerung hergestellt. Zusammen mit den bodenklassifizierenden Kennwerten ergeben

<sup>11</sup> Vgl. DIN EN 1610, Verlegung und Prüfung von Abwasserkanälen und Leitungen, 1997, S. 4.

<sup>12</sup> DIN 19196, Erd- und Grundbau, Bodenklassifikationen für bautechnische Zwecke, 1988.

<sup>13</sup> Vgl. o. V., Spezialgrundbau – Injektionen, 1998, S. 19.

<sup>14</sup> DIN 18126, Baugrund, 1996-11.

sich aus dieser Einteilung bei der Versuchsdurchführung die in Tabelle 4-3 exemplarisch für den grobkörnigen Boden dargestellten Eigenschaften und Einbaubedingungen.

**Tabelle 4-3: Bodenkennwerte und einzubauende Bodenmassen**

Grobkörniger Boden			Lockere Lagerung	Mitteldichte Lagerung	Dichte Lagerung	
Porenanteil n	von - bis	[-]	0,4025	0,3660	0,3220	0,2980
	Laborwert	[-]	0,387	0,344	0,300	
Durchlässigkeitsbeiwerte $k_f$	Laborwert	[-]	$3,35 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	
Korndichte $\rho_s$	Laborwert	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,62			
Wassergehalt w	Laborwert	[-]	~ 7%			
Feuchtwichte $\gamma$	$\gamma=(1-n) \cdot (1+w) \cdot \rho_s$	[kN/m <sup>3</sup> ]	17,2	18,4	19,6	
Behältervolumen V	$V=1,2 \cdot 0,9 \cdot 0,8$	[m <sup>3</sup> ]	0,864			
einzubauende Bodenmasse	$m=\gamma \cdot V/g$	[kg]	1.485	1.589	1.695	

#### Hohlräume:

Eine besondere Situation stellt sich bei Sanierungen mit dem Flutungsverfahren dar, wenn die Rohrbettung im Bereich der Schadstellen fehlt. Gründe hierfür können beispielsweise die unzureichende Verfüllung des Rohrgrabens oder auch durch die Schadstellen infiltrierendes Wasser sein, das die Bettungszone fluvial erodiert hat.

#### Rohrmaterialien und Schadensbilder:

Die Auswahl der Randbedingungen des Injektionsmediums orientiert sich an den in der Praxis üblicherweise vorzufindenden Verhältnissen. Als Rohrmaterialien sind bei Grundleitungsnetzen hauptsächlich Steinzeugrohre, die bis etwa 1970 verwendet wurden, und PVC-Rohre, die seither zum Einsatz kommen, vorzufinden. Die gewählten Schadensbilder entsprechen dem Befund aktueller Untersuchungen zum baulichen Zustand privater Grundleitungsnetze, wobei die Schadensgrößen durch die Zulassungsvorgaben begrenzt werden.

#### Injektionsdruck:

Bei der Sanierung mit dem Flutungsverfahren schreibt die bauaufsichtliche Zulassung einen Injektionsdruck von 0,2 bar vor. Grundleitungsnetze werden jedoch in der Regel baustellenbedingt mit einem Injektionsdruck saniert, der hydrostatisch über einen Flüssigkeitspegel bis zur Oberkante des tiefsten Entwässerungsgegenstandes eingestellt wird. Abhängig von der Tiefenlage der Grundleitungsnetze ergeben sich bei dieser Vorgehensweise unterschiedliche Injektionsdrücke, die im Allgemeinen bei etwa 0,05 bar liegen.

Für das Versuchsprogramm werden deshalb ein Injektionsdruck von 0,05 bar als Standarddruck und der zulassungskonforme Injektionsdruck von 0,2 bar als Vergleichsgröße festgelegt.

Zusätzlich zu den o. g. Injektionsdrücken werden auch Versuche mit geringeren Injektionsdrücken durchgeführt und ausgewertet. Geringe Injektionsdrücke können sich bei der Sanierung von Grundleitungsnetzen einstellen, wenn schadhafte Leitungen eine geringe Tiefenlage aufweisen oder Schadhafte an den vertikal aufgehenden Abwasser- oder Regenfallleitungen vorhanden sind.

#### Temperatur:

Die gewählten Materialtemperaturen entsprechen den in den Zulassungen vorgegebenen Anwendungsgrenzen der Verfahrenvarianten. In der Praxis können sich unterschiedliche Materialtemperaturen aus den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen ergeben.

#### **4.3.2.3 Versuchsdurchführung**

Die Versuchsdurchführung der Basisversuchsreihe setzte sich aus den nachfolgend beschriebenen sechs Arbeitsschritten zusammen.

##### (1) Einbau von Rohrleitungsabschnitt und Boden

Nach der Kontrolle der Drainageschicht und des Geotextils, die nicht für jeden Versuch neu einzubauen waren, wurde zunächst der Rohrleitungsabschnitt eingesetzt. Dieser wurde mit geeigneten Feststelleinrichtungen so im Versuchsbehälter fixiert, dass ein leichtes Gefälle des waagerechten Leitungsteils in Richtung der vorderen Leitungsöffnung entstand. Das Gefälle war erforderlich, damit die Injektionsflüssigkeiten vollständig aus dem Leitungsabschnitt entfernt werden konnten. Anschließend wurde der Versuchsboden lagenweise eingebaut und verdichtet.

##### (2) Dichtheitsprüfung vor der Sanierung

Nach Einbau der Rohrleitung und des Bodens wurde der Leitungsabschnitt auf Dichtheit geprüft. Die Prüfung wurde als Wasserdruckprüfung in Anlehnung an DIN 1986-30 mit einem Prüfdruck von 0,05 bar und einer Prüfzeit von 15 Minuten durchgeführt. Über den gemessenen Wasserverlust war die präzise Einschätzung der hergestellten Randbedingungen möglich. Der Dichtheitsprüfung folgte eine 24-stündige Ruhephase, durch die der Abfluss des Prüfwassers aus den Poren gewährleistet war.

##### (3) Injektionsvorgänge

Der Rohrleitungsabschnitt wurde über den vertikalen Leitungsteil zunächst mit Komponente 1 befüllt und über 45 Minuten mit dem festgelegten Injektionsdruck, der über einen entsprechenden Flüssigkeitspegel hydrostatisch eingestellt wurde, beaufschlagt. Nach dem Ablassen von Komponente 1 wurde das Leitungssystem zur Beseitigung von Injektionsmittel-

rückständen mit Wasser ausgespült. Die Injektion von Komponente 2 erfolgte analog zu Komponente 1, wobei sich das Ende des Injektionsvorganges in diesem Fall aus dem fortschreitenden Gelierprozess automatisch ergab. An die Injektionsvorgänge schloss sich die Erhärtungszeit von sieben Tagen an.

#### (4) Dichtheitsprüfung nach der Sanierung

Nach der Erhärtungszeit wurde der Abdichtungserfolg mittels einer Wasserdruckprüfung nach Vorgabe der bauaufsichtlichen Zulassung mit einer Druckhöhe von 0,05 bar und einer Prüfzeit von 30 Minuten festgestellt. Für den untersuchten Leitungsabschnitt<sup>15</sup> ergab sich aus den Vorgaben (Dichtheitskriterium der bauaufsichtlichen Zulassung: 0,30 l/m<sup>2</sup> Rohinnenfläche) ein zulässiger Wasserverlust von 0,10 l.

#### (5) Druckerhöhungsprüfung

Im Anschluss an die zuvor beschriebene Dichtheitsprüfung wurde durch die Druckerhöhungsprüfung der Grenzprüfdruck der Sanierung ermittelt. Bei der Druckerhöhungsprüfung wurde der Prüfdruck durch die stufenweise Erhöhung der Wassersäule – der vertikale Leitungsabschnitt wurde hierzu entsprechend verlängert – so lange gesteigert, bis die gemessene Wasserverlustmenge den zulässigen Wasserverlustwert überschritt. In der Versuchreihe erfolgten die Drucksteigerungen in Stufen von 0,025 bar.

#### (6) Begutachtung der Abdichtungskörper

Die Versuchsdurchführung schloss mit dem Ausbau und der Begutachtung des Abdichtungskörpers (Abmessungen, Porenfüllung und Homogenität).

### 4.3.3 Versuchsauswertung

Zur Ermittlung der Sanierungsqualität werden die Basisversuche einflussgrößenspezifisch hinsichtlich des Abdichtungserfolges, der über die Dichtheitsprüfung nach Zulassungsvorgabe festgestellt wurde, und der Abdichtungswirksamkeit, die aus der Druckerhöhungsprüfung abgeleitet wurde, ausgewertet. Die Auswertung wird hierbei anhand der gemittelten Versuchsdaten vorgenommen. Die Verwendung der Mittelwerte erscheint angesichts der geringen Abweichungen der Einzelwerte zulässig. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die gemittelten Versuchsdaten unter Angabe der jeweiligen Sanierungsbedingungen in Tabellen zusammengefasst.

---

<sup>15</sup> Da es sich um eine definierte Schadstelle handelte, wurde der zu untersuchende Leitungsabschnitt zu 1 m festgelegt.

### 4.3.3.1 Randbedingungen des Injektionsmediums

Von den Randbedingungen des Injektionsmediums wurden die Einflussgrößen „Bodenart“, „Lagerungsdichte“, „Bodenfeuchte“ und der Sonderfall „Hohlräume“ untersucht.

#### 4.3.3.1.1 Bodenart und Lagerungsdichte

Da die injektionsrelevanten Eigenschaften des Bodens (Durchlässigkeit, Porengehalt) im engen Zusammenhang zur Lagerungsdichte stehen, werden diese Einflussgrößen gemeinsam untersucht. In diesem Sinne erfolgt die Darstellung der Versuchsergebnisse getrennt nach den Bodenarten „grobkörniger Boden“ und „gemischtkörniger Boden“ und hier weiter unterteilt nach den gewählten Lagerungsdichten.

#### Grobkörniger Boden:

Im grobkörnigen Boden wurden die Versuche BV-A-1 bis 5 (dichte Lagerung), BV-A-6 bis 10 (mitteldichte Lagerung) und BV-A-11 bis 15 (lockere Lagerung) durchgeführt (Tabelle 4-4).

**Tabelle 4-4: Versuchsergebnisse Bodenart und Lagerungsdichte (Grobkörniger Boden)**

Untersuchte Einflussgrößen: Bodenart und Lagerungsdichte				
Randbedingungen des Injektionsmediums				
	Bodenart	grobkörnig		
	Lagerung	dicht	mittel	locker
	Bodenfeuchte	erdfeucht		
Randbedingungen des Rohrleitungssystems				
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC / DN100		
	Schadensart [mm]	Längsriß		
	Schadensrichtung	oben		
Verfahrenstechnische Parameter				
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)		
	Materialtemperatur [°C]	18		
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05		
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand		
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)				
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-1 bis A-5	A-6 bis A-10	A-11 bis A-15
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	2,32	4,99	9,53
Sanierung	Komponente 1 [l]	0,57	1,18	2,08
	Komponente 2 [l]	0,05	0,07	0,10
	Zyklenzahl	1,0	1,0	1,2
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	100	100
	Grenzprüfdruck [bar]	0,27	0,28	0,23

Bei den Versuchen mit grobkörnigem Boden führten alle Sanierungen zur Abdichtung der Schadstelle (Abdichtungserfolg: 100 %). Der mittlere Grenzprüfdruck betrug 0,26 bar, wobei die Einzelwerte in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte variierten. Für die mitteldichte La-

gerung wurde ein Grenzprüfdruck von 0,28 bar erzielt, wohingegen die Grenzprüfdrücke für die dichte Lagerung 0,27 bar und für die lockere Lagerung 0,23 bar betragen.

In Abhängigkeit von der Lagerungsdichte wiesen die Abdichtungskörper unterschiedliche Größen auf (Abbildung 4-8). Die Kontaktflächenbreiten der Abdichtungskörper zur Rohrwandung betragen in dichter Lagerung 4 bis 6 cm (links), in mitteldichter Lagerung 9 bis 11 cm (Mitte) und in lockerer Lagerung 12 bis 15 cm (rechts).



**Abbildung 4-8: Abdichtungskörpergrößen bei unterschiedlichen Lagerungsdichten**

Sämtliche Abdichtungskörper wiesen eine homogene äußere und innere Struktur von großer Festigkeit auf. Allerdings waren die Abdichtungskörper in lockerer Lagerung durch einen höheren Gelanteil, erkennbar durch die weißliche Färbung des Silikatgels, gekennzeichnet.

#### Gemischtkörniger Boden:

Im gemischtkörnigen Boden wurden die Versuche BV-A-16 bis 20 (dichte Lagerung), BV-A-21 bis 25 (mitteldichte Lagerung) und BV-A-26 bis 30 (lockere Lagerung) durchgeführt (Tabelle 4-5).

**Tabelle 4-5: Versuchsergebnisse Bodenart und Lagerungsdichte (Gemischtkörniger Boden)**

Untersuchte Einflussgrößen: Bodenart und Lagerungsdichte				
Randbedingungen des Injektionsmediums				
	Bodenart	gemischtkörnig		
	Lagerung	dicht	mittel	locker
	Bodenfeuchte	erdfeucht		
Randbedingungen des Rohrleitungssystems				
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC / DN100		
	Schadensart [mm]	Längsriß		
	Schadensrichtung	oben		
Verfahrenstechnische Parameter				
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)		
	Materialtemperatur [°C]	18		
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05		
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand		
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)				
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-16 bis A-20	A-21 bis A-25	A-26 bis A-30
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	1,10	3,31	11,04
Sanierung	Komponente 1 [l]	0,20	0,75	3,21
	Komponente 2 [l]	0,04	0,21	0,14
	Zyklenzahl	1,0	1,0	1,4
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	100	60
	Grenzprüfdruck [bar]	0,24	0,26	0,16

Bei den Versuchen mit gemischtkörnigem Boden führten insgesamt 86 % der Sanierungen zur Abdichtung der Schadstellen. Während in dichter und mitteldichter Lagerung jeweils Erfolgsquoten von 100 % erreicht wurden, betrug die Erfolgsquote in lockerer Lagerung nur 60 %. Der Grenzprüfdruck lag im gemischtkörnigen Boden bei durchschnittlich 0,22 bar und betrug im Einzelnen 0,16 bar (lockere Lagerung), 0,24 bar (mitteldichte Lagerung) und 0,26 bar (dichte Lagerung).

Die Abdichtungskörper in dichter und mitteldichter Lagerung verfügten über eine geringe Größe (Breite der Kontaktfläche zur Rohrwandung: 3 bis 5 cm) und besaßen eine feste gleichmäßige Struktur. Abweichend davon fielen die Abdichtungskörper in lockerer Lagerung mit einer durchschnittlichen Kontaktflächenbreite von über 15 cm deutlich größer aus. Die Beschaffenheit dieser Abdichtungskörper war durch eine unregelmäßige Oberfläche und inhomogene innere Struktur gekennzeichnet. Beim Zerlegen zeigten sich im Körperinneren nicht injizierte Bodenbereiche sowie Porenkanäle mit reinem Silikatgel und unreaktierter Injektionslösung (Abbildung 4-9).



**Abbildung 4-9: Strukturstörungen bei Abdichtungskörpern in gemischtkörnigem Boden**

Der Ergebnisvergleich für die Versuche im grob- und gemischtkörnigen Boden führt zu folgenden Kernaussagen:

- Im grobkörnigen Boden wurde die Abdichtung der Schadstellen bei allen, im gemischtkörnigen Boden bei 13 von 15 Sanierungen erreicht (-14 %).
- Im gemischtkörnigen Boden fiel die Wirksamkeit insgesamt niedriger aus als im grobkörnigen Boden (-15 %).
- In beiden Bodenarten wurden die höchsten Wirksamkeiten in mitteldichter Lagerung erzielt. Die dichte Lagerung ergab die zweitbesten Ergebnisse, während die lockere Lagerungsdichte deutliche Wirksamkeitseinbußen mit sich brachte.
- Je dichter die Böden gelagert waren, desto kleiner fielen die Abdichtungskörper aus.
- Die Abdichtungskörper im locker gelagerten gemischtkörnigen Boden wiesen eine unregelmäßige Oberfläche und inhomogene innere Struktur auf.

#### Erklärungen:

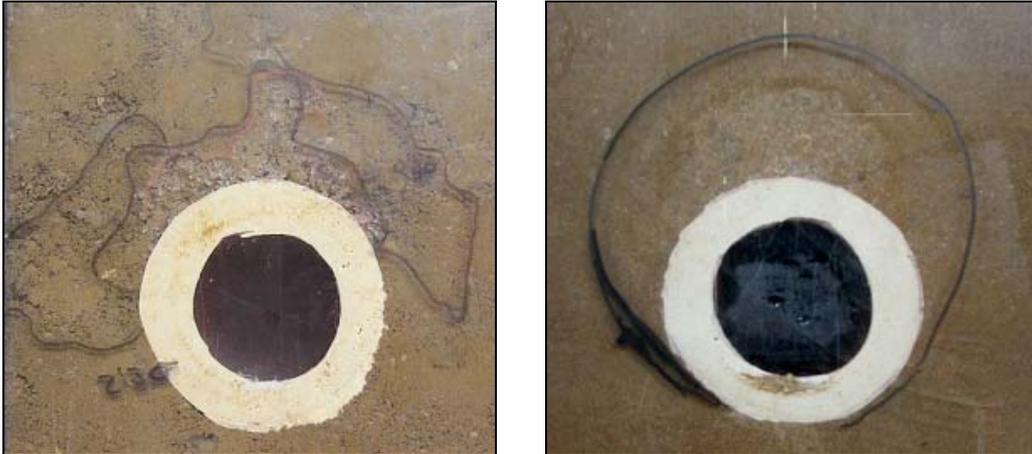
Die tendenziell besseren Sanierungsergebnisse im grobkörnigen Boden sind zunächst auf die unterschiedlichen Kornzusammensetzungen der untersuchten Bodenarten zurückzuführen. Der grobkörnige Boden ist durch eine enggestufte Körnungslinie mit einem großen Sandkornanteil gekennzeichnet. Diese Beschaffenheit ist entscheidend dafür, dass er selbst im stark verdichteten Zustand ein relativ großes und regelmäßiges Porengefüge aufweist und damit für die gleichmäßige Ausbreitung der Komponenten gute Voraussetzungen bietet. Der Boden ist dadurch für die Ausbildung homogener Abdichtungskörper

gut geeignet. Darüber hinaus besitzt das injizierte Korngerüst aufgrund der großen spezifischen Kornoberfläche eine ausgeprägte Stützwirkung gegenüber Synäreseffekten.

Im Unterschied dazu verfügt der gemischtkörnige Boden über eine weitgestufte Körnungslinie mit einem relativ hohen Feinkornanteil. Diese Beschaffenheit kann zu einer ungleichmäßigen Bodengefüge führen, in dem die Poren unterschiedlich groß und unregelmäßig verteilt sind. Bereiche mit hohem Feinkornanteil besitzen insbesondere in verdichtetem Zustand einen geringen Porenanteil und sind deshalb nur noch schwer oder nicht mehr injizierbar. Dahingegen besitzen Bereiche mit geringem Fein- und hohem Kieskornanteil einen hohen Porenanteil, die größere Mengen an Injektionsmaterial aufnehmen. Insgesamt ist unter diesen Bedingungen die gleichmäßige Durchströmung des Injektionsmediums durch die Komponenten nicht gewährleistet. Bei Injektionen in Böden mit einer weitgestuften Körnungslinie besteht deshalb die Gefahr, dass keine homogenen Abdichtungskörper entstehen. Weiterhin ist die Stützwirkung des injizierten Korngerüsts infolge der unterschiedlichen und insgesamt relativ kleinen spezifischen Oberfläche gering.

Zur weiteren Erforschung der Ergebnisunterschiede wurden zusätzlich Visualisierungsversuche, die das Eindringverhalten der Injektionskomponenten und die Dichtwirkung des Abdichtungskörpers beobachtbar machen, durchgeführt. Die Konzeption der Visualisierungsversuche erfolgte in Anlehnung an die Modellversuche und ist dort detailliert beschrieben (siehe auch Kap.4.3.2).

Die Beobachtung der Injektionsvorgänge zeigte, dass beim gemischtkörnigen Boden in lockerer Lagerung das ursprüngliche Bodengefüge um die Schadstelle beim Eindringen der Komponente 1 teilweise zerstört wurde. Im Einzelnen war zu beobachten, dass das Injektionsmedium an mehreren Stellen durch die Komponente 1 aufgerissen und dann partiell, d. h. kanalartig, durchdrungen wurde. Zwischen den Porenkanälen verblieben nicht injizierte Bodenbereiche. Die Komponente 2 breitete sich in den mit Komponente 1 gefüllten Porenkanälen aus, wo beim Zusammentreffen der Komponenten innerhalb von wenigen Sekunden die Reaktion ausgelöst und der Gelierprozess in Gang gesetzt wurde. Im Endzustand bestand der Abdichtungskörper aus einem inhomogenen Gefüge aus injiziertem Boden, vergeltem Kanälen und reinen Bodenbereichen (Abbildung 4-10, links). Das rechte Bild zeigt zum Vergleich einen Abdichtungskörper im mitteldicht gelagerten grobkörnigen Boden.



**Abbildung 4-10: Abdichtungskörper im gemischt- (links) und grobkörnigen (rechts) Boden**

Weiterhin wurde in den Versuchen sichtbar, dass in der Regel beide Versagensarten für den Verlust der Abdichtungswirkung verantwortlich waren. Es wurden Wasseraustritte sowohl an der Abdichtungskörperoberfläche wie auch entlang der Kontaktfläche des Abdichtungskörpers zur Rohrwandung zeitgleich festgestellt.

#### Schlussfolgerungen:

Verallgemeinernd können die Einflussgrößen Bodenart und Lagerungsdichte über die Kenngröße „Durchlässigkeit“ beschrieben werden. Unter Verwendung dieser Kenngröße ist aus den Versuchsergebnissen zu folgern, dass gute Abdichtungsergebnisse bei mittleren Durchlässigkeiten erreicht werden. In diesem Fall entstehen bei der Injektion homogene Abdichtungskörper, bei denen die Feststoffe des Injektionsmediums ein wirkungsvolles Stützgerüst für das Silikatgel darstellen. Geringfügig kleinere Durchlässigkeitswerte gewährleisteten ebenfalls noch gute Abdichtungsergebnisse. Allerdings führen hier vermutlich die deutlich reduzierten Abmessungen der Abdichtungskörper zu geringeren Wirksamkeiten. Bei Böden mit hohen Durchlässigkeitswerten sind unzureichende Abdichtungsergebnisse zu erwarten. In diesen Fällen besteht die Gefahr, dass sich bei der Injektion ungleichmäßige Abdichtungskörper ausbilden, die einerseits über nicht injizierte Bodenbereiche, andererseits auch über Bereiche aus reinem Silikatgel verfügen und deshalb insgesamt weniger wirksam sind.

#### 4.3.3.1.2 Bodenfeuchte

Die Einflussgröße Bodenfeuchte wurde anhand der Varianten „erdfeuchter Boden“ und „wassergesättigter Boden“ untersucht. Zur Wassersättigung des Injektionsbereiches wurde im Versuchsbehälter ein Wasserstand von 0,20 m über dem Rohrscheitel eingestellt (Tabelle 4-6).

**Tabelle 4-6: Versuchsergebnisse Bodenfeuchte**

Untersuchte Einflussgröße: Bodenfeuchte			
Randbedingungen des Injektionsmediums			
	Bodenart	grobkörnig	
	Lagerung	mittel	
	Bodenfeuchte	erdfeucht	wassergesättigt
Randbedingungen des Rohrleitungssystems			
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC / DN100	
	Schadensart [mm]	Längsriß (160/3)	
	Schadensrichtung	oben	
Verfahrenstechnische Parameter			
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)	
	Materialtemperatur [°C]	18	
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05	
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand	
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)			
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-6 bis A-10	A-26 bis A-30
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	4,99	4,28
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,18	0,69
	Komponente 2 [l]	0,07	0,03
	Zyklenzahl	1,0	1,2
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	60
	Grenzprüfdruck [bar]	0,28	0,10

Im erdfeuchten Boden führten alle Sanierungen zur Abdichtung der Schadstelle; der Grenzprüfdruck betrug 0,28 bar. Im wassergesättigten Boden wurden dagegen nur eine Abdichtungsquote von 60 % und ein Grenzprüfdruck von 0,10 bar erreicht.



**Abbildung 4-11: Abdichtungskörper in wassergesättigtem (links) und erdfeuchtem (rechts) Boden**

Ebenso wurden bei der optischen und technischen Untersuchung der Abdichtungskörper deutliche Festigkeits- und Abmessungsunterschiede zwischen den beiden Einflussvarianten festgestellt (Abbildung 4-11).

Im wassergesättigten Boden bildeten sich sehr weiche Abdichtungskörper mit kleinen Abmessungen, deren Festigkeit so gering war, dass bereits leichte mechanische Beanspruchungen zur Zerstörung der Körperstruktur führten. Die Abdichtungskörper im erdfeuchten Boden wiesen dagegen eine feste Beschaffenheit und vergleichsweise große Abmessungen auf.

#### Erklärungen:

Im wassergesättigten Boden liegt ein 2-Phasen-System vor, bei dem in den Poren ein Wasserüberdruck (Porenwasserdruck) herrscht. Je höher der Porenwasserdruck ist, desto schwieriger ist bei der Injektion die Verdrängung des Wassers durch die Komponente 1 und desto stärker tritt dabei eine Vermischung zwischen den beiden Flüssigkeiten auf. Bei der Injektion von Komponente 2 trifft diese auf die wasserverdünnte Wasserglaslösung. Der höhere Wasseranteil hat zur Folge, dass bei der Gelbildung der Anteil eingelagerter Wassermoleküle steigt, wodurch letztlich die Festigkeit des Abdichtungskörpers herabgesetzt wird.

#### Schlussfolgerungen:

Die Untersuchungen zeigen, dass Sanierungen mit dem Flutungsverfahren im Grundwasser als problematisch einzustufen sind. Die Abdichtungswirkung wird durch die Verdünnungseffekte, welche die Struktur des Silikatgels schwächen, signifikant herabgesetzt. Es ist zu erwarten, dass diese Effekte bei Injektionen im fließenden Grundwasser noch verstärkt werden, was die Zuverlässigkeit und die Wirksamkeit der Sanierungen unter diesen Bedingungen weiter mindern würde.

#### 4.3.3.1.3 Sonderfall „Hohlräume“

Zur Untersuchung des Sonderfalles „Hohlräume“ wurde in den Versuchen im Bereich der Schadstelle ein Hohlraum in die Leitungszone integriert. Die Herstellung des Hohlräume erfolgte mittels eines zylinderförmigen Eisblocks ( $L = 160 \text{ mm}$ ,  $d = 50 \text{ mm}$ ), der im Zuge des Bodeneinbaus über bzw. unter der Schadstelle platziert wurde. Um eine Zerstörung des Hohlräume zu vermeiden, wurde vor der Sanierung keine Wasserdichtheitsprüfung durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse der untersuchten Einflussvarianten „Hohlraum oben“ (Versuche BV-A/B/C-101 bis 105) und „Hohlraum unten“ (Versuche BV-A/B/C-106 bis 110) sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst.

**Tabelle 4-7: Versuchsergebnisse Hohlräume**

Sonderfall: Hohlräume			
Randbedingungen des Injektionsmediums			
	Bodenart	grobkörnig	
	Lagerung	mittel/ Hohlraum oben	mittel/ Hohlraum unten
	Bodenfeuchte	erdfeucht	
Randbedingungen des Rohrleitungssystems			
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC / DN100	
	Schadensart [mm]	Längsriss (80/3)	
	Schadensrichtung	oben	unten
Verfahrenstechnische Parameter			
	Materialviskosität	verschieden	
	Materialtemperatur [°C]	18	
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05	
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand	
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)			
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A/B/C-101 bis -105	A/B/C-106 bis -110
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	n.e.	n.e.
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,26	3,11
	Komponente 2 [l]	0,34	1,52
	Zyklenzahl	1,7	2,6
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	40	20
	Grenzprüfdruck [bar]	0,061	0,055

Bei oben liegenden Hohlräumen führten 40 %, bei unten liegenden Hohlräumen 20 % der Sanierungen zur Abdichtung der Schadstellen (Abdichtungserfolg gesamt: 30 %). Entsprechend niedrig fielen auch die Grenzprüfdrücke aus, die durchschnittlich einen Wert von ca. 0,06 bar erreichten.

#### Erklärungen:

Zur Unterstützung der Ergebnisanalyse wurden zusätzlich Visualisierungsversuche mit Hohlräumen durchgeführt (siehe auch Kap.4.3.2), in denen die nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge beobachtet wurden. Bei der Injektion von Komponente 1 füllte diese zunächst den Hohlraum vollständig aus und strömte von dort in den umgebenden Boden. Nach Beendigung des Injektionsvorgangs blieb der Hohlraum ganz oder teilweise mit der Injektionskomponente gefüllt. Bei der Injektion von Komponente 2 drang diese ebenfalls in den Hohlraum ein und löste hier beim Zusammentreffen mit der Komponente 1 die Reaktion aus.

Während sich im Hohlraum ein Gelkörper bildete, strömte die Komponente 2 auch in den umgebenden Boden. Allerdings stand hierbei die auch nach dem Abpumpen im Hohlraum verbliebene Komponente 1 der gleichmäßigen Ausbreitung der Komponente 2 entgegen. Diese stellte aufgrund ihrer höheren Viskosität zumindest in Teilbereichen ein unüberbrückbares Hindernis für die Komponente 2 dar. Bei Sanierungsende – in den meisten Versuchen waren bis zum Stillstand der Komponente 2 zwei oder drei Injektionszyklen erforderlich – wurde der Hohlraum durch reine Gelkörper ausgefüllt. Darüber hinaus war die Vergelung eines radialen Bodenbereiches um den Hohlraum erkennbar (Abbildung 4-12, links). Es ist anzunehmen, dass die Abdichtung der Schadstelle zu diesem Zeitpunkt durch den Gelkörper im Hohlraum erreicht wurde.



**Abbildung 4-12: Abdichtungsgebilde nach Sanierung (links) und Aushärtung (rechts)**

In der 7-tägigen Aushärtezeit reduzierte sich das Volumen des im Hohlraum befindlichen Gelkörpers deutlich (Abbildung 4-12, rechts), so dass der Hohlraum nur noch teilweise durch den Gelkörper ausgefüllt war. Bei der Wasserdichtheitsprüfung im Anschluss an die Aushärtezeit hielten in drei von zehn Versuchen die kontrahierten Gelkörper an der Schadstelle dem Prüfdruck von 0,05 bar stand, wodurch das Dichtheitskriterium zunächst erfüllt wurde. Jedoch führte bereits eine Drucksteigerung von 0,025 bar zur Undichtigkeit des Gelkörpers und zum Eindringen von Prüfwasser in den Hohlraum. Bei den übrigen sieben Versuchen stellte der Gelkörper im Hohlraum von vornherein keine Wassersperre dar, so dass bereits bei einem Prüfdruck von 0,05 bar Prüfwasser in den Hohlraum eindrang und das Dichtheitskriterium verfehlt wurde. Darüber hinaus zeigte sich in allen Versuchen, dass das vergelte Korngerüst um den Hohlraum keine ausreichende Dichtwirkung aufwies, was durch Wasseraustritte vorrangig im Bereich der Rohrwandung, aber auch an verschiedenen anderen Stellen des Abdichtungskörpers festzustellen war.

Insgesamt konnte durch die Visualisierungsversuche veranschaulicht werden, dass die Schadstellen im Bereich von Hohlräumen zunächst durch reine Gelkörper abgedichtet wurden, Synäreseprozesse jedoch bereits nach kurzer Zeit zur Aufhebung der Dichtwirkung dieser Gelkörper führten.

Weiterhin wurde sichtbar, dass die radialen Injektionsbereiche um den Hohlraum infolge der unzureichenden Durchdringung mit den Injektionskomponenten keine ausreichende Dichtwirkung besaßen. Die Bildung eines den Hohlraum umschließenden homogenen Boden-Gel-Körpers war damit nicht mehr gewährleistet. Abbildung 4-13 zeigt das „Abdichtungsgebilde“ bei einem unten liegenden Hohlraum. Die Inhomogenität der Boden-Gel-Struktur ist insbesondere im oberen Bereich des Hohlraumes zu erkennen.



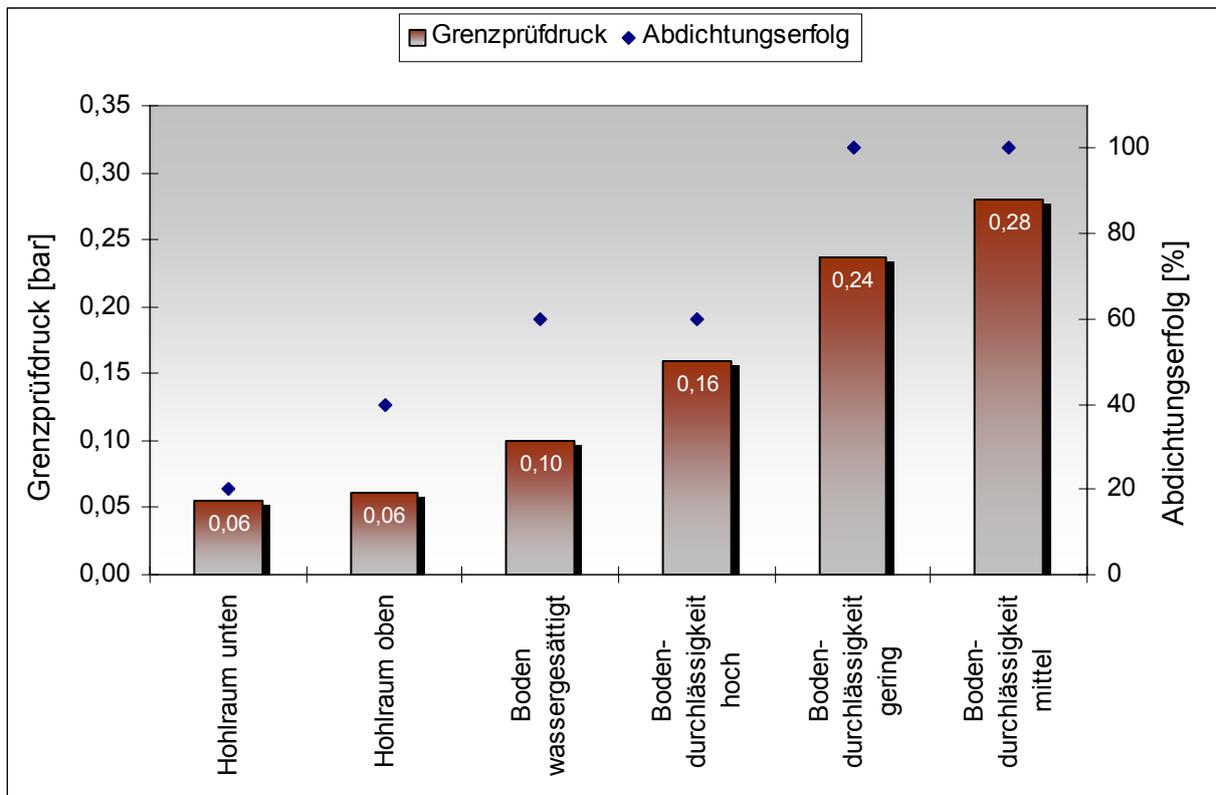
**Abbildung 4-13: Abdichtungsgebilde nach Rohrausbau**

#### Schlussfolgerungen:

Die Versuchsergebnisse lassen den Schluss zu, dass Schadstellen im Bereich von Hohlräumen mit dem Flutungsverfahren nicht wirksam sanierbar sind. Zwar kann die Abdichtung der Schadstellen zunächst durch reine Gelkörper erreicht werden, jedoch verlieren diese Gelkörper infolge der Synärese bereits nach kurzer Zeit ihre Abdichtungswirkung. Die injizierten Bodenbereiche um den Hohlraum stellen, bedingt durch die unzureichende Durchdringung mit den Komponenten, ebenfalls keine wirksame Abdichtung dar.

#### 4.3.3.1.4 Zusammenfassung

Die wichtigsten Versuchsergebnisse zu den Randbedingungen des Injektionsmediums sind in Abbildung 4-14 grafisch zusammengestellt.



**Abbildung 4-14: Ergebnisübersicht zu den Randbedingungen des Injektionsmediums**

Bei den Versuchen mit Hohlräumen, hohen Wassergehalten und durchlässigen Böden<sup>16</sup> konnte die zuverlässige und wirksame Abdichtung der Schadstellen nicht erreicht werden. Mit Erfolgsquoten und Wirksamkeiten von deutlich unter 100 % bzw. 0,20 bar stellten diese Einflussgrößen schlechte Randbedingungen für die Sanierungen dar und sind als problematisch einzustufen.

Die sichere und wirksame Abdichtung der Schadstellen wurde hingegen bei den Sanierungen in Böden mit geringer und mittlerer Durchlässigkeit erzielt. Die Sanierungen erreichten hier eine Abdichtungsquote von 100 % und Grenzprüfdrücke um 0,25 bar. Diese Einflussgrößen stellten damit gute Randbedingungen für die Sanierungen dar.

<sup>16</sup> Vor dem Hintergrund der Versuche sind unter der Bezeichnung „durchlässige Böden“ Injektionsmedien zusammengefasst, die entweder naturgemäß über einen großen, gleichmäßig verteilten Porenraum verfügen (i. d. R. Böden mit geringem Feinkornanteil), oder bei denen das Bodengefüge durch Verdrängung oder Aufreißen künstlich gestört ist (i. d. R. Böden mit hohem Feinkornanteil).

### 4.3.3.2 Randbedingungen des Rohrleitungssystems

Von den Randbedingungen des Rohrleitungssystems wurden die Einflussgrößen „Rohrmaterial“, „Schadensart“ und „Schadensrichtung“ auf Abdichtungserfolg und Wirksamkeit hin untersucht.

#### 4.3.3.2.1 Rohrmaterial

Ergänzend zu den bereits vorliegenden Versuchsergebnissen mit dem Rohrmaterial PVC (Versuche BV-A-6 bis 10) wurden Versuche mit dem Rohrmaterial Steinzeug durchgeführt und ausgewertet (Versuche BV-A-31 bis 35).

**Tabelle 4-8: Versuchsergebnisse Rohrmaterial**

Untersuchte Einflussgröße: Rohrmaterial			
Randbedingungen des Injektionsmediums			
	Bodenart	grobkörnig	
	Lagerung	mittel	
	Bodenfeuchte	erdfeucht	
Randbedingungen des Rohrleitungssystems			
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC/ DN 100	Steinzeug/ DN150
	Schadensart [mm]	Längsriss (160/3)	
	Schadensrichtung	oben	
Verfahrenstechnische Parameter			
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)	
	Materialtemperatur [°C]	18	
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05	
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand	
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)			
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-6 bis A-10	A-31 bis A-35
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	4,99	4,60
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,18	1,04
	Komponente 2 [l]	0,07	0,06
	Zyklenzahl	1,0	1,0
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	100
	Grenzprüfdruck [bar]	0,28	0,30

Für beide Rohrwerkstoffe wurde in den Versuchen ein Abdichtungserfolg von 100 % erzielt. Der Grenzprüfdruck betrug bei den Sanierungen mit Steinzeugrohren 0,30 bar und bei den Sanierungen mit PVC-Rohren 0,28 bar. Sämtliche Abdichtungskörper bestanden aus einem gleichmäßig festen Boden-Gel-Gefüge von mittlerer Größe.

Erklärungen:

Zur Abdichtung einer Schadstelle ist auch die Dichtheit der Kontaktfläche zwischen Rohroberfläche und Abdichtungskörper notwendig. Die Dichtwirkung hängt dabei vor allem von der Haftung des Boden-Gel-Körpers an der Rohroberfläche ab. Einflussparameter auf die Hauffestigkeit sind die Beschaffenheit der Rohroberfläche, die Oberflächenspannungen der beteiligten Phasen (Rohrwerkstoff, Silikatgel) und die Kontaktflächengröße.

Aus den Versuchsergebnissen, die sich hinsichtlich der Kontaktflächengröße der Abdichtungskörper nicht nennenswert unterscheiden, kann gefolgert werden, dass die Eigenschaften des Rohrwerkstoffes für die Wirksamkeitsunterschiede verantwortlich sind. Zur Erklärung der Unterschiede wurden deshalb die Werkstoffeigenschaften der untersuchten Rohrmaterialien herangezogen.

PVC (50 mN/m) besitzt eine um den Faktor 6-10 niedrigere Oberflächenspannung als Steinzeug (ca. 300–500 mN/m). Darüber hinaus weist PVC zudem eine glattere Oberfläche als Steinzeug auf. Diese beiden Werkstoffeigenschaften führen dazu, dass sowohl die molekulare Wechselwirkung zwischen den beteiligten Phasen als auch die mechanische Adhäsion zwischen den Kontaktflächen bei PVC-Rohren vermindert ist. Letztlich sind sie dafür verantwortlich, dass der Zusammenhalt in der Grenzschicht zwischen dem Abdichtungskörper und dem Rohrwerkstoff PVC insgesamt schwächer ausfällt als bei den anderen Rohrwerkstoffen.

Schlussfolgerungen:

Aus den Versuchen, die insgesamt zu vergleichbaren Ergebnissen führten, ist zu schließen, dass die gängigen Rohrmaterialien eine gute Sanierungsqualität gewährleisten.

#### 4.3.3.2.2 Schadensart

Zur Untersuchung der Einflussgröße Schadensart wurden Versuche mit den Schadensvarianten „Längsriss“ (BV-A-36 bis 40), „Querriss“ (BV-A-41 bis 45) und „undichte Muffe“ (Versuche BV-A- 46 bis 50) durchgeführt.

**Tabelle 4-9: Versuchsergebnisse Schadensart**

Untersuchte Einflussgröße: Schadensart				
Randbedingungen des Injektionsmediums				
	Bodenart	grobkörnig		
	Lagerung	mittel		
	Bodenfeuchte	erdfeucht		
Randbedingungen des Rohrleitungssystems				
	Rohrmaterial/ -durchmesser	Steinzeug / DN150		
	Schadensart [mm]	Längsriss	Querriss	Muffe
	Schadensrichtung	oben	oben	oben
Verfahrenstechnische Parameter				
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)		
	Materialtemperatur [°C]	18		
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05		
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand		
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)				
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-36 bis A-40	A-41 bis A-45	A-46 bis A-50
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	4,85	5,31	5,10
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,17	1,28	1,44
	Komponente 2 [l]	0,07	0,06	0,05
	Zyklenzahl	1,0	1,0	1,0
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	100	100
	Grenzprüfdruck [bar]	0,27	0,26	0,26

Für alle drei Schadensarten wurde in den Versuchen ein Abdichtungserfolg von 100 % erzielt. Die Grenzprüfdrücke lagen bei 0,26 bar (Längsriss, Querriss) und 0,27 bar (undichte Muffe). Die optischen und technischen Untersuchungen zeigten bei allen drei Varianten homogene Abdichtungskörper mit etwa gleichen Abmessungen, deren Form sich aus der Schadensart ergab.

Ergänzend zu diesen Versuchen durchgeführte - an dieser Stelle jedoch nicht näher beschriebene - Untersuchungen mit unterschiedlichen Schadensgrößen haben ebenfalls Erfolgsquoten von 100 % und Grenzprüfdrücke im o. g. Bereich ergeben.

#### Erklärungen und Schlussfolgerungen:

In den Versuchen wurde kein direkter Zusammenhang zwischen der Schadensart bzw. der Schadensgröße und der Abdichtungswirksamkeit festgestellt. Deshalb ist aus den Ergebnissen zu folgern, dass Schäden, die innerhalb der in den Zulassungen formulierten Anwendungsgrenzen liegen, keine nennenswerten Auswirkungen auf die Sanierungsqualität haben.

#### 4.3.3.2.3 Schadensorientierung

Der Einfluss der Schadensrichtung wurde anhand der Varianten „Längsriss oben“ (Versuche BV-A-36 bis 40) und „Längsriss unten“ (Versuche BV-A-51 bis 55) untersucht.

**Tabelle 4-10: Versuchsergebnisse Schadensorientierung**

Untersuchte Einflussgröße: Schadensorientierung			
Randbedingungen des Injektionsmediums			
	Bodenart	grobkörnig	
	Lagerung	mittel	
	Bodenfeuchte	erdfeucht	
Randbedingungen des Rohrleitungssystems			
	Rohrmaterial/ -durchmesser	Steinzeug / DN150	
	Schadensart [mm]	Längsriss (160/3)	
	Schadensrichtung	oben	unten
Verfahrenstechnische Parameter			
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)	
	Materialtemperatur [°C]	18	
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05	
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand	
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)			
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-36 bis A-40	A-51 bis A-55
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	4,85	5,12
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,17	1,50
	Komponente 2 [l]	0,07	0,08
	Zyklenzahl	1,0	1,6
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	100
	Grenzprüfdruck [bar]	0,27	0,26

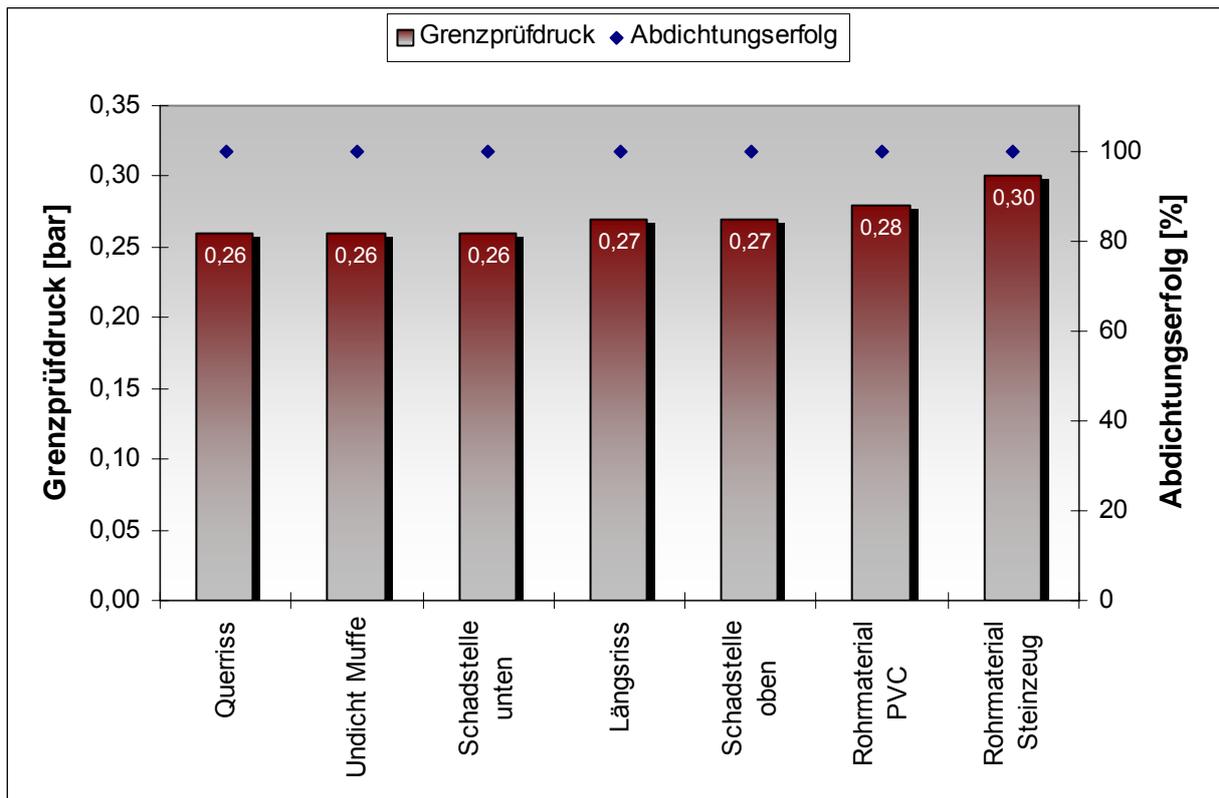
Die untersuchten Schadensorientierungen konnten in allen Versuchen erfolgreich und mit ähnlichen Wirksamkeiten (Grenzprüfdruck: 0,27 bzw. 0,26 bar) abgedichtet werden. Bei der optischen und technischen Inspektion zeigten die Abdichtungskörper vergleichbare Beschaffenheiten.

#### Erklärungen und Schlussfolgerungen:

In den Versuchen wurde kein direkter Zusammenhang zwischen der Schadensorientierung und der Abdichtungswirksamkeit festgestellt. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass die Schadensorientierung keine Auswirkung auf die Sanierungsqualität hat.

#### 4.3.3.2.4 Zusammenfassung

Die wichtigsten Versuchsergebnisse der Untersuchungen zu den Randbedingungen des Rohrleitungssystems sind in Abbildung 4-15 zusammengestellt.



**Abbildung 4-15: Ergebnisübersicht zu den Randbedingungen des Rohrleitungssystems**

Sämtliche Varianten der untersuchten Einflussgrößen Rohrmaterial, Schadensart und Schadensorientierung führten in den Versuchen zu einer Abdichtungsquote von 100 % und zu Grenzprüfdrücken von mindestens 0,25 bar.

Die Untersuchungsergebnisse sprechen dafür, dass die üblichen Schadensbilder für Sanierungen mit dem Flutungsverfahren unproblematisch sind und ihr Einfluss auf das Abdichtungsergebnis gering ist. Diese Feststellung unterliegt der Voraussetzung, dass sich die zu sanierenden Schäden innerhalb der Zulassungsvorgaben bewegen.

### 4.3.3.3 Verfahrenstechnische Parameter

Aus der Gruppe der verfahrenstechnischen Parameter wurden die Einflussgrößen „Druckhöhe“, „Materialviskosität“ und „Temperatur“ sowie zusätzlich der Sonderfall „Geringe Druckhöhe“ untersucht.

#### 4.3.3.3.1 Materialviskosität und Injektionsdruck

Zur Untersuchung der Einflussgrößen Materialviskosität und Injektionsdruck wurden Versuche mit einer niedrig-viskosen (75 mPa·s) und einer hoch-viskosen (170 mPa·s) Komponente 1 unter Variation der Injektionsdrücke (0,05 bar und 0,20 bar) durchgeführt und ausgewertet.

**Tabelle 4-11: Versuchsergebnisse Materialviskosität und Injektionsdruck**

Untersuchte Einflussgrößen: Injektionsdruck und Materialviskosität					
Randbedingungen des Injektionsmediums					
	Bodenart	grobkörnig			
	Lagerung	mittel			
	Bodenfeuchte	erdfeucht			
Randbedingungen des Rohrleitungssystems					
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC / DN100			
	Schadensart [mm]	Längsriss (160/3)			
	Schadensrichtung	oben			
Verfahrenstechnische Parameter					
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)		hoch (150 mPas)	
	Materialtemperatur [°C]	18			
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05	0,2	0,05	0,2
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand			
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)					
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-6 bis A-10	A-66 bis A-70	A-71 bis A-75	A-76 bis A-80
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	4,99	5,30	4,74	5,43
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,18	7,12	1,04	6,86
	Komponente 2 [l]	0,07	0,63	0,06	0,29
	Zyklenzahl	1,0	1,0	1,0	1,0
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	100	100	100
	Grenzprüfdruck [bar]	0,28	0,29	0,20	0,29

In den Versuchen führten sämtliche Sanierungen zur Abdichtung der Schadstellen (Abdichtungserfolg 100 %). Bei den Sanierungen mit niedriger Materialviskosität lagen die Grenzprüfdrücke mit 0,28 bar (Injektionsdruck: 0,05 bar) und 0,29 bar (Injektionsdruck: 0,20 bar) injektionsdruckunabhängig im gleichen Bereich. Bei den Sanierungen mit hoher Materialviskosität zeigte sich dagegen in Abhängigkeit vom Injektionsdruck ein deutlicher Wirksamkeitsunterschied. Bei einem Injektionsdruck von 0,05 bar betrug der Grenzprüfdruck 0,20 bar. Dagegen führte der Injektionsdruck von 0,20 bar zu einem Grenzprüfdruck von 0,29 bar. Im Rahmen der optischen und technischen Prüfung der Abdichtungskörper wurden nur bei den Sanierungen mit hoher Viskosität und niedrigem

Injektionsdruck Auffälligkeiten, wie kleinere Abmessungen und inhomogene Boden-Gel-Strukturen, festgestellt.

#### Erklärungen:

Die infolge höherer Materialviskosität eingeschränkte Fließfähigkeit führt bei geringem Injektionsdruck dazu, dass das Injektionsmedium nicht gleichmäßig durchströmt wird, sondern einzelne Porenräume, bei denen die Porenengstellen einen unüberwindbaren Widerstand für die Injektionskomponente darstellen, unbefüllt bleiben. Weiterhin ist unter diesen Bedingungen die Eindringtiefe der Komponente 1 in das Injektionsmedium niedriger. Bei der Injektion von Komponente 2, die aufgrund ihrer niedrigen Viskosität eine hohe Eindringfähigkeit besitzt, bleiben die nicht mit Komponente 1 befüllten Porenräume von der Reaktion und Gelbildung ausgenommen und stellen somit die Schwachstellen in der Boden-Gel-Struktur dar. Diese Effekte waren in den Versuchen durch die Ausbildung relativ kleiner und inhomogener Abdichtungskörper mit geringen Wirksamkeiten erkennbar.

Bei hohen Injektionsdrücken kann der Widerstand der Porenengstellen auch bei der hohen Materialviskosität besser überwunden und das Injektionsmedium von der Komponente 1 gleichmäßiger und weiter durchströmt werden. Das Zusammentreffen der beiden Injektionskomponenten ist unter diesen Bedingungen besser gewährleistet, was sich in den entsprechenden Versuchen durch die Ausbildung großer und homogener Abdichtungskörper mit letztlich höheren Wirksamkeiten widerspiegelte.

Bei niedrigen Materialviskositäten wird das Injektionsmedium infolge der besseren Fließfähigkeit bereits bei geringeren Injektionsdrücken gleichmäßig durchströmt. In den Versuchen wurden daher sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Injektionsdrücken bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften vergleichbare Abdichtungskörper festgestellt.

#### Schlussfolgerungen:

Die Versuchsergebnisse sprechen dafür, dass die Fließeigenschaften des Injektionsmaterials für die Wirksamkeit der Sanierungen von großer Bedeutung sind. Höherviskose Injektionsmittel benötigen einen höheren Injektionsdruck zur Erzielung adäquater Wirksamkeiten als niedrigviskose Injektionsmittel. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt bei Böden mit hohem Feinkornanteil aufgrund der geringeren Durchlässigkeit weiter verstärkt wird.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass bei entsprechenden Material- und Bodeneigenschaften – entscheidend ist hier die Durchlässigkeit des Injektionsmediums gegenüber der Injektionslösung – bereits mit Injektionsdrücken von 0,05 bar wirksame Abdichtungen erzielt werden können.

## 4.3.3.3.2 Temperatur

Zur Untersuchung der Einflussgröße Temperatur wurden Versuche mit Materialtemperaturen von 10 °C (Versuche BV-A-56 bis 60) und 25 °C (Versuche BV-A-61 bis 65) durchgeführt.

Tabelle 4-12: Versuchsergebnisse Temperatur

Untersuchte Einflussgröße: Temperatur			
Randbedingungen des Injektionsmediums			
	Bodenart	grobkörnig	
	Lagerung	mittel	
	Bodenfeuchte	erdfeucht	
Randbedingungen des Rohrleitungssystems			
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC/ DN 100	
	Schadensart [mm]	Längsriss (160/3)	
	Schadensrichtung	oben	
Verfahrenstechnische Parameter			
	Materialviskosität	niedrig (75 mPas)	
	Materialtemperatur [°C]	10	25
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,05	
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand	
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)			
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A-56 bis A-60	A-61 bis A-65
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	5,20	4,90
Sanierung	Komponente 1 [l]	1,03	1,56
	Komponente 2 [l]	0,05	0,08
	Zyklenzahl	1,2	1,0
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	80	100
	Grenzprüfdruck [bar]	0,12	0,26

Bei den Sanierungen mit einer Materialtemperatur von 10 °C wurden ein Abdichtungserfolg von 80 % und ein Grenzprüfdruck von 0,12 bar erreicht. Dagegen führten die Sanierungen mit Materialtemperaturen von 25 °C zu einem Abdichtungserfolg von 100 % und einem Grenzprüfdruck von 0,26 bar. Bei der optischen Inspektion zeigte sich, dass die mit niedrigen Materialtemperaturen hergestellten Abdichtungskörper eine ungleichmäßige Boden-Gel-Struktur mit deutlich kleineren Abmessungen aufwiesen.

Erklärungen:

Zwischen der Temperatur und der Viskosität besteht ein direkter Zusammenhang. Niedrige Materialtemperaturen führen zu einer erhöhten Viskosität und damit zu einer eingeschränkten Fließfähigkeit. Bei hohen Temperaturen ist das Gegenteil der Fall. Infolge der reduzierten Fließfähigkeit bei niedrigen Temperaturen wird bei der Injektion die gleichmäßige Durch-

strömung des Injektionsmediums erschwert. Wie in Kapitel 4.3.3.3.1 ausgeführt, besteht hier die Gefahr, dass kleine Porenräume nicht von den Komponenten gefüllt werden, was die Gelbildung in diesem Bereich ausschließt und zur Inhomogenität des Boden-Gel-Gefüges führt. Der Abdichtungserfolg und die Wirksamkeit werden durch diese Effekte signifikant reduziert.

#### Schlussfolgerungen:

Aus den Untersuchungsergebnissen ist zu schließen, dass Sanierungen bei kühlen Witterungsbedingungen problematisch sein können, da wegen der eingeschränkten Fließfähigkeit der Komponenten bei der Injektion keine homogenen Abdichtungskörper ausreichender Größe gebildet werden. Bei warmen Witterungsbedingungen sind dagegen für die Sanierungen keine Einschränkungen bezüglich der Dichtwirkung zu erwarten.

#### 4.3.3.3 Sonderfall „Geringer Injektionsdruck“

Zur Untersuchung geringer Injektionsdrücke wurden die Schäden in entsprechend modifizierten Basisversuchen am vertikalen Leitungsteil im Abstand von 0,15 cm (Versuche BV-A/B/C-86 bis 90), 0,30 cm (BV-A/B/C-91 bis 95) und 0,45 cm (Versuche BV-A/B/C-96 bis 100) vom Rohrscheitel angeordnet. Dementsprechend ergaben sich aus diesen Schadensanordnungen effektive Injektionsdrücke von 0,035 bar, 0,02 bar und 0,005 bar.

**Tabelle 4-13: Versuchsergebnisse „Geringer Injektionsdruck“**

Sonderfall: Geringer Injektionsdruck				
Randbedingungen des Injektionsmediums				
	Bodenart	grobkörnig		
	Lagerung	mittel		
	Bodenfeuchte	erdfeucht		
Randbedingungen des Rohrleitungssystems				
	Rohrmaterial/ -durchmesser	PVC / DN100 (vertikal)		
	Schadensart [mm]	Längsriss		
	Schadensrichtung	seitlich		
Verfahrenstechnische Parameter				
	Materialviskosität	verschieden		
	Materialtemperatur [°C]	18		
	Injektionsdruckhöhe [bar]	0,035	0,020	0,005
	Injektionszeit K1/K2 [min]	45/ bis Stillstand		
Versuchsergebnisse (Mittelwerte)				
Versuchsnummer	Basisversuch (BV-)	A/B/C-86 bis -90	A/B/C-91 bis -95	A/B/C-96 bis -100
Dichtheitsprüfung vorher	Wasserverlust [l]	4,48	1,97	1,03
Sanierung	Komponente 1 [l]	0,59	0,47	0,33
	Komponente 2 [l]	0,12	0,05	0,04
	Zyklenzahl	1,0	1,0	1,0
Dichtheitsprüfung nachher	Abdichtungserfolg [%]	100	80	60
	Grenzprüfdruck [bar]	0,24	0,16	0,12

In den Versuchen zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Abdichtungsergebnisse von der Druckhöhe. Die Sanierungen mit einer effektiven Injektionsdruckhöhe von 0,035 bar erreichten einen Abdichtungserfolg von 100 % und einen Grenzprüfdruck von 0,24 bar. Bei den Versuchen mit einer effektiven Injektionsdruckhöhe von 0,020 bar führten 80 % der Sanierungen zur Abdichtung der Schadstellen; der Grenzprüfdruck betrug hier 0,16 bar. Mit einer effektiven Druckhöhe von 0,005 bar wurden nur 60 % der Schadstellen erfolgreich abgedichtet. Der Grenzprüfdruck lag hier bei 0,12 bar. Entsprechend abgestufte Ergebnisse ergaben auch die optischen und technischen Untersuchungen an den Abdichtungskörpern. Während die Injektionsdrücke von 0,035 bar zu vergleichsweise großen Abdichtungskörpern aus einem dichten Boden-Gel-Gefüge führten, nahmen Abmessungen und Homogenität mit geringer werdendem Druck deutlich ab (Abbildung 4-16).



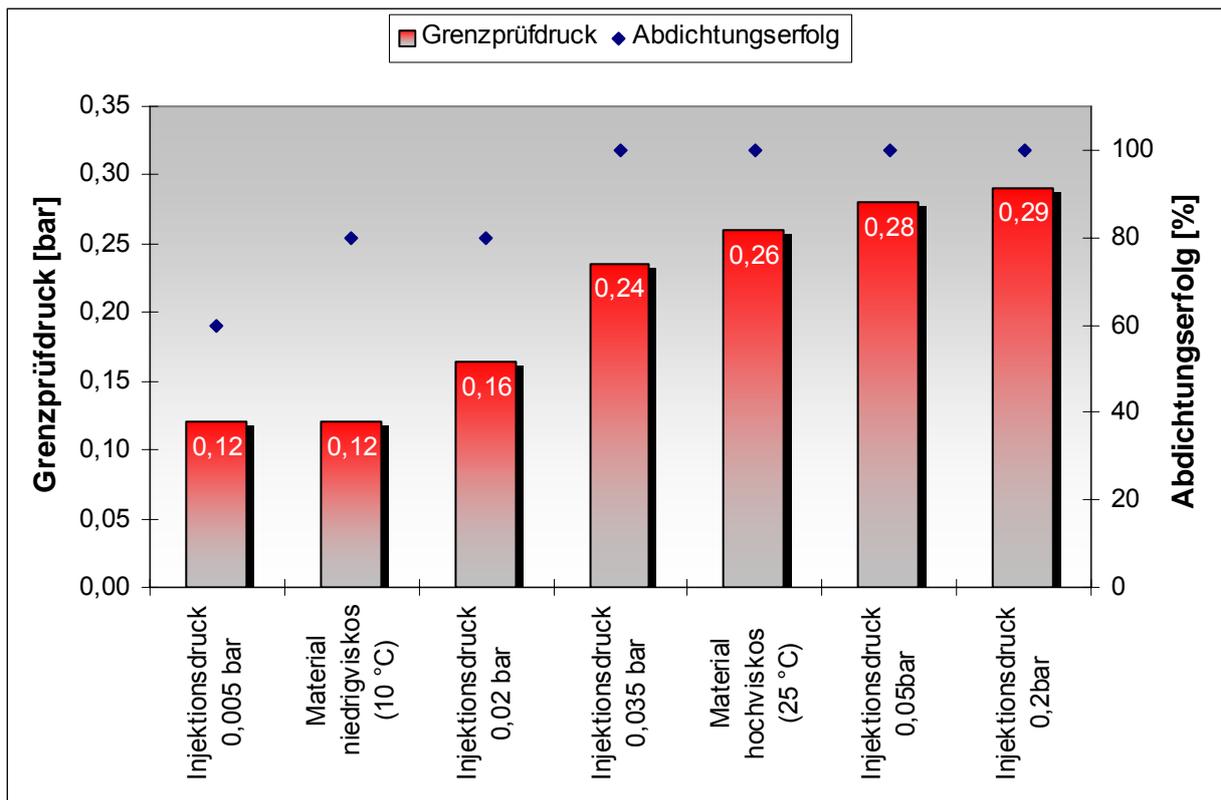
**Abbildung 4-16: Abdichtungskörper bei niedrigen Injektionsdrücken (0,035 / 0,020 / 0,005 bar)**

#### Erklärungen und Schlussfolgerungen:

Niedrige Injektionsdrücke führen dazu, dass sich die Ausbreitung der Injektionskomponenten im Boden nur unzureichend vollzieht und damit Abdichtungskörper entstehen, bei denen die Boden-Gel-Struktur inhomogen und die Kontaktfläche zur Rohrwandung gering ist. Gute Sanierungsergebnisse sind mit geringen Injektionsdrücken nicht zu erreichen.

#### 4.3.3.3.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zu den verfahrenstechnischen Parametern sind in Abbildung 4-17 grafisch zusammengestellt.



**Abbildung 4-17: Ergebnisübersicht zu den verfahrenstechnischen Parametern**

In den Versuchen führten Sanierungen mit niedrigen Injektionsdrücken ( $< 0,035$  bar) ebenso wenig zu einer sicheren Abdichtung der Schadstellen wie Sanierungen bei niedrigen Materialtemperaturen ( $10\text{ °C}$ ). Unter diesen Bedingungen betrug die Abdichtungsquote durchschnittlich weniger als 80 % und der Grenzüprüdruck weniger als 0,15 bar. Abdichtungserfolge von 100 % und Wirksamkeiten von über 0,24 bar wurden dagegen bei Sanierungen mit höheren Injektionsdrücken ( $> 0,035$  bar) und höheren Materialtemperaturen ( $25\text{ °C}$ ) erreicht.

#### 4.3.4 Bewertung der Sanierungsqualität

Zum Vergleich der untersuchten Einflussvarianten werden die Versuchsergebnisse nun über eine Bewertungszahl für die Sanierungsqualität normiert. Die Bewertungszahl wird unter Einbeziehung der festgestellten Erfolgsquote und der durchschnittlich erzielten Wirksamkeit nach einem für die Basisversuchsreihe entwickelten Methodik zur Qualitätsbestimmung (Tabelle 4-14) ermittelt.

Bewertungszahl (Spalte 3)

Die Bewertungszahl (BZ) für die Sanierungsqualität, die zwischen 0 und 100 liegen kann, ergibt sich aus den Punktezahlen für den Abdichtungserfolg und die Wirksamkeit. Der Ab-

dichtungserfolg geht mit 75 % und die Wirksamkeit mit 25 % in die Bewertung ein ( $BZ = 0,75 \times P_A + 0,25 \times P_W$ ).

#### Abdichtungserfolg (Spalte 4)

Die Punktezahl für den Abdichtungserfolg ( $P_A$ ) entspricht dem prozentualen Anteil der erfolgreichen Sanierungen.

#### Wirksamkeit (Spalte 5)

Die Punktezahl für die Wirksamkeit ( $P_W$ ) ergibt sich aus dem Verhältnis des durchschnittlichen Grenzprüfdruckes einer Einflussvariante ( $GPD_{gem}$ ) zum maximal gemessenen Grenzprüfdruck aller Versuche ( $P_W = 100 \times GPD_{gem}/GPD_{max}$ ).

#### Gute Sanierungsqualität:

Als Schwellenwert für eine gute Sanierungsqualität ( $BZ_S^g$ ) wird die Bewertungszahl 85 festgelegt, die sich aus der Erfolgsquote von 100 % (hier: erfolgreiche Abdichtung in 5 von 5 Versuchen) und aus überdurchschnittlichen Grenzprüfdrücken ergibt. Bei Sanierungsbedingungen, die zu einer guten Sanierungsqualität führen, kann eine zuverlässige und wirksame Abdichtung erwartet werden.

#### Ausreichende Sanierungsqualität:

Der Schwellenwert für eine ausreichende Sanierungsqualität ( $BZ_S^a$ ) liegt bei einer Bewertungszahl von 75. Dieser Wert bedingt eine Erfolgsquote von größer/gleich 80 % (hier: erfolgreiche Abdichtung in mindestens 4 von 5 Versuchen) und überdurchschnittliche Grenzprüfdrücke. Diese Qualitätsstufe berücksichtigt die technischen Unwägbarkeiten der Verfahrensdurchführung, infolge dessen die Qualität einzelner Sanierungen unzureichend, das Ergebnis der Gesamtmenge jedoch akzeptabel sein kann. Bei Sanierungsbedingungen, die zu einer ausreichenden Sanierungsqualität führen, kann die zuverlässige und wirksame Abdichtung mit einem begrenzten Wagnis angenommen werden.

#### Mangelhafte Sanierungsqualität:

Bewertungszahlen unterhalb von 75 führen zu einer mangelhaften Sanierungsqualität. Diese Werte ergeben sich aus Erfolgsquoten kleiner/gleich 80 % und unterdurchschnittlichen Grenzprüfdrücken. Bei Sanierungsbedingungen, die zu einer mangelhaften Sanierungsqualität führen, ist die zuverlässige und wirksame Abdichtung unwahrscheinlich.

Die nach dem beschriebenen Verfahren bewerteten Versuchsergebnisse der Basisversuchsreihe sind in Tabelle 4-14 dargestellt.

Die grün markierten Einflussvarianten führten zu Bewertungszahlen größer/gleich 85 (gute Sanierungsqualität). Die Abdichtungskörper dieser Qualitätsstufe waren durch ein gleichmäßiges Boden-Gel-Gefüge gekennzeichnet. Bewertungszahlen im ausreichenden Qualitätsbereich stellten sich in der Basisversuchsreihe nicht ein. Die rot markierten Einflussvarianten führten zu Bewertungszahlen kleiner/gleich 75 und damit zu einer mangelhaften Sanierungsqualität. Das wesentliche Merkmal der Abdichtungskörper mangelhafter Sanierungsqualität war ein ungleichmäßiges Boden-Gel-Gefüge, bei dem einerseits Bereiche aus reinem Silikatgel und andererseits nicht injizierte Bodenbereiche festgestellt wurden.

**Tabelle 4-14: Sanierungsqualität bei verschiedenen Einflussvarianten**

1	2	3	4	5
Sanierungsbedingungen		Sanierungsqualität		
Einflussvariante	Gruppenkürzel	Bewertungszahl (BZ)	Abdichtungserfolg ( $P_A$ )	Wirksamkeit ( $P_W$ )
Rohrmaterial Steinzeug	RRL	<b>93,8</b>	100	75,0
Sanierungsdruck 0,2 bar	VTP	<b>93,1</b>	100	72,5
Bodendurchlässigkeit mittel	RIM	<b>92,5</b>	100	70,0
Rohrmaterial Kunststoff	RRL	<b>92,5</b>	100	70,0
Sanierungsdruck 0,05 bar	VTP	<b>92,5</b>	100	70,0
Schadstelle im Scheitelbereich	RRL	<b>91,9</b>	100	67,5
Schadensbild Längsriss	RRL	<b>91,9</b>	100	67,5
Materialtemperatur 25°C	VTP	<b>91,3</b>	100	65,0
Schadstelle im Sohlbereich	RRL	<b>91,3</b>	100	65,0
Schadensbild Querriss	RRL	<b>91,3</b>	100	65,0
Schadensbild undichte Muffe	RRL	<b>91,3</b>	100	65,0
Bodendurchlässigkeit gering	RIM	<b>90,0</b>	100	60,0
Sanierungsdruck 0,035 bar	VTP	<b>90,0</b>	100	60,0
in der Basisversuchsreihe nicht vorhanden		<b>75,0- 85,0</b>	-	-
Sanierungsdruck 0,02 bar	VTP	<b>70,0</b>	80	40,0
Materialtemperatur 10°C	VTP	<b>67,5</b>	80	30,0
Bodendurchlässigkeit hoch	RIM	<b>55,0</b>	60	40,0
Sanierungsdruck 0,005 bar	VTP	<b>52,5</b>	60	30,0
Boden wassergesättigt	RIM	<b>51,3</b>	60	25,0
Hohlraum im Scheitelbereich	RIM	<b>33,8</b>	40	15,0
Hohlraum im Sohlbereich	RIM	<b>18,8</b>	20	15,0
Spalte 2- Gruppenkürzel:		RRL - Randbedingungen des Rohrleitungssystems RIM - Randbedingungen des Injektionsmediums VTP - Verfahrenstechnische Parameter		
Spalte 5- Wirksamkeit:		Der maximal gemessene Grenzprüfdruck betrug 0,40 bar.		

Insgesamt ist damit festzuhalten, dass die *Sanierungsqualität* maßgeblich von der *Beschaffenheit der Abdichtungskörper* abhängt. Für eine gute Qualität muss der Porenraum des Abdichtungskörpers vollständig durch das Silikatgel geschlossen sein und das Korngerüst des Bodens eine ausreichende Stützwirkung gegenüber Synärese aufweisen. Entscheidende Beeinträchtigungen der Sanierungsqualität ergeben sich deshalb hauptsächlich aus problematischen Randbedingungen des Injektionsmediums und verfahrenstechnischen Parametern, bei denen die Ausbildung homogener Abdichtungskörper nicht gewährleistet ist.

Aus den Untersuchungen ist zu folgern, dass eine gute Sanierungsqualität, d. h. die zuverlässige und dauerhafte Abdichtung der Schadstellen, nur mit einer *eingehenden Zustandserfassung*, bei der problematische Randbedingungen erkannt werden können, und einer darauf *abgestimmten Sanierungsausführung* (vorlaufende Beseitigung problematischer Randbedingungen, Wahl geeigneter verfahrenstechnischer Parameter) sichergestellt werden kann. Können problematische Randbedingungen vor der Sanierung nicht beseitigt werden, ist vom Einsatz des Flutungsverfahrens abzuraten.

#### 4.4 Untersuchungen zur Beständigkeit (Basisversuchsreihe II)

Im normalen Leitungsbetrieb wirkt eine Vielzahl von Beanspruchungen – beispielsweise durch die Strömungskräfte oder die chemische Zusammensetzung des Abwassers – gleichzeitig auf die Abdichtungskörper. Daher ist es schwierig, den Einfluss einer einzelnen Beanspruchung auf die Abdichtungswirkung einzuschätzen.

Ziel der Versuchsreihe war es, maßgebende Beanspruchungen von Grundleitungsnetzen zu identifizieren und ihre Auswirkungen auf die Abdichtung zu ermitteln.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde daher durch die gezielte Beaufschlagung der Injektionskörper mit ausgewählten Beanspruchungen die Beständigkeit der Abdichtungskörper des Flutungsverfahrens geprüft.

##### 4.4.1 Versuchskonzept

Beanspruchungen in der Kanalisationstechnik können in Gruppen gleicher Wirkungsweise zusammengefasst werden (Tabelle 4-15).

**Tabelle 4-15: Beanspruchungsarten**

Art der Beanspruchung		Ursache der Beanspruchung	Bedeutung für den Untersuchungsbedarf
chemisch		Chemische Inhaltsstoffe des Abwassers	bereits untersucht
		Chemische Inhaltsstoffe des Wassers im	bereits untersucht
physikalisch		Temperaturwechsel des Abwassers	zu untersuchen
mechanisch	statisch	Boden- und Gebäudeauflast	nicht maßgebend
	hydro-statisch	Angestautes Abwasser in der Leitung	zu untersuchen
		Drückendes Wasser im Erdreich	
	dynamisch	Abrieb durch Feststoffe im Abwasser	bereits untersucht
		Erschütterungen	zu untersuchen
	hydro-dynamisch	Erosion durch fließendes Abwasser	nicht maßgebend
Erosion durch einen Hochdruckwasser-		zu untersuchen	

##### Chemische Beanspruchung:

Im Vordergrund der bereits anbieterseitig erfolgten Laboruntersuchungen stand der Nachweis der Beständigkeit gegenüber chemischen Beanspruchungen. Es wurde festgestellt, dass die Abdichtungskörper gegenüber den Prüfflüssigkeiten über einen Zeitraum von bis zu 42 Tagen beständig sind, sofern der pH-Wert des Prüfmediums zwischen 2 und 11 liegt.

Da die Konzentration der Lösungen bei den Versuchen höher war als die Konzentrationen, die in Abwässern oder im Grundwasser auftreten, besteht für den Einsatz an Grundleitungsnetzen an dieser Stelle kein weiterer Untersuchungsbedarf zur chemischen Beständigkeit.

#### Physikalische Beanspruchung:

Der Einfluss von wechselnden Abwassertemperaturen auf die mit dem Flutungsverfahren erstellten Abdichtungen wurde bisher nicht untersucht. Daher werden Versuche zur Beständigkeit gegenüber Temperaturwechsel eingehend durchgeführt.

#### Statische Beanspruchung:

Die statischen Boden- und Gebäudelasten stellen keine maßgebende Beanspruchung des Abdichtungskörpers dar, da die Festigkeit des Bodens durch die Silikatgelinjektion gesteigert wird. Demnach erhöht sich durch die Sanierung auch die Tragfähigkeit des injizierten Bodens.

#### Hydrostatische Beanspruchung:

Die chemische Beständigkeit von Probekörpern aus TUBOGEL wurde teilweise geprüft, indem auf die Körper ein Flüssigkeitsdruck aufgebracht wurde. Neben der chemischen lag demzufolge auch eine hydrostatische Beanspruchung vor. Die Prüfungen zu den anderen beiden Injektionsmitteln (STAUBCO und SANIPOR) erfolgten drucklos durch eine Einlagerung der Probekörper in das jeweilige Prüfmedium. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der Beanspruchung durch drückendes Wasser in einer weiteren Versuchsreihe untersucht.

Wasserdruck kann sowohl von außen (Grundwasser) als auch aus von innen (Rückstau) auf den Abdichtungskörper einwirken. Aus verfahrenstechnischen Gründen wurde in den Versuchen der Fall von angestautem Wasser in der Leitung betrachtet.

#### Dynamische Beanspruchung:

Dynamische Beanspruchungen entstehen zum einen infolge der Reibung durch im Abwasser befindliche Feststoffe und zum anderen infolge von äußeren Erschütterungen.

Die Prüfung der Abriebfestigkeit ergab bei direkter Beanspruchung von Probewürfeln gemäß dem Schleifscheibenverfahren nach Böhme einen deutlichen Verschleiß des Boden-Silikatgel-Konglomerates. Wurde die reibende Beanspruchung durch Rutschbewegungen eines Sand-Kies-Wasser-Gemisches in einem sanierten Rohr erzeugt, nahm die Abdichtung keinen Schaden. Da der letztgenannte Versuch die Gegebenheiten in situ deutlich besser widerspiegelt, kann von einer Beständigkeit gegenüber der reibenden Beanspruchung durch Feststoffe im Abwasser ausgegangen werden.

Zur Bedeutung von Verkehrserschütterungen für die Abdichtungswirkung der Injektionskörper fanden keine Untersuchungen statt. Untersuchungen an zwei mit dem Flutungsverfahren sanierten Kanälen in situ geben Grund zur Annahme, dass Erschütterungen zu einer Verschlechterung der Abdichtungswirkung führen. Undichtigkeiten wurden in Bereichen festgestellt, in denen Bautätigkeiten erfolgt waren oder die in der Nähe von Straßenbahntrassen lagen. Daher ist auch die Untersuchung der Wirksamkeit der Abdichtungen bei einer Beanspruchung durch Erschütterungen Gegenstand des Forschungsvorhabens. Erschütterungen infolge von Erdbeben stellen eine außergewöhnliche Beanspruchung dar, auf die nicht eingegangen wird.

#### Hydrodynamische Beanspruchung:

Hydrodynamische Beanspruchungen gehen vom Abwasserabfluss unter normalen Betriebsbedingungen sowie von Hochdruckspülungen aus. Die Hochdruckspülungen stellen aufgrund der hohen Kraft des Wasserstrahls die maßgebende Beanspruchung dar.

Da eine Hochdruckspülung eine äußerst starke Beanspruchung der Rohrwandung darstellt, die sich je nach Art und Größe der Schadstelle unterschiedlich stark auf den Abdichtungskörper auswirkt, wurden auch die Auswirkungen dieser Beanspruchung untersucht.

Demzufolge besteht für die Prüfung der Beständigkeit der mit dem Flutungsverfahren hergestellten Abdichtungen zu den vier folgenden Beanspruchungsarten Untersuchungsbedarf:

- Temperaturwechsel des Abwassers
- Rückstau des Abwassers in der Rohrleitung
- Erschütterungen
- Hochdruckspülungen

Die Versuche wurden in Anlehnung an die zuvor beschriebenen Basisversuche (Kap. 4.3.2.1) durchgeführt und sind daher an dieser Stelle nicht näher beschrieben.

## **4.4.2 Ergebnisse**

### **4.4.2.1 Beständigkeit gegenüber Temperaturwechsel**

Die Beanspruchung mit heißem Wasser bei den Versuchen zur Beständigkeit gegenüber Temperaturwechseln verursachte bei Temperaturen ab 77 °C eine Auswaschung von Bodenmaterial. Betroffen war im Unterschied zu den Beobachtungen bei den Hochdruckspülungen (s. u.) nur der Bereich unmittelbar an der Schadstelle. Feine Bodenbestandteile wur-

den ausgespült, vorhandene Kiesel verblieben an ihrem ursprünglichen Platz. Zudem wurde beim Ausbau einiger Sanierungskörper in der Fuge zwischen dem Körper und dem Rohr eine hoch viskose Flüssigkeit vorgefunden, die vermutlich aus Synäresevorgängen resultierte. Eine Verschlechterung der Abdichtungswirkung trat ab Wassertemperaturen von etwa 63 °C ein. Der maximal zulässige Wasserverlust wurde erst ab 85 °C überschritten.

Die in situ zu erwartende Intensität der Beanspruchung durch Temperaturwechsel ist geringer als die bei den Versuchen vorhandene Intensität. Wechselnde Temperaturen wie sie bei häuslichem Abwasser auftreten, beeinflussen demzufolge die Funktionsfähigkeit der mit dem Flutungsverfahren hergestellten Abdichtungen praktisch nicht.

#### **4.4.2.2 Beständigkeit gegenüber Wasserdruck infolge Rückstau**

Wenn Wasserdruck auf den Körper ausgeübt wird, finden aufgrund der Beschaffenheit des Silikatgel-Boden-Konglomerates, das sich durch einen geringen Luftporenanteil auszeichnet, grundsätzlich Sickervorgänge durch den Injektionskörper und entlang der Rohroberfläche statt. Dies ist der Grund für die beobachteten Wasserverluste bei der Beanspruchung durch anstehenden Wasserdruck zur Simulation eines Rückstaus von Abwasser in der Grundstücksentwässerungsleitung oder zur Simulation von anstehendem Grundwasser. Die gemessenen Wasserverlustmengen lagen bei allen Versuchen (max. Druckhöhe bis 2,0 m) zur Beanspruchungsart 'Rückstau' nach DIN 1986-30 im zulässigen Bereich.

Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Gegebenheiten in situ ist nur bedingt gegeben. Aufgrund der örtlich variierenden Verhältnisse ist es möglich, dass die Druckhöhen in situ über den bei den Versuchen eingesetzten Druckhöhen liegen. Zudem spiegelt die Dauer der Druckbeaufschlagung bei den Versuchen den Fall von anstehendem Grundwasser nicht ausreichend wieder. Wie die Versuche zur Langzeitbeanspruchung gezeigt haben, waren die gemessenen Wasserverlustmengen aufgrund der Sperrwirkung des intakten Sanierungskörpers jedoch so gering, dass mittelfristig auch bei höherem Druck oder längerer Beanspruchungsdauer nicht mit einer Verschlechterung der Abdichtungswirkung über die zulässigen Grenzen hinaus zu rechnen ist.

#### **4.4.2.3 Beständigkeit gegenüber Erschütterungen**

Infolge der Beanspruchung von Abdichtungen durch Erschütterungen geringer Intensität wurde die Abdichtungswirkung nicht beeinträchtigt. Erschütterungen hoher Intensität führten zu einer Zerstörung des Haftverbundes zwischen dem Injektionskörper und dem Rohr. Infolgedessen stellte sich beim überwiegenden Anteil der Versuche eine unzulässige Steigerung

der Wasserverlustmenge ein. Eine Beschädigung des Sanierungskörpers selbst – beispielsweise in Form von Rissen – wurde nicht beobachtet.

Da bei den Versuchen die Erschütterungen hoher Intensität deutlich über den durch Verkehr in situ ausgelösten Erschütterungen lag, wird im Allgemeinen die Funktionsfähigkeit der mit dem Flutungsverfahren hergestellten Abdichtungen durch Erschütterungen nicht beeinträchtigt. Aufgrund von starken Erschütterungen infolge von Bauarbeiten können die Abdichtungen allerdings beschädigt werden. Diese Gefährdung ist bei der Planung von Bautätigkeiten im direkten Umfeld von mit dem Flutungsverfahren sanierten Leitungen zu berücksichtigen.

#### **4.4.2.4 Beständigkeit gegenüber Hochdruckspülungen**

Durch Hochdruckspülungen (Druck > 50 bar) wurde das Silikatgel-Boden-Konglomerat in der Nähe der Schadstelle sowie in Richtung des Hochdruckstrahles – teilweise weit in den Abdichtungskörper hinein – erodiert. Dadurch wurde der Weg, den das Wasser zurücklegen muss, um durch den Abdichtungskörper zu sickern, verkürzt. Zudem wird angenommen, dass der Anteil der mit Silikatgel gefüllten Poren von der Schadstelle bis zum Rand des Abdichtungskörpers abnimmt. Nach den Hochdruckspülungen verblieb demnach ein kürzerer Sickerweg durch Material geringerer Sperrwirkung. Mehr als die Hälfte aller untersuchten Abdichtungen wiesen spätestens nach der fünften Hochdruckspülung einen Wasserverlust oberhalb des zulässigen Grenzwertes auf. Teilweise führte bereits die erste Hochdruckspülung zu einem unzulässigen Wasserverlust.

Die Größe der Abdichtungskörper war in diesem Fall von besonderer Bedeutung. Bei einigen Abdichtungskörpern geringer Größe reichte der erodierte Bereich so weit, dass sich ein offener Kanal von der Schadstelle durch den Abdichtungskörper bis in das umliegende, nicht verfestigte Erdreich ausbildete. Infolgedessen ging die Abdichtungswirkung verloren. Große Körper wiesen eine höhere Beständigkeit gegenüber den Spülungen auf.

Die Intensität der Beanspruchung bei den Versuchen ist mit der bei Hochdruckspülungen in situ vergleichbar. Demzufolge stellen die Hochdruckspülungen in situ – ebenso wie bei den Versuchen – eine Beanspruchung dar, die die Injektionskörper beschädigt und eine deutliche Verschlechterung der Abdichtungswirkung herbeiführen kann. Daher ist bei mit dem Flutungsverfahren sanierten Leitungen im Allgemeinen möglichst von Hochdruckspülungen abzusehen. Unter günstigen Bedingungen – beispielsweise bei Schäden überwiegend an Muffen, die eine Schutzfunktion für den Sanierungskörper besitzen – kann ein Einsatz von Hochdruckspülungen in Erwägung gezogen werden.

### 4.4.3 Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten Versuche war die Bewertung der Beständigkeit von mit dem Flutungsverfahren erstellten Abdichtungen von Schadstellen in Entwässerungsleitungen gegenüber ausgewählten Beanspruchungen. Es wurden vier Versuchsreihen zu den Beanspruchungsarten „Temperaturwechsel“, „Rückstau“, „Erschütterung“, und „Hochdruckspülung“, durchgeführt.

In den Untersuchungen wurden keine Beeinträchtigungen der Abdichtungswirkung aus den Lastfällen „Temperaturwechsel“ und „Rückstau“ festgestellt. Dagegen stellten sich bei den Lastfällen „starke Erschütterung“ und „Hochdruckspülung“ ein Verlust der Abdichtungswirkung ein. Diese Belastungsfälle, die in der Praxis beispielsweise bei Bauarbeiten im Bereich sanierter Leitungen bzw. bei wiederholten Reinigungsarbeiten am Grundleitungsnetz auftreten können, sind deshalb nach Möglichkeit auszuschließen.

## **5 Umweltverträglichkeit (Ergänzungsvorhaben II)**

### **5.1 Problemstellung und Ziele der Untersuchungen**

#### **5.1.1 Bisherige Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit**

Nach den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Sanierungsverfahren bestehen gegen die Verwendung der Injektionskomponenten des Flutungsverfahrens hinsichtlich der bodenhygienischen Auswirkungen keine Bedenken. Als Voraussetzung für die bauaufsichtlichen Zulassungen wurde die Umweltverträglichkeit des Flutungsverfahrens in Säulenversuchen nachgewiesen<sup>17</sup>. Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit im Säulenversuch weisen allerdings nur eine bedingte Praxisnähe auf. Bei dem Säulenversuch, durchgeführt im Hygiene-Institut des Ruhrgebiets in Gelsenkirchen, wurden z.B. jeweils nur 500 ml der ersten und zweiten Komponente kontrolliert in den Prüfraum injiziert. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass das Mischungsverhältnis von erster zu zweiter Komponente und auch der Gesamtmengenverbrauch starken Schwankungen unterliegen. Da sich die Reaktion der Komponenten im nicht einsehbaren Leitungszonenbereich vollzieht, ist eine Übertragung der unter optimalen Laborbedingungen erhaltenen Versuchsergebnisse auf reale Sanierungsbedingungen nur eingeschränkt gültig.

Weiterhin haben die einzelnen Lizenzgeber eine ökotoxikologische Bewertung der Einzelsubstanzen durchgeführt um, Aussagen über mögliche Beeinträchtigungen zu erlangen. Hierbei ist festzuhalten, dass alle Einzelsubstanzen der Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdende Stoffe) zuzuordnen sind. Außerdem wird in den Sicherheitsdatenblättern darauf hingewiesen, dass die Einzelsubstanzen nicht ins Grundwasser sowie in die Kanalisation eingebracht werden dürfen.

#### **5.1.2 Ziel der Untersuchungsreihe**

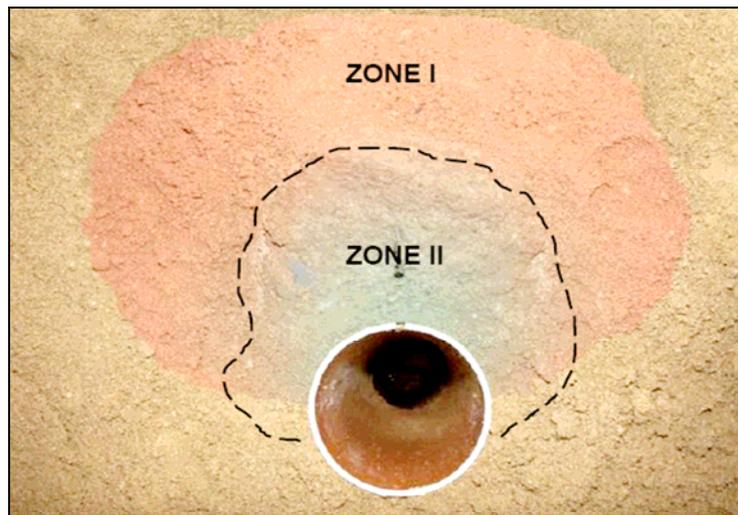
Ziel dieser Untersuchungen war es, einen Beitrag zur Einschätzung von Art und Umfang der Belastungen, die bei realen Sanierungen mit dem Flutungsverfahren für Boden und Grundwasser entstehen können, zu leisten. Die Untersuchungen fanden in Anlehnung an das DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ statt.

Beim Flutungsverfahren dringen die beiden Komponenten verfahrenstechnisch bedingt (Kap. 2) nacheinander durch die Schadstellen des Leitungssystems in die Leitungszone ein und

---

<sup>17</sup> Vgl. Schössner, H., Umweltverträglichkeit, 1996, S. 3. ff.

bilden mit dem umliegenden Boden einen Abdichtungskörper. Bisher wurde angenommen, dass es zu einer gleichmäßigen Ausbreitung der einzelnen Komponenten kommt und sich somit keine unreaktierte Komponente im Boden befindet. Bei den Versuchsreihen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit des Flutungsverfahrens (Kapitel 4) hat sich allerdings gezeigt, dass sich die Reichweiten der beiden Komponenten nicht überdecken. Es bildet sich vielmehr ein Zwei-Zonen-Modell aus.



**Abbildung 5-1: Zwei-Zonen-Modell**

Die Abbildung 5-1 verdeutlicht, dass nur in einem begrenzten Bereich (grüne Färbung, Zone II) die Reaktion der beiden Komponenten stattgefunden hat. Dieser Bereich bildet den festen und abdichtungstechnisch wirksamen Kern des Dichtkörpers. Die Zone I (rote Färbung) stellt die Eindringtiefe der ersten Komponente dar. Ein Teil der ersten Komponente wird demnach nicht für die Abdichtung benötigt und verbleibt ungebunden im Boden. Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen bleibt zu klären, inwieweit sich das Vorhandensein einer unreaktierten Komponente auf die Umweltverträglichkeit auswirkt. Weiterhin wurde die ökologische Unbedenklichkeit der Injektionsmaterialien nur unter der Voraussetzung erteilt, dass es sich *„hierbei nur [um] Kleinstmengen an den defekten Stellen am Kanal“*<sup>18</sup> handelt. Für die Untersuchungen der Umweltverträglichkeit sind jedoch Mischungsverhältnisse und Gesamt mengenverbräuche aus den Erfahrungen der Praxisanwendung zugrunde zu legen.

---

<sup>18</sup> Schössner, H., Umweltverträglichkeit, 1996, S. 4.

## 5.2 Grundlagen der Planung

Die Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit der beim Flutungsverfahren eingesetzten Injektionsmaterialien erforderte zunächst eine Sanierung unter verschiedenen Grundwasser-szenarien. Es wurden insgesamt drei unterschiedliche Fälle betrachtet:

- laufende Umströmung (Sanierung im Grundwasser)
- Beginn der Umströmung 1 bzw. 7 Tage nach Sanierung
- Einlagerung der Abdichtungskörper im Wasser

Zum einen sollte die Sanierung unter laufender Grundwasserströmung simuliert und zum anderen wechselnde Grundwasserstände nach einer Sanierung abgebildet werden. Weiterhin wurde mit Hilfe der Einlagerungsversuche untersucht, welche ökologischen Auswirkungen ein ausgebaute Abdichtungskörper (evt. als Aushubmasse) haben könnte. Anhand der Einlagerungsversuche sollten außerdem Kenntnisse über den unmittelbaren Kontaktbereich Grundwasser und Abdichtungskörper erlangt werden. Hintergrund dieser Versuchsanordnung waren Forderungen des DIBt Merkblattes "Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser". Darin wird bei Produkten, die komponentenweise oder als Gemisch direkt mit dem Boden oder dem Grundwasser in Kontakt kommen, eine Untersuchung sowohl im ausgehärteten Zustand als auch in der Erhärtungsphase gefordert.<sup>19</sup>

In Abbildung 5-2 wird die Versuchsreihe in Form eines Ablaufschemas dargestellt. Zur Ermittlung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe werden die praxisnahen Laborversuche nach Art der Untersuchungsmethode in Umströmungs- und Einlagerungsversuche unterteilt. Zunächst wurden an beiden Versuchsvarianten aquatische Tests vorgenommen. Nach Abschluss der aquatischen Untersuchungen wurden so genannte worst-case-Szenarien ausgewählt, anhand derer dann terrestrische Tests durchgeführt wurden. Abschließend erfolgte die Bewertung hinsichtlich der ökologischen Verträglichkeit des Flutungsverfahrens.

---

<sup>19</sup> Vgl. o.V., DIBt-Merkblatt, 2000, S. 8.

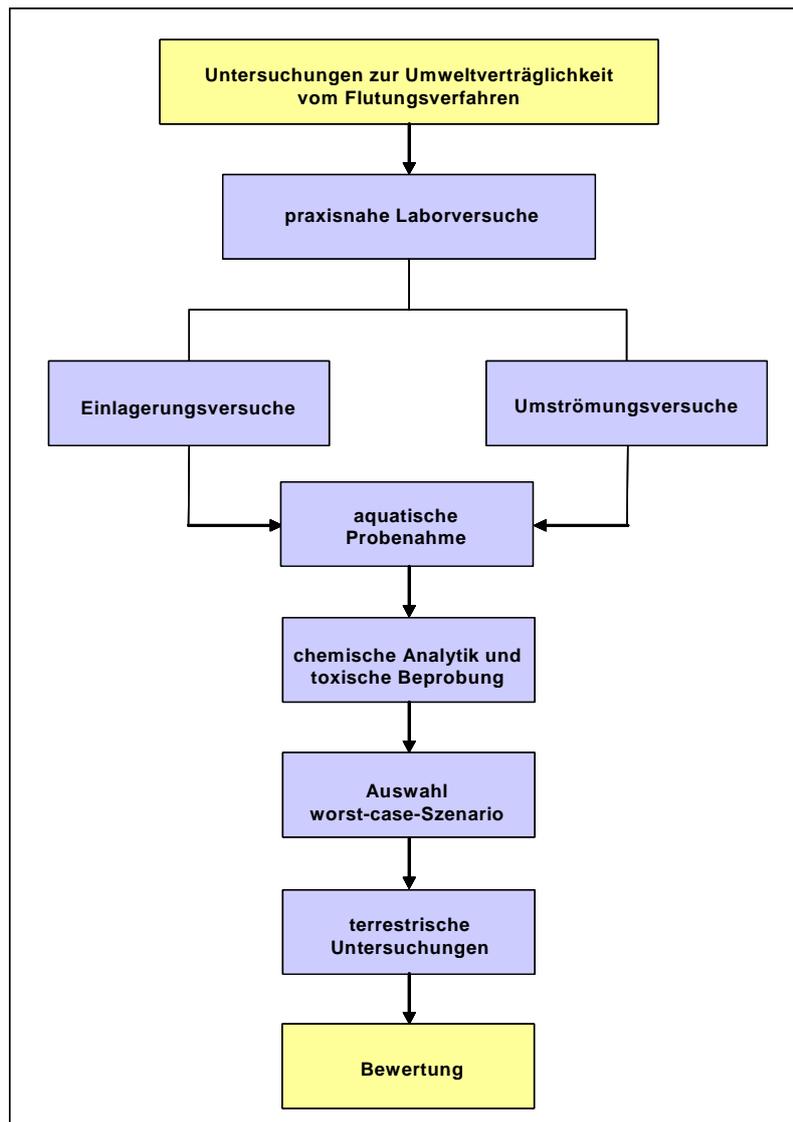


Abbildung 5-2: Planung der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen

Die Leistungen der chemischen Analytik und der toxischen Beprobung wurden vom Institut für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen ausgeführt. Mit den terrestrischen Untersuchungen wurde das Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Schmallenberg beauftragt.

### 5.2.1 Randbedingungen der Sanierung

Ein wesentlicher Einflussfaktor zur Bewertung der Umweltverträglichkeit ist die Gesamtmaterialmenge, die bei der Sanierung in den Leitungszonenbereich injiziert wird. Die Untersuchungen der Basisversuchsreihen (Kap. 4.3) haben einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Materialverbräuchen und den Randbedingungen der Injektion aufgezeigt. Daher ist eine Untersuchung der Umweltverträglichkeit nur unter der gezielten Variation der maßgebenden Randbedingungen zielführend.

### 5.2.1.1 Randbedingungen der Umströmungsversuche

In Anlehnung an die Versuche zur Bestimmung der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit fanden auch die Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit mit den Randbedingungen Injektionsmedium, Rohrleitungssystem und verfahrenstechnische Parameter statt. Da die Erkenntnisse der Untersuchungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit bei den Umweltverträglichkeitsuntersuchungen bereits vorlagen, wurden die Einflussgrößen an die ökologischen Zielvorgaben angepasst.

**Tabelle 5-1: Randbedingungen der Umströmungsversuche**

Sanierungsbedingungen	Einflussgrößen	Varianten		
Randbedingungen des Injektionsmediums	Bodenart	grobkörnig		gemischtkörnig
	Lagerungsdichte	dicht	mitteldicht	locker
	Sonderfall (Umströmungsversuche) „Grundwasserschwankung“	Sanierung im Grundwasser	Grundwasserumströmung 1 Tag nach Sanierung	Grundwasserumströmung 7 Tage nach Sanierung
Randbedingungen des Rohrleitungssystems	Rohrmaterial	PVC (DN 100)		Steinzeug (DN 150)
	Schadensart	Längsriss	Querriss	undichte Muffe
		L/B= 160/3 mm	L/B= 80/3 mm	L= 2 x 80 mm
	Schadensrichtung	oben		unten
Verfahrenstechnische Parameter	Injektionsmaterial	TUBOGEL		STAUBCO
	Materialtemperatur	10° C	18° C	25° C
	Injektionsdruck	0,05 bar		0,20 bar
	Injektionszeit (K1/K2)	45 Min./bis Stillstand		
	Injektionsmittelmenge	Wird während der Versuche erfasst		

#### 5.2.1.1.1 Randbedingungen des Injektionsmediums

Zu den Randbedingungen des Injektionsmediums zählen Bodenart, Lagerungsdichte, sowie Grundwasserverhältnisse und -geschwindigkeit. Bei den Umströmungsversuchen wurden die Einflussgrößen Bodenart und Lagerungsdichte jeweils durch die Standardvarianten „grobkörnig“ und „mitteldicht“ abgebildet.

Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt werden die ökologischen Auswirkungen einer Sanierung mit dem Flutungsverfahren zum einen von dem Mischungsverhältnis der Injektionskompo-

zenten und zum anderen von der Injektionsmittelmenge beeinflusst. Die Beeinflussung der Schutzgüter Grundwasser und Boden hängt außerdem noch von den Wasserverhältnissen im Boden ab. Daher werden in Anlehnung an die Praxis folgende Wasserverhältnisse nachgebildet:

- laufende Umströmung (Sanierung im Grundwasser)
- Beginn der Umströmung 1 Tag nach Sanierung
- Beginn der Umströmung 7 Tage nach Sanierung

In Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Sanierungsmitteln beim Flutungsverfahren wurde eine mittlere Grundwasserabstandsgeschwindigkeit von ca. 5 m/d eingestellt. Damit wurde unter Betrachtung der in Deutschland vorkommenden Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten ein realistischer Mittelwert festgelegt. Die Tabelle 5-2 gibt einen Überblick über die Größe der in der Natur vorhandenen Grundwassergefälle sowie Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten.

**Tabelle 5-2: Durchschnittliche Grundwassergefälle und Abstandsgeschwindigkeiten<sup>20</sup>**

Ort	Gefälle $i$ [v.T.]	Grundwasserabstandsgeschwindigkeit $V_a$ [m/d]
Keupersand bei Nürnberg	3	1,5
Neckartal bei Mannheim	1,7	1,2 - 1,6
Diluvium bei Leipzig	4,5	2,5
Alluvium am Oberrhein	0,6	3 - 7,8
Illerquartier bei Neu-Ulm	2,5	11
Münchener Schotterebene	3,3	10

#### 5.2.1.1.2 Randbedingungen des Rohrleitungssystems

Die Randbedingungen des Rohrleitungssystems umfassen das Rohrmaterial, die Schadensart und die Schadensrichtung.

In den vorangegangenen Versuchsreihen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit wurden als Standardvarianten DN 100 PVC Rohre mit einem nach oben ausgerichteten Längsrisss unter-

<sup>20</sup> Vgl. Mutschmann, J., Stimmelmayer, F., Taschenbuch der Wasserversorgung, 1994, S. 65.

sucht. Diese Randbedingungen wurden für die Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit übernommen, um so im Zweifelsfall mit den Vorgängerversuchen als Referenzgrößen eine höhere Datendichte für eine Fehlerquellenanalyse zu erhalten. Abweichend zu den Wirksamkeits- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen bestand die Schadstelle aus einem nur 80 mm langen und 3 mm breiten Riss. Durch die geringere Schadensgröße war eine exaktere Mengenermittlung der Injektionsmaterialien während der Sanierung gewährleistet. Außerdem konnte bei den Untersuchungen zur Schadensart kein direkter Zusammenhang zwischen der Schadensgröße und dem Abdichtungserfolg nachgewiesen werden (Kapitel 4.3.3.2.2). Der ausgewählte Schaden kann somit als repräsentativ für alle in der Praxis vorkommenden Schäden betrachtet werden.

#### 5.2.1.1.3 Randbedingungen der Verfahrenstechnik

Unter den Randbedingungen der Verfahrenstechnik werden das Injektionsmaterial, die Injektionstemperatur, der Injektionsdruck, die Injektionszeit und die Injektionsmenge zusammengefasst.

Die Sanierungsmaterialien TUBOGEL und SANIPOR weisen ähnliche chemische Eigenschaften auf. Daher wurde nur TUBOGEL als Injektionsmittel ins Versuchsprogramm aufgenommen. Mit den ermittelten Ergebnissen zur Umweltverträglichkeit ist gleichzeitig eine Aussage über das Injektionsmittel SANIPOR möglich. Zusätzlich wurde das Injektionsmittel STAUBCO bei den Versuchen eingesetzt.

Die Injektionsmitteltemperatur wurde mit 18°C im mittleren praxisnahen Anwendungsbereich festgelegt. Die Viskosität der Materialien ist somit ausreichend niedrig, so dass das Eindringvermögen gewährleistet ist (Kap. 4.3.3.3.2).

Die Injektionsdruckhöhe ist beim Flutungsverfahren in den einzelnen Zulassungen durch das Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geregelt. An den undichten Stellen sollte ein hydrostatischer Druck von zwei Metern (0,2 bar) aufgebracht werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass die einzelnen Komponenten der Injektionsmittel 2 m über dem höchsten Punkt des Leitungsnetzes zu befüllen sind. Aufgrund des hohen baustellentechnischen Aufwandes wird bei Sanierungen von Grundstücksentwässerungsleitungen oftmals nur eine Druckhöhe von 0,5 m (0,05 bar) aufgebracht. Die Druckhöhe hat allerdings einen erheblichen Einfluss auf den Materialverbrauch und die Größe der Abdichtungskörper (Kapitel 4.3.3.3.3). Da die ausführenden Unternehmen grundsätzlich an die Einhaltung der bauaufsichtlichen Zulassung gebunden sind, wurden die Umströmungsversuche mit einer Druckhöhe von 2 m (0,2 bar) durchgeführt.

Die Injektionszeit bzw. die Einwirkzeit der einzelnen Komponenten ist ebenfalls vom DIBt in den Zulassungsbescheiden definiert. Hierin wird für beide Verfahren eine Einwirkzeit von 45 min pro Komponente angegeben. Die Erfahrungen der Praxis haben gezeigt, dass neben der Druckhöhe auch die Injektionszeiten nicht immer eingehalten werden können. Die einzige Möglichkeit, eine sinnvolle Mengenregulierung vorzunehmen, besteht entweder durch Variation der Druckhöhe oder durch eine Verkürzung der Einwirkzeiten. In den Umströmungsversuchen wurde allerdings eine inverse Vorgehensweise verfolgt. Injektionsdruck und –zeit wurden vor Versuchsbeginn zu 0,2 bar und 45 min festgelegt. Während der Sanierung wurde der Verbrauch der einzelnen Komponenten im Versuchsprotokoll festgehalten. Nach Durchführung der Versuche konnten die Abdichtungskörper freigelegt werden und dann deren Größe und Gewicht mit den zuvor injizierten Materialmengen verglichen werden. Auf diese Weise sollte eine eventuelle Auswaschung der ersten Komponente nachgewiesen werden (Zwei-Zonen-Modell, Kapitel 5.1.2,) und der Einfluss der Materialmenge auf die Umweltverträglichkeit untersucht werden.

#### **5.2.1.2 Randbedingungen der Einlagerungsversuche**

Als einzige Einflussgröße wurde bei den Einlagerungsversuchen die Lagerungsdichte variiert. Die Erzeugung der Abdichtungskörper erfolgte mit den Lagerungsdichten locker, mitteldicht, dicht. Alle übrigen Randbedingungen wurden durch die Standardvarianten abgebildet.

Ziel der Versuchsreihe war, die Auswaschneigung unterschiedlich großer und poröser Abdichtungskörper zu untersuchen. Die Größe und die Porosität des Abdichtungskörpers hängen bei gleich bleibenden verfahrenstechnischen Randbedingungen nur von der Lagerungsdichte des Leitungszonenbereiches ab. Böden mit geringerer Lagerungsdichte bewirken aufgrund des höheren Porenanteils tendenziell höhere Materialmengenverbräuche und folglich größere Abdichtungskörper.

### **5.3 Untersuchungsprogramm**

Die im Kapitel 5.2.1 vorgenommenen Festlegungen von Standardvarianten und variierenden Einflussgrößen ergeben folgende Versuchsprogramme für die Umströmungsversuche (Tabelle 5-3) und die Einlagerungsversuche (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-3: Untersuchungsmatrix der Umströmungsversuche

Bodenart	Mauersand	Injektionsdruckhöhe	0,2 bar
Verdichtung	mitteldicht	Injektionszeit	K1: 45 min
GW-Geschwindigkeit	ca. 5 m/d		K2: 45 min
Sanierungsmaterial	Bodenfeuchte	Beginn der Umströmung nach Sanierung (in Tagen)	
TUBOGEL	wassergesättigt	laufend	
	erdfeucht	1	
		7	
STAUBCO	wassergesättigt	laufend	
	erdfeucht	1	
		7	

Tabelle 5-4: Untersuchungsmatrix der Einlagerungsversuche

Bodenart	Mauersand	Injektionsdruckhöhe	0,2 bar
Bodenfeuchte	erdfeucht	Injektionszeit	K1: 45 min
			K2: 45 min
Sanierungsmaterial	Verdichtung	Anzahl der Versuche	
TUBOGEL	locker	1	
	mitteldicht	1	
	dicht	1	
STAUBCO	locker	1	
	mitteldicht	1	
	dicht	1	

## 5.4 Versuchsaufbau

### 5.4.1 Umströmungsversuche

Zur in situ nahen Untersuchungsanordnung wurde ein Versuchsstand konzipiert, der die in der Natur auftretenden Wasserverhältnisse ausreichend genau simuliert. Unter dem Gesichtspunkt der Umströmungsbeobachtung wurde eine durchsichtige Ausführungsvariante (Acrylglas) gewählt. Um den unmittelbaren Kontaktbereich zwischen den Injektionskomponenten bzw. dem Abdichtungskörper und dem strömenden Grundwasser in nächster Umgebung detailliert zu erfassen, sollte dieser Bereich im Labormaßstab durch Umströmungsversuche zugänglich gemacht werden. Des Weiteren galt es, den unmittelbaren Nahbereich um die Schadstelle in realitätsnahen Größenordnungen darzustellen. Eine zu kleine Einfassung der Schadstelle hätte eine vollkommene Kontamination des Durchströmungsbereiches bedeutet, so dass die Auswirkung unterschiedlich großer Abdichtungskörper nicht hätte erfasst werden können.

Neben dem Leitungszonenbereich musste auch die Grundwasserströmung labortechnisch simuliert werden. Zu einer Strömung kommt es, wenn im Boden ein Potentialunterschied zwischen zwei Punkten vorliegt, wobei die Strömungsgeschwindigkeit von der Höhe des Potentialunterschiedes und der Durchlässigkeit des Bodens abhängt. Ein Wasserteilchen strömt von dem Punkt mit höherem Potential (Oberwasser) zu dem mit geringerem Potenzial (Unterwasser). Der für eine Strömung notwendige Potentialunterschied wurde durch zwei Wassersäulen rechts und links des Bereichs, in dem das Leitungssystem mit definierter Schadstelle untergebracht war, ermöglicht (Abbildung 5-3).

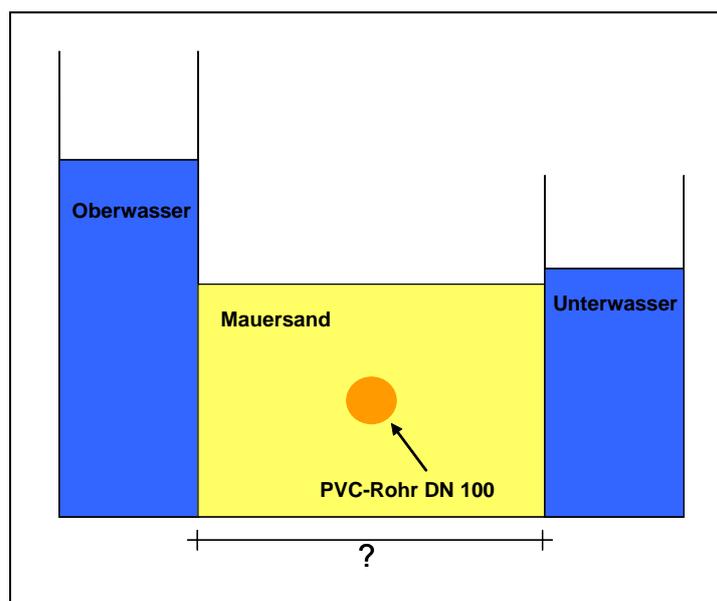


Abbildung 5-3: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

Die Versuchseinrichtung bestand aus drei Rechtecksäulen, die auf einer durchgehenden Acrylglasplatte mit den Maßen (BxHxT) 126x2x63 cm angeordnet waren. Die linke Säule hatte die Maße (BxHxT) 20x150x60 cm. In dieser wurde die Simulation des Oberwassers vorgenommen. An seiner äußeren Wand waren im Abstand von 5 cm Überlauföffnungen angebracht, über die die Einstellung des Potenzialunterschiedes und darüber die der Grundwassergeschwindigkeit vorgenommen wurde. An seiner Innenseite war das Oberwasserbecken mit einem rechteckigen (60x60 cm) Bohrungsraaster in 5 cm Abständen und einem Durchmesser von 2,5 cm versehen. Dieser Bereich wurde mit einem Filtervlies bedeckt, so dass eine Sedimentation des eingebauten Bodens in den Oberwasserbehälter vermeiden wurde.

Im mittleren Teil mit den Abmessungen (BxHxT) 80x60x60 waren das Leitungssystem sowie der eingebaute Boden untergebracht. An der vorderen und hinteren Seite waren zwei, in ihrer Höhenlage leicht versetzte Öffnungen vorhanden. Dadurch war der Einbau des Leitungssystems mit einem Gefälle von ca. 2% gewährleistet.

Der Aufbau der rechten Säule war bis auf die Höhe mit dem der linken Säule identisch. In ihr wurde nach der Durchströmung des Leitungszonenbereiches das Wasser aufgefangen und somit der Unterwasserbereich simuliert.

Die Abbildung 5-4 veranschaulicht die fertige Versuchseinrichtung samt Fahrgestell.



**Abbildung 5-4: Versuchseinrichtung, Umströmungsversuch**

### 5.4.2 Einlagerungsversuche

Die Erzeugung der Abdichtungskörper für die Einlagerungsversuche fand in Anlehnung an die Basisversuchsreihen statt (Kapitel 4.3.2.1). Für die spätere Einlagerung der Abdichtungskörper wurden Rechteckbehälter aus Glas verwendet (Abbildung 5-5).



Abbildung 5-5: Einlagerung der Probekörper

## 5.5 Versuchsdurchführung

### 5.5.1 Umströmungsversuche

Zur besseren Visualisierung der Umströmungsversuche werden im Folgenden die Abläufe schematisiert dargestellt (Abbildung 5-6). Die Umströmungsversuche setzten sich aus folgenden Phasen zusammen:

- Vorbereitungsphase (gelb),
- Sanierungs- bzw. Beprobungsphase (blau)
- Nachbereitungsphase (orange)

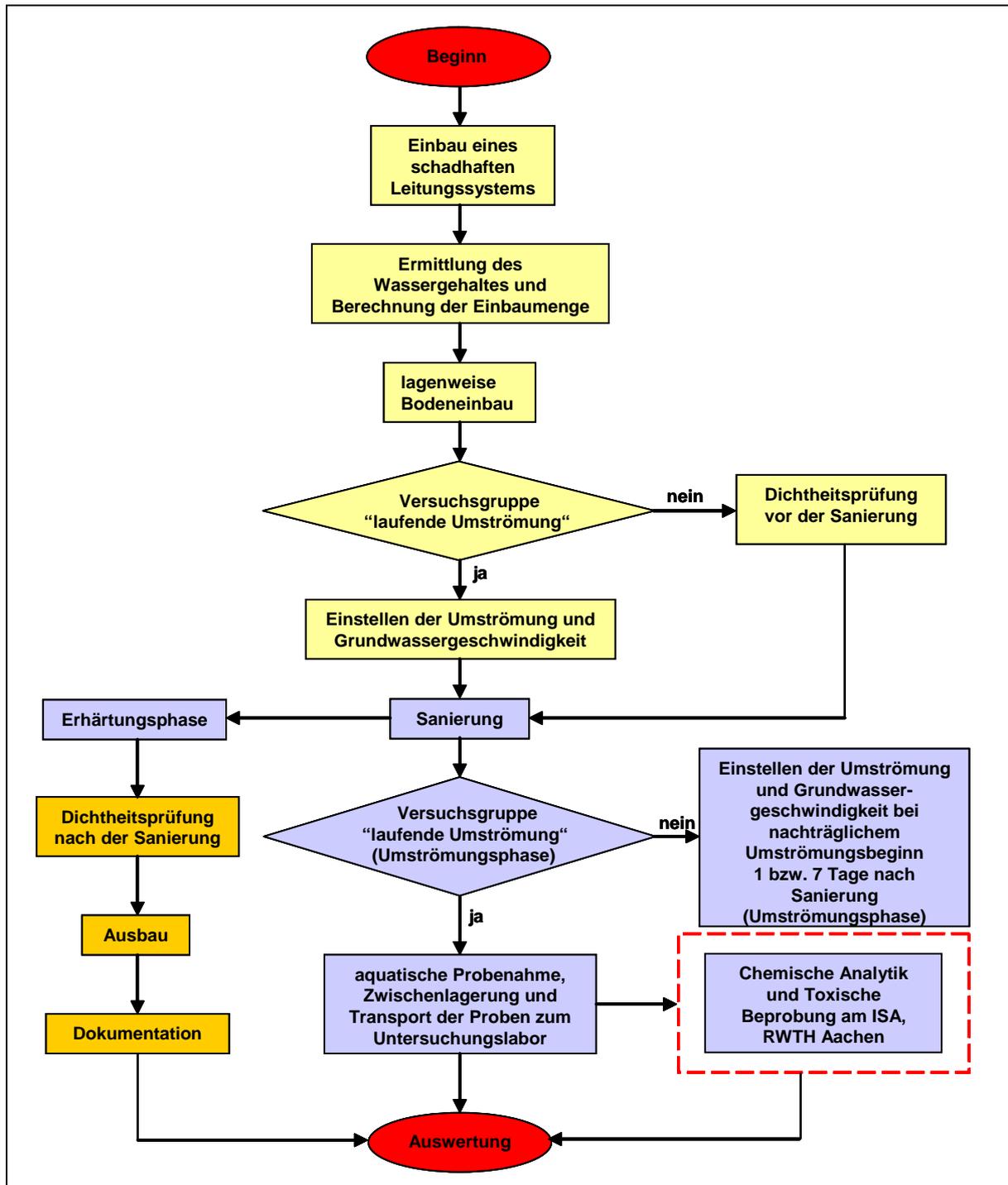
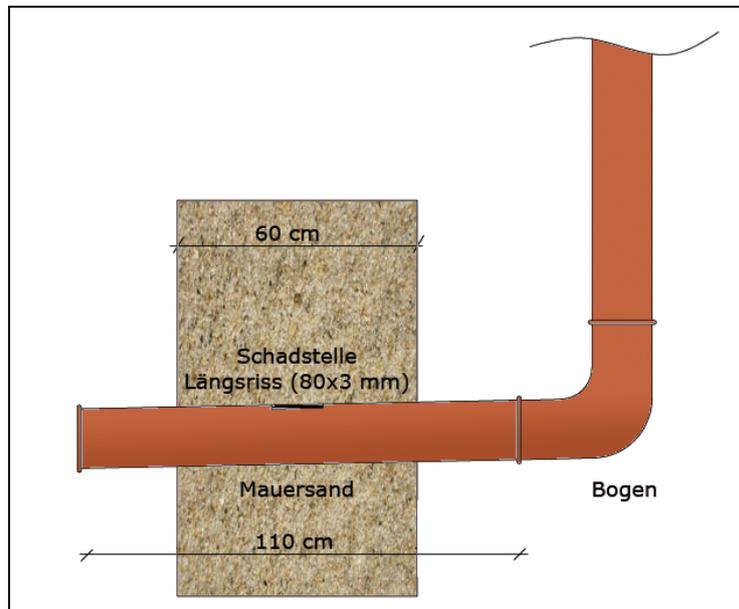


Abbildung 5-6: Ablaufplan Umströmungsversuche

Nachfolgend werden die einzelnen Ablaufschritte der Umströmungsversuche detaillierter vorgestellt.

### Einbau des Leitungssystems:

Das Leitungssystem, das dieser Versuchsreihe zu Grunde lag, bestand aus einem ca. 110 cm langen horizontalem Rohrelement PVC DN 100 mit einer definierten Schadstelle von 80x3 mm und einem dazu senkrecht stehenden Rohrelement. Der vertikale Teil des L-förmigen Rohrleitungssystems dient der Aufbringung der erforderlichen Druckhöhe von 2 m während der Sanierung (Abbildung 5-7).



**Abbildung 5-7: Leitungssystem im Umströmungsversuch**

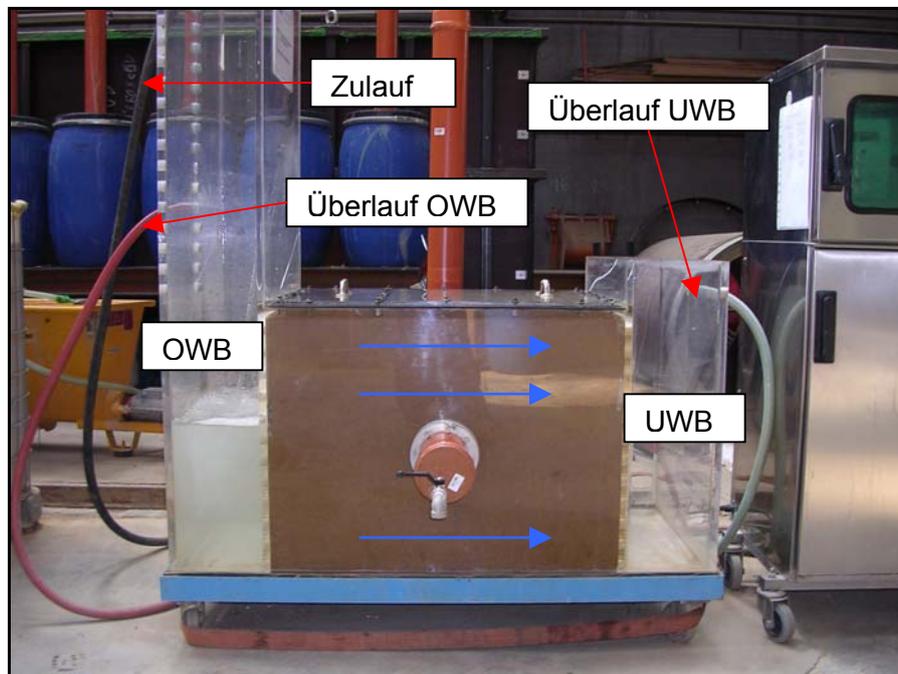
### Bodeneinbau:

Der vorgegebene mittlere Verdichtungsgrad des Versuchsbodens wurde durch die Berechnung der Einbaumenge sowie durch eine homogene lagenweise Verdichtung gewährleistet. Die Verdichtung des Bodens erfolgte über einen Handstampfer. Der Boden wurde nach jedem Versuch komplett aus dem Versuchsstand ausgebaut und durch einen „frischen“ Boden ersetzt.

### Einstellung der Umströmung und Grundwassergeschwindigkeit:

Vor der Sanierung wurde zunächst eine Umströmung des eingebauten Bodenpakets durchgeführt. Ziel dieser Umströmungsphase war zum einen die Einstellung der erwünschten Grundwassergeschwindigkeit und zum anderen eine „Reinigung“ des Bodens. Da der Versuchsboden bis zum Einbau im Freien lagerte, war durch Regen und andere Witterungseinflüsse eine Beeinflussung der Bodeneigenschaften nicht auszuschließen. Damit jeglicher Einfluss bei der späteren Aufzeichnung des pH-Werts und der Leitfähigkeit auf die eingesetzten Sanierungsmaterialien zurückführbar war, wurde der Boden durch eine vorlaufende Durchströmung gereinigt.

Nach Einbau des Bodens wurde der Oberwasserbehälter (OWB) über einen Schlauch kontinuierlich mit Leitungswasser befüllt. Mit zunehmender Druckhöhe begann das Wasser von links nach rechts, also vom OWB zum Unterwasserbehälter (UWB) zu strömen. Der UWB war zu diesem Zeitpunkt noch leer (Abbildung 5-8).



**Abbildung 5-8: Umströmungsbeginn**

Nachdem das Wasser im OWB das Sollniveau, d.h. die benötigte Druckhöhe erreicht hatte, lief das Wasser über einen Überlauf ab, und die Druckhöhe blieb konstant. Mit zunehmendem Wasserdurchsatz begann nun der Wasserpegel im UWB zu steigen und nähert sich dem Überlauf des UWB.

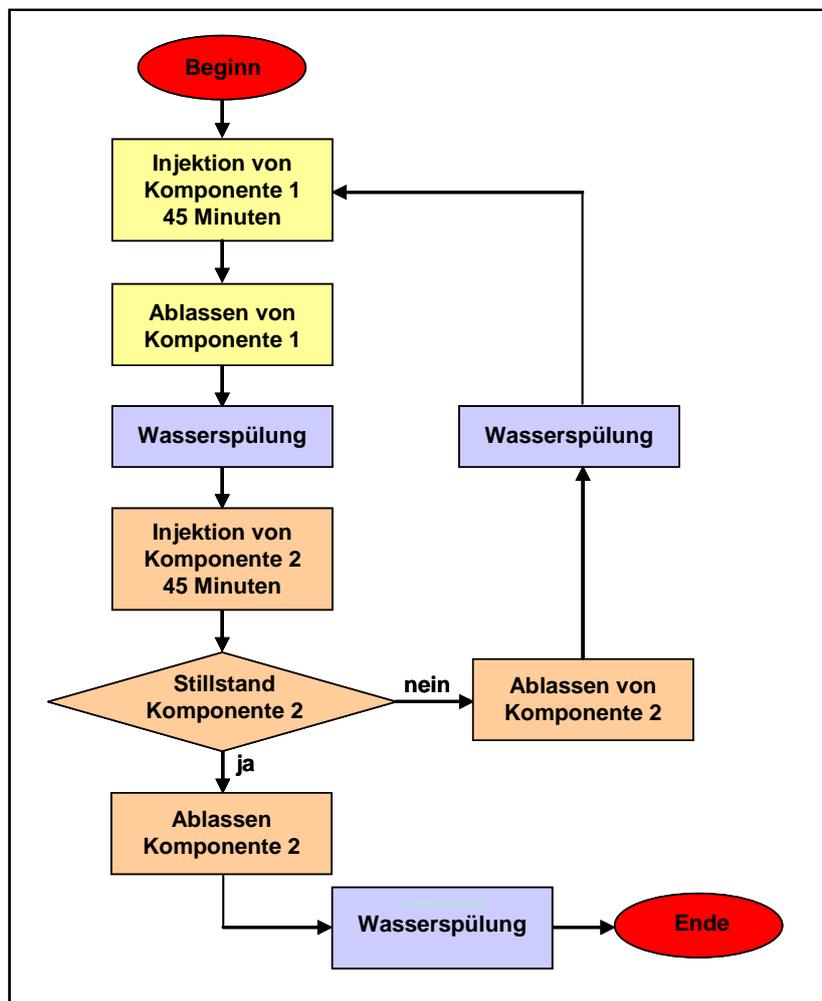
Der Höhenunterschied zwischen den beiden Wassersäulen im OWB und UWB zur Festlegung der Grundwassergeschwindigkeit berechnete sich aus den Bodenkennwerten zu 16,4 cm. Die Berechnungen wurden anhand von Durchflussmengenmessungen bestätigt.

#### Dichtheitsprüfung vor der Sanierung:

In Anlehnung an DIN 1986-30 wurde der eingebaute Leitungsabschnitt einer Dichtheitsprüfung mit Wasser unterzogen. Der Prüfdruck betrug 0,05 bar und die Prüfzeit 15 Minuten. Der Wasserspiegel war durch kontinuierliche Zugabe von Wasser möglichst konstant zu halten. Die vorausgehende Wasserdruckprüfung wurde nur bei den Versuchsgruppen mit nachträglichem Umströmungsbeginn durchgeführt.

Sanierung des schadhaften Leitungsabschnittes:

Der Sanierungsvorgang ist in der Abbildung 5-9 in Form eines Flussdiagramms dargestellt.



**Abbildung 5-9: Ablauf einer Sanierung**

Zunächst wurde der Rohrleitungsabschnitt über das vertikale Leitungselement mit der ersten Komponente bis zur Markierung (0,2 bar) befüllt. Innerhalb von 45 Minuten wurde durch Zugabe von zusätzlichem Injektionsmaterial der Injektionsdruck aufrechterhalten. Die Zugabe erfolgte je nach Intensität des Flüssigkeitsverlustes innerhalb eines Intervalls von 1-5 Minuten. Die Injektion der zweiten Komponente erfolgte analog zu der ersten. Die Sanierung wurde als "erfolgreich" eingestuft, wenn innerhalb einer Dauer von 15 Minuten nach 45-minütiger Injektionsdauer bei der zweiten Komponente kein Absinken der Druckhöhe verzeichnet wurde. Kam die zweite Komponente nicht zum Stillstand, so wurde ein weiterer Zyklus analog zum ersten durchgeführt.

Erfassen und Aufzeichnen von pH-Wert und Leitfähigkeit:

Während der Umströmungsphase wurden mit dem Messgerät Multi 350i der Fa. WTW GmbH der pH-Wert, die Leitfähigkeit sowie die Temperatur im UWB online erfasst und aufgezeichnet, um die Veränderungen der Wassereigenschaft zeitnah zu erfassen. Der Messbeginn sowie das Messintervall und die Dauer der Messungen sind in der Tabelle 5-5 dargestellt. An den ersten drei Tagen erfolgte die Aufzeichnung alle 10 Minuten, danach wurde das Intervall auf 15 Minuten erhöht.

**Tabelle 5-5: Intervalle der pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessung**

<b>Versuchsgruppe "laufende Umströmung"</b>		
<b>Tag nach Sanierung der Schadstelle</b>	<b>Messwert</b>	<b>Messintervall</b>
0	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
1	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
2	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
3 bis 7	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 15 Minuten
<b>Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 1 Tag nach Sanierung"</b>		
1	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
2	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
3	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
4 bis 8	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 15 Minuten
<b>Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 7 Tage nach Sanierung"</b>		
7	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
8	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
9	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 10 Minuten
10 bis 14	pH-Wert und Leitfähigkeit	alle 15 Minuten

Probenahme und Zwischenlagerung der Proben:

Die Probenahmen erfolgten mit Hilfe eines automatischen Probennehmers des Typs MAXX SP der Firma MAXX Mess- und Probenahmetechnik GmbH (Abbildung 5-10). Die Proben wurden direkt aus dem Unterwasserbehälter des Versuchsaufbaus entnommen. Das Gerät entnahm alle drei Minuten über die eingebaute Pumpe eine Probe von ca. 150 ml. Die Probe wurde automatisch in die vorgesehenen Behälter umgefüllt und gekühlt zwischengelagert.

Da die beim Flutungsverfahren eingesetzten Injektionsmaterialien eine höhere Dichte als Wasser haben und somit beim Eintreffen in den Unterwasserbehälter zu Boden sinken würden, wurde der UWB mittels einer Pumpe ständig umgewälzt.



**Abbildung 5-10: Versuchsaufbau und automatischer Probenehmer**

Eine Übersicht über den Beprobungsintervall sowie -umfang gibt die nachfolgende Tabelle 5-6.

**Tabelle 5-6: Beprobungsintervall und -umfang**

<b>Versuchsgruppe "laufende Umströmung"</b>		
<b>Tag nach Sanierung der Schadstelle</b>	<b>Probenart</b>	<b>Probenanzahl und -menge</b>
0	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
1	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
2	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
<b>Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 1 Tag nach Sanierung"</b>		
1	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
2	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
3	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
<b>Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 7 Tage nach Sanierung"</b>		
7	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
8	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter
9	2-Stundenmischprobe	12 je 5 liter

### Erhärtungsphase:

An die Injektionsvorgänge schloss sich der Erhärtungszeitraum an, der in Abhängigkeit des simulierten Grundwasserszenarios zwischen 7 und 14 Tage betrug.

### Dichtheitsprüfung nach der Sanierung:

Die Dichtheitsprüfung nach der Sanierung diente zum Nachweis der erfolgreichen Abdichtung der Schadstelle. Die Durchführung der Prüfung entsprach der Dichtheitsprüfung vor der Sanierung.

## 5.5.2 Einlagerungsversuche

Das Ablaufschema der Einlagerungsversuche wird in Form eines Flussdiagramms in Abbildung 5-11 dargestellt. Der Versuchsablauf lässt sich ebenfalls in drei Phasen unterteilen:

- Vorbereitungs- bzw. Sanierungsphase (gelb)
- Einlagerungs- bzw. Messphase (blau)
- Untersuchungsphase (hellgrün)

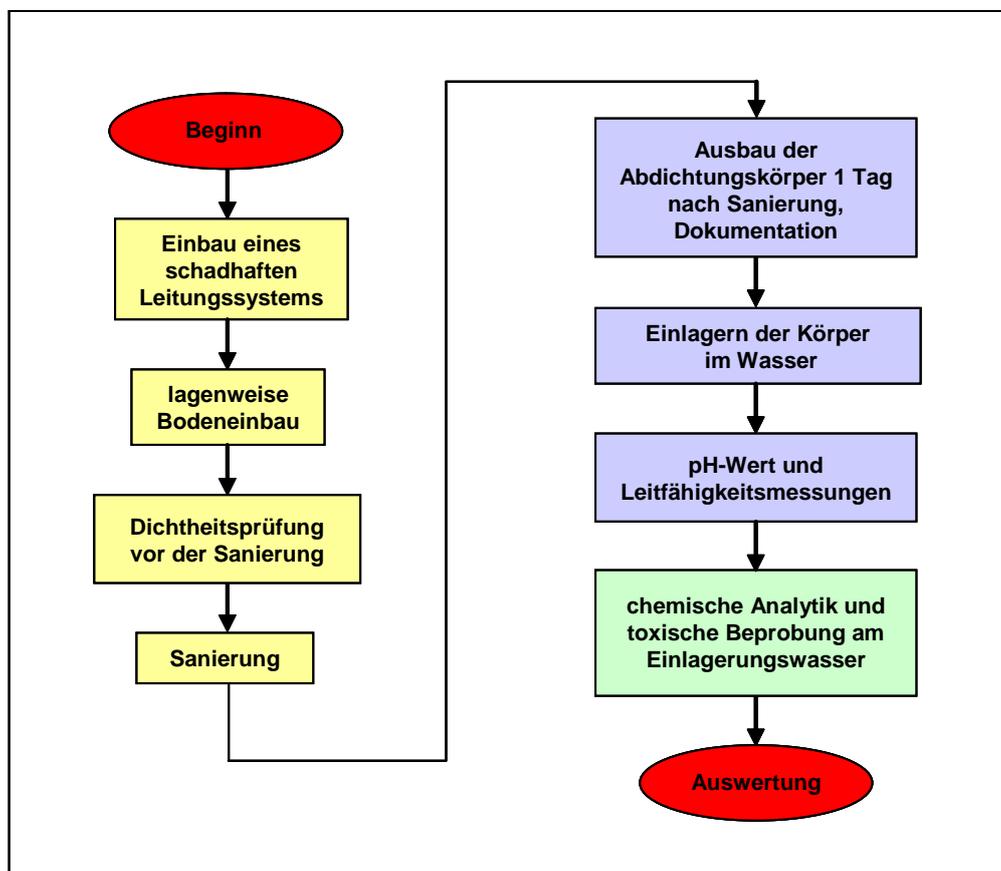


Abbildung 5-11: Ablaufplan Einlagerungsversuche

Der verfahrenstechnische Ablauf der Einlagerungsversuche ist mit den Abläufen der Basisversuche (Kapitel 4.3.2.3) identisch und wird daher nicht im Detail beschrieben.

## 5.6 Darstellung und Analyse der Ergebnisse

### 5.6.1 Sanierungsergebnisse

Zur besseren Beurteilung der aquatischen Toxizitätsuntersuchungen wird in Tabelle 5-7 zunächst eine Zusammenstellung der relevanten Sanierungsdaten vorgenommen.

**Tabelle 5-7: Zusammenstellung der Sanierungsdaten (Umströmungsversuche)**

Versuchsgruppe "laufende Umströmung"						
Sanierungsmaterial	Injektionsmenge [ml]		Zyklenzahl	Abdichtungserfolg	Gewicht der Abdichtungskörper [kg]	
	K1	K2			Zone I + II	Zone II
STAUBCO	552,5	160	3	dicht	1,55	1,34
TUBOGEL	340	32,5	2	dicht	1,16	0,87

Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 1 Tag nach Sanierung"						
Sanierungsmaterial	Injektionsmenge [ml]		Zyklenzahl	Abdichtungserfolg	Gewicht der Abdichtungskörper [kg]	
	K1	K2			Zone I + II	Zone II
STAUBCO	5010	1750	2	dicht	10,35	8,75
TUBOGEL	1230	115	1	dicht	2,12	1,73

Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 7 Tage nach Sanierung"						
Sanierungsmaterial	Injektionsmenge [ml]		Zyklenzahl	Abdichtungserfolg	Gewicht der Abdichtungskörper [kg]	
	K1	K2			Zone I + II	Zone II
STAUBCO	777,5	190	2	dicht	2,18	1,67
TUBOGEL	425	50	1	dicht	1,28	1,05

Alle Sanierungen haben unabhängig von der Grundwassersimulation zum Abdichtungserfolg geführt. Eine Verschiebung der Abdichtungskörper infolge der Grundwasserströmung konnte beim Ausbau der Probekörper nicht festgestellt werden.

Bei allen Versuchen wurde der Boden auf die gleiche Art und Weise eingebracht. Demnach wurde in der Versuchsgruppe "Umströmungsbeginn 1 Tag nach der Sanierung" erheblich mehr Injektionsmaterial benötigt als in den anderen beiden Versuchsgruppen. Dies ist wahrscheinlich auf eine unbeabsichtigte Abweichung beim Einbau und Verdichten des Bodens zurückzuführen. Eine Kanalbildung infolge eines Bodenrisses kann zur Erklärung der hohen Materialverbräuche nur teilweise herangezogen werden, da sich beim unkontrollierten Abfließen des Injektionsmaterials kein homogener Abdichtungskörper mit extremen Abmessungen

gen ausgebildet hätte. Die nachträgliche Umströmung des Abdichtungskörpers wurde trotz der abweichenden Lagerungsrandbedingungen vorgenommen, um so eine mögliche Beeinträchtigung der Umwelt infolge sehr hohen Materialverbrauches nachweisen zu können.

Bei allen Versuchsgruppen ist eine Diskrepanz zwischen injizierter Materialmenge und Größe des Abdichtungskörpers festzustellen. Da das Porenvolumen mit ca. 30% durch die mitteldichte Lagerung vorgegeben war, hätte sich bei der Injektion von einem Liter Sanierungsmaterial ein Abdichtungskörper von ca. 3 Litern ergeben müssen. Dieser hätte bei einer angenommenen mittleren Dichte von  $2 \text{ kg/m}^3$  ein Gewicht von ca. 6 kg besessen, so dass sich ein Verhältnis von 1 zu 6 zwischen injizierter Menge und dem Gewicht des Abdichtungskörpers ergeben hätte. Das reale Verhältnis von injizierter Materialmenge zum Gesamtgewicht der Abdichtungskörper (Zone I + II) beträgt jedoch im Mittel nur 1 zu 2,2. Dieser Umstand lässt eine Mobilisierung der Abdichtungskörperbestandteile durch das Grundwasser vermuten.

Die Abdichtungskörper für die Einlagerungsversuche wurden 1 Tag nach der Sanierung wieder ausgebaut. Die nachfolgende Tabelle 5-8 gibt einen Überblick über Injektionsmenge sowie die benötigte Anzahl der Zyklen.

**Tabelle 5-8: Zusammenstellung der Sanierungsdaten (Einlagerungsversuche)**

<b>Einlagerungsversuche</b>			
<b><i>Staubco</i></b>			
<b>Verdichtungsgrad</b>	<b>Injektionsmittelmenge [ml]</b>		<b>Zykluszahl</b>
	<b>K1</b>	<b>K2</b>	
hoch	1330	80	1
mittel	4370	1290	2
niedrig	5340	1270	2
<b><i>Tubogel</i></b>			
<b>Verdichtungsgrad</b>	<b>Injektionsmittelmenge [ml]</b>		<b>Zykluszahl</b>
	<b>K1</b>	<b>K2</b>	
hoch	100	50	1
mittel	270	10	2
niedrig	740	70	1

Bei den Einlagerungsversuchen konnte eine deutliche Abhängigkeit von Injektionsmittelverbrauch und Verdichtungsgrad nachgewiesen werden. Weiterhin zeigt sich eine höhere Eindringneigung des STAUBCO - Materials im Vergleich zum TUBOGEL - Injektionsmittel. Dies ist auf die geringere Viskosität der STAUBCO - Sanierungsmaterialien zurückzuführen (Kap. 4.3.3.3.1).

## 5.6.2 Ergebnisse der aquatischen Untersuchungen

### 5.6.2.1 Umströmungsversuche

Die aquatischen Untersuchungen der Umströmungsversuche werden auf der Grundlage von direkt erfassten Daten (pH-Wert, Leitfähigkeit) und den im Nachgang erhaltenen Daten aus den 2-Stunden-UWB-Proben (Geruch, Färbung, Trübung, Neigung zur Schaumbildung, TOC-Gehalt, Natriumgehalt, Calciumgehalt) analysiert. Nach der Auswertung der TOC-Konzentrationsverläufe wurden eine  $TOC_{max}$ -Phase und eine  $TOC_{Abkling}$ -Phase für jeden der 6 Versuche definiert. Diese 2-Stunden-Eluate ausgewählter TOC-Phasen wurden den biologischen Tests Daphnientest, Leuchtbakterientest, Zellvermehrungshemmtest und dem Algenwachstumshemmtest unterzogen.

Die so gewonnenen Versuchsdaten werden nach einem Untersuchungsprogramm zur ökologischen Auswirkungen von Sanierungen mit dem Flutungsverfahren in Anlehnung an das DIBt-Merkblatt beurteilt. Darin wird das Bewertungskonzept in zwei Stufen unterteilt. Die erste Stufe beinhaltet die quantitative Ermittlung aller relevanten Inhaltsstoffe des zu bewertenden Bauprodukts. In der zweiten Stufe wird die Ermittlung und Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe gefordert. Die Ermittlung und Bewertung der zweiten Stufe umfasst wiederum drei Schritte:

- die allgemeinen Parameter (Schritt 1)
- die stofflichen Parameter (Schritt 2)
- die biologischen Parameter (Schritt 3)

Das Ablaufschema des DIBt für diese stufenweise Bewertung von Bauprodukten ist der folgenden Abbildung 5-12 zu entnehmen.

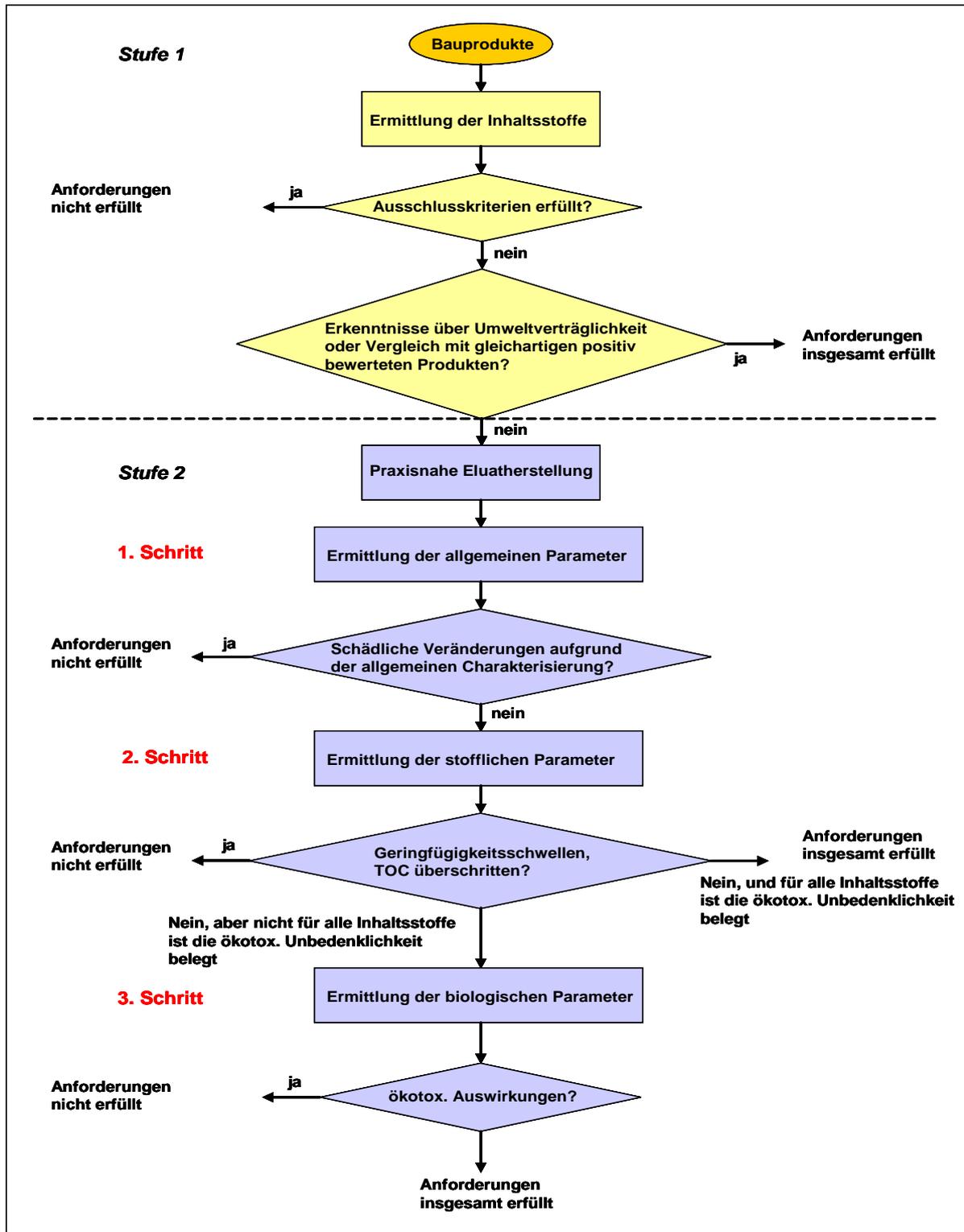


Abbildung 5-12: Ablaufschema DIBt Merkblatt<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Vgl. DIBt-Merkblatt, 2000, S. 19.

Die im Rahmen der Versuchsreihen ermittelten Daten sowie Wasser- und Bodenproben wurden nach dem oben beschriebenen Procedere analysiert und bewertet.

#### Ermittlung der Inhaltsstoffe:

Im Allgemeinen erfolgt im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulassungen von Bauprodukten die Ermittlung der Inhaltsstoffe über die dem DIBt offen zu legende Rezeptur des Bauproduktes. Da die in der Untersuchungsreihe eingesetzten Materialien bereits über eine bauaufsichtliche Zulassung verfügen, konnte von der Unbedenklichkeit der Inhaltsstoffe ausgegangen werden.

#### Allgemeine Parameter.

Die allgemeinen Parameter zur Bewertung von Bauprodukten werden durch folgende, genormte, physikochemische Parameter des Eluats charakterisiert:

- pH-Wert (DIN 38404-5)
- elektrische Leitfähigkeit (DIN EN 27888)
- Geruch (DIN EN 1622)
- Färbung (DIN EN ISO 7887)
- Trübung (DIN EN ISO 27027)
- Neigung zur Schaumbildung (zu beschreiben)

#### Stoffliche Parameter:

Nach der Untersuchung der allgemeinen Parameter wird im zweiten Schritt die Bewertung der stofflichen Parameter gefordert. Oben angeführte Kriterien des DIBt's setzen die Bestimmung des TOC-Gehaltes einer Probe fest.<sup>22</sup> Die Summe des organisch gebundenen Kohlenstoffgehaltes wird über den Summenparameter „Total Organic Carbon“ (TOC) erfasst. Der TOC-Wert erfasst im Gegensatz zum BSB-Wert (Biochemischer Sauerstoffbedarf) vollständig alle abbaubaren, biologisch schwer und nicht abbaubaren Verbindungen, die für die Beurteilung der Belastung von Wasser und Gewässern wichtig sind.<sup>23</sup> Weiterhin wird an jeder Probe der Natrium- und der Calciumgehalt ermittelt. Die Ermittlung des Natriumgehaltes konnte als Indikator für die Auswaschneigung der 1. Komponente angesetzt werden. Anhand des Calciumgehaltes sollte eine eventuelle Mobilisierung der zweiten Komponente nachgewiesen werden.

---

<sup>22</sup> Vgl. DIBT-Merkblatt, Entwurf 2005, Teil II Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte "Kanalsanierungsmittel", S. 6.

Biologische Parameter:

Im dritten Schritt der Stufe zwei werden für die Bewertung von Bauprodukten folgende genormte Wirkungstests gefordert:

- Daphnientest (DIN 38412-30)
- Leuchtbakterientest (DIN EN ISO 11348-1 bis -3)
- Zellvermehrungshemmtest (DIN 38412-37)
- Algenwachstumshemmtest (DIN 38412-33)

Zusätzlich muss der aerobe biologische Abbau ermittelt werden. Bei TOC-Gehalten kleiner 50 mg/l muss der biologische Abbau nicht nachgewiesen werden.

Die Wirkungsparameter umfassen akut toxische (z.B. Tod, Leuchthemmung), chronische (z.B. Wachstumsbehinderung) und gentoxische (z.B. Mutationen) Effekte. Biotestverfahren können Hinweise auf Mobilisierbarkeit und Bioverfügbarkeit von Schadstoffen geben. Allerdings machen Biotestverfahren alleine eine allgemeintoxikologische Aussage über konkrete Gefährdungen von Schutzgütern nicht möglich. Die Testergebnisse sind vielmehr als Indikatoren für mögliche Umweltgefährdungen zu werten.<sup>24</sup>

Das Ergebnis der Untersuchungen wird in Form von G-Werten angegeben. Die Bestimmung des G-Wertes ist die DIN-gemäße Bestimmung der Toxizität einer Probe. Der G-Wert bezeichnet eine definierte Verdünnungsstufe einer Probe bzw., wie viel Verdünnungswasser pro Volumenanteil der Probe zugegeben werden muss, um eine festgelegte Toxizitätsschwelle nicht zu überschreiten.

Im Folgenden wird beispielhaft aus der Versuchsgruppe „Umströmungsbeginn 1 Tag nach der Sanierung“ die STAUBCO Sanierung dem zuvor beschriebenen Untersuchungsprogramm unterzogen. Für die Analyse der anderen Versuchsreihen wird auf den im Anhang beigefügten Bericht des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft verwiesen.

Um die Ergebnisse mit einer Ausgangsbasis vergleichen zu können, wurde vor Beginn der Versuche ein Referenzversuch durchgeführt. Hierzu erfolgte zunächst die Bestimmung aller physikochemischen Parameter des Ausgangswassers. Anschließend wurde ein Umströmungsversuch über 9 Tage ohne jegliche Einwirkungen, d.h. weder eine Wasserdichtheits-

---

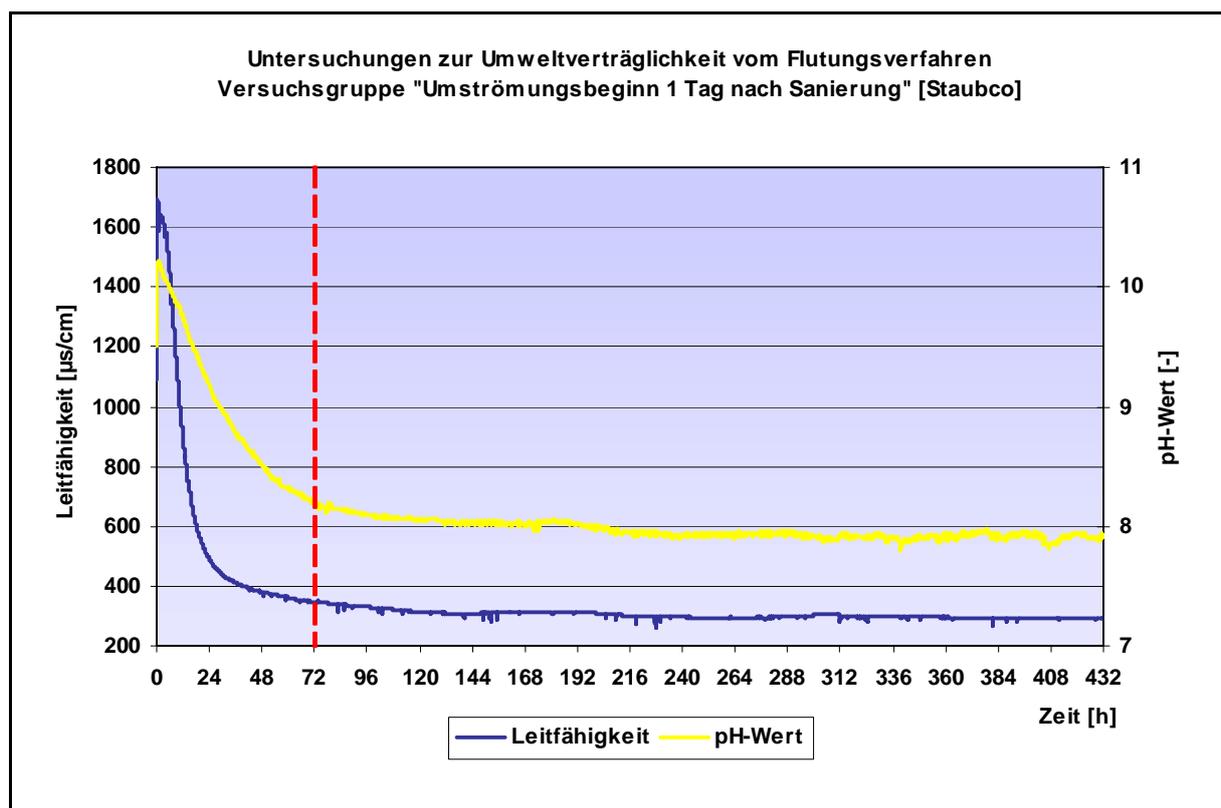
<sup>23</sup> Vgl. Cammann, K., Instrumentelle Analytische Chemie, 2001, S. 10ff.

<sup>24</sup> Vgl. Eisenträger, A., Ökotoxizität, 2002, S. 1.

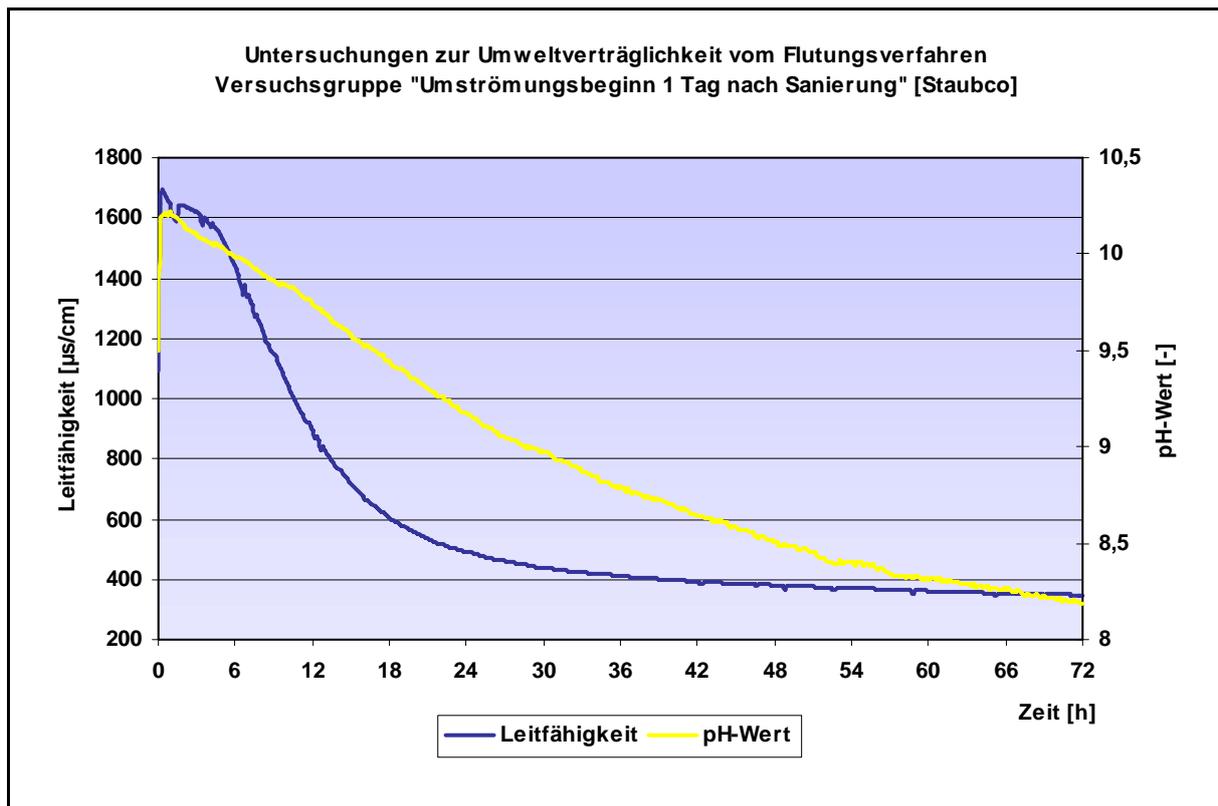
prüfung noch eine Sanierung vorgenommen. Die Daten des Referenzversuchs werden an entsprechenden Stellen erwähnt.

### Stufe 2, 1. Schritt: Ermittlung der allgemeine Parameter:

Nach einer Ruhephase von 24 Stunden wurde mit dem Umströmen des eingebauten Bodens und des mit STAUBCO sanierten Leitungssystems begonnen. Die mittlere Grundwasserabstandsgeschwindigkeit betrug hierbei ca. 5,2 m/d. Nachdem das Wasser im UWB eine Höhe von ca. 30 cm erreicht hatte, wurden die Sonden des pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessgerätes eingetaucht und die Messung gestartet. Die letzten Messwerte der beiden Parameter, die während der Reinigungsphase des Bodens aufgezeichnet wurden, dienten als Ausgangswerte für die Versuchsdurchführung. Die nachfolgende Abbildung 5-13 stellt die Verläufe der beiden Messparameter über einen Zeitraum von 432 Stunden (18 Tage) dar. Zur besseren Visualisierung der Messergebnisse sind die ersten 72 Stunden (3Tage) in der Abbildung 5-14 abgebildet.



**Abbildung 5-13: pH-Wert- und Leitfähigkeitsverlauf**



**Abbildung 5-14: pH-Wert und Leitfähigkeitsverlauf [72 Stunden-Ausschnitt]**

Anhand der Abbildungen ist zu erkennen, dass mit Einsetzen der Messsonden die Verläufe einen plötzlichen Anstieg erfahren. Innerhalb einer Messdauer von 30 Minuten erreichen beide Messparameter ihre Maximalwerte. Der pH-Wert wird mit 10,22 und die Leitfähigkeit mit 1695  $\mu\text{s}/\text{cm}$  angezeigt. Der Ausgangs-pH-Wert betrug hier 7,91 und die Ausgangsleitfähigkeit 280  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Bis zur 5. Stunde nach Messbeginn verweilen beide Parameter auf einem relativ konstanten Niveau. Der pH-Wert pendelt zwischen 10,03 und 10,22. Die Leitfähigkeitswerte schwanken zwischen 1530 und 1695  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Anschließend erfolgt bei beiden Messparametern ein deutlicher Rückgang. Der pH-Wert erfährt bis zur Stunde 120 einen Rückgang, der abschnittsweise durch einen linearen oder logarithmischen Abfall gekennzeichnet ist. Hierbei wird ein Wert von 8,05 erreicht, der mit leichten Schwankungen bis zum Ende beibehalten wird. Der pH-Wert nach 432 Stunden wird mit 7,91 angegeben. Dieser Wert entspricht in etwa dem pH-Wert des Frischwassers (8,1). Die Leitfähigkeitswerte erfahren dabei einen logarithmischen Abfall bis zur Stunde 120 auf einen Wert von 310  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , der mit leichten Schwankungen bis zum Versuchsende erhalten bleibt. Nach 432 Stunden beträgt die Leitfähigkeit des Wassers im UWB 292  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Dieser Wert entspricht in etwa der Leitfähigkeit des Frischwassers (287  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ).

Die plötzlich ansteigenden Werte für den pH-Wert und die Leitfähigkeit sind eindeutig auf die Sanierungsmaßnahme zurückzuführen. Die Zunahme des pH-Wertes beruht auf dem Zu-

sammentreffen von umströmendem Wasser und der stark alkalischen ersten Komponente. Durch das Zusammentreffen von Wasser und Komponente 1 werden die in der ersten Komponente (Natronwasserglaslösung) befindlichen NaOH-Ionen (Natriumhydroxid = Natronlauge) im Wasser gelöst und abtransportiert. Das Auflösen der NaOH-Ionen bewirkt eine Zunahme an OH<sup>-</sup>-Ionen im Wasser. Dadurch wird das Gleichgewicht an H<sup>+</sup>- und OH<sup>-</sup>-Ionen im Wasser verändert und eine Verschiebung ins alkalische Milieu bewirkt. Die Leitfähigkeit wird ebenfalls von der dissoziierten Natronlauge beeinflusst. Durch den Kontakt des Frischwassers mit den Bestandteilen der ersten Komponente wird der Ionengehalt vergrößert und dadurch eine Erhöhung der Leitfähigkeit bewirkt. Mit nachfließendem Frischwasser verringert sich offenbar die Auswaschneigung des Abdichtungskörpers und die Konzentration im UWB erreicht das Niveau des eingeleiteten Frischwassers.

Neben dem pH-Wert und der Leitfähigkeit wurden unter den allgemeinen Parametern auch Geruch, Färbung, Trübung sowie Neigung zur Schaumbildung untersucht (Tabelle 5-9).

**Tabelle 5-9: physikochemische Parameter**

<b>STAUBCO</b>	<b>Geruch [-]</b>	<b>Färbung [-]</b>	<b>Trübung [FAU]</b>	<b>Neigung zur Schaumbildung</b>
<b>Oberwasser</b>	ohne	farblos	< 1	keine
<b>Maximalphase</b>	ohne	farblos	99	keine
<b>Abklingphase</b>	ohne	farblos	5	keine

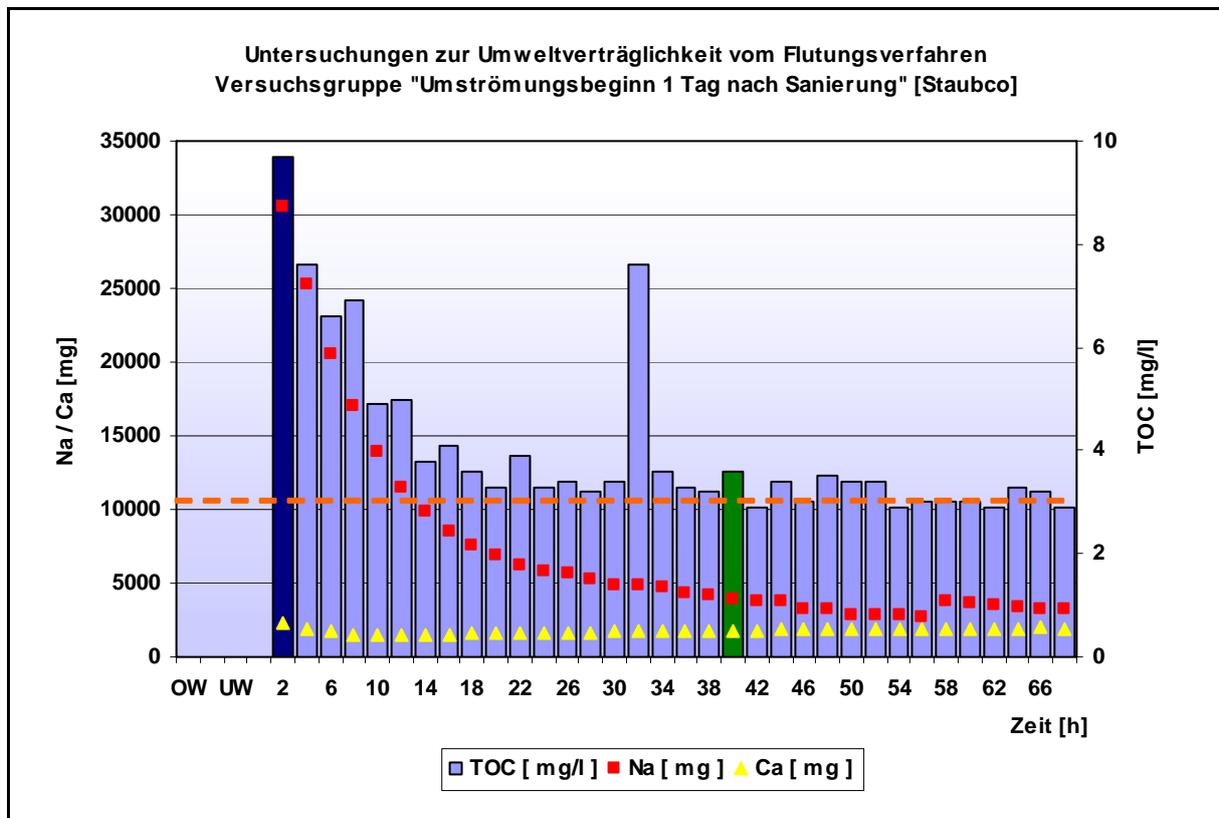
Die Ergebnisse belegen, dass nur zu Beginn der Umströmungsphase eine deutliche Trübung des Wassers zu verzeichnen war. Spätestens die Probe der Abklingphase zeigt ähnliche physikochemische Eigenschaften wie das Frischwasser und somit ebenfalls eine Verringerung der Auswaschneigung.

#### Stufe 2, Schritt 2: Ermittlung der stofflichen Parameter:

Die während der Umströmungsphase gewonnenen Proben wurden im Untersuchungslabor auf den TOC-Gehalt, Natriumgehalt und Calciumgehalt untersucht. Die nachfolgende Abbildung 5-15 stellt die Verläufe der drei Parameter über einen Zeitraum von 68 Stunden dar. Die Abbildung ist wie folgt aufgebaut:

- TOC-Gehalt als Säulendiagramm (Histogramm)
- Calcium- sowie Natriumgehalt als Punktfolge

Die horizontal verlaufende orange Linie stellt die Hintergrundbelastung (TOC, 3,1 mg/l) aus dem Referenzversuch dar.



**Abbildung 5-15: TOC-, Natrium- und Calciumgehalt**

Der Konzentrationsverlauf des TOC in Abbildung 5-15 zeigt unmittelbar nach Umströmungsbeginn einen starken Anstieg, der mit 9,7 mg/l in der ersten Zwei-Stunden-Mischprobe sein Maximum erreicht. Anschließend erfolgt ein annähernd logarithmischer Rückgang auf ca. 3,3 mg/l nach 40 Stunden. Der kurzzeitige Anstieg in der 16. 2h-Mischprobe ist vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen.

Ähnliche Aussagen wie für den TOC-Gehalt sind auch für den zeitlichen Verlauf der Natriumkonzentration zu treffen. Nach dem Maximalwert von 30498 mg zu Beginn ist anschließend auch hier ein logarithmischer Rückgang der Natriumkonzentrationen auf 3900 mg nach ca. 40 Stunden zu verzeichnen. Dieser Wert wird mit leichten Schwankungen im Bereich von 3600 – 3900 mg bis zum Schluss beibehalten.

Der Verlauf der Calciumkonzentration weist, abgesehen von dem Maximalwert von 2340 mg zu Beginn, keinerlei signifikante Änderung auf. Sie schwankt über die ganze Versuchsdauer im Bereich von ca. 1500 – 1900 mg.

Unter der Berücksichtigung der hohen pH-Werte unmittelbar nach Umströmungsbeginn sind die Ganglinien von Natrium und TOC wie folgt zu interpretieren. Zunächst wird die Erhöhung des pH-Wertes durch das Zusammentreffen des Wassers mit der ungebundenen, überschüssigen ersten Komponente und der Aufnahme der freigesetzten OH<sup>-</sup>-Ionen hervorgerufen. Dadurch herrscht im Boden ein alkalisches Milieu, das einen Abbau von Huminstoffen oder Hydrolysaten von Huminstoffen bewirkt. Ebenso kann eine Mobilisation von niedermolekularen Stoffen stattgefunden haben, die einen signifikanten TOC-Anstieg bewirken.

Die initiale Zunahme der Natriumkonzentration beruht auf der Aufnahme der freigesetzten Na<sup>+</sup>-Ionen.

Der nahezu gleich bleibende Calciumgehalt beweist, dass die innere Zone des Abdichtungskörpers nicht mit dem strömenden Wasser in Berührung kam. Weiterhin zeigt der Verlauf der Calciumkonzentration, dass keine ungebundene zweite Komponente im Boden vorlag.

#### Stufe 2, Schritt 3: Ermittlung der biologischen Parameter (Ökotoxizitätstests):

Zur Überprüfung der ökologischen Auswirkungen von Sanierungen mit dem Flutungsverfahren wird im letzten Schritt des Merkblattes die Ermittlung biologischer Parameter gefordert, wenn eine Geringfügigkeitsschwelle des TOC-Gehaltes (20mg/l) bei der Ermittlung der stofflichen Parameter überschritten wurde. Die im Merkblatt festgelegte Geringfügigkeitsschwelle ist zwar bei der Ermittlung der stofflichen Parameter nicht erreicht worden, jedoch ist hierbei anzumerken, dass die Ermittlung der TOC-Konzentration stark vom Aufbau des Versuchstandes abhängt. Durch die Vorgabe, den Leitungszonenbereich im Labor praxisnah zu simulieren, ergab sich für die Bodenpassage eine Durchflussfläche von 60x60 cm. Da die Abdichtungskörper einen geringeren Teil der Durchflussfläche ausmachen, wird die Oberfläche der Abdichtungskörper nicht von jeder Wasserströmungslinie berührt und ausgewaschen. Zur Ermittlung des TOC-Gehaltes im UWB wird allerdings die gesamte Wasserdurchflussmenge herangezogen, unabhängig von der Strömungslinie durch die Bodenpassage. Bei größeren Abmessungen des nachgestellten Leitungszonenbereiches wären die gemessenen Konzentrationen infolge der höheren unbelasteten Wasserdurchflussmenge geringer ausgefallen. Deshalb wurden zur umfassenden Beurteilung der Ökotoxizität zusätzlich folgende biologische Wirkungstests durchgeführt:

- Daphnientest
- Leuchtbakterientest
- Zellvermehrungshemmtest
- Algenwachstumshemmtest

Es wurden gezielt Proben der Maximalbelastungsphase ausgewählt. Ausschlaggebende Kenngröße war der TOC-Gehalt der jeweiligen Eluate. Da sich bei diesen Proben die Quantität und Qualität des TOC am stärksten vom Ausgangszustand unterscheidet, sollten sie die höchstmögliche, potentielle Toxizität aufweisen. Zusätzlich wurden auch die Proben der Abklingphase einer Ökotoxizität unterzogen. Anhand dieser konnte ermittelt werden, inwieweit die potentielle Ökotoxizität abgenommen hatte. Die nachfolgende Tabelle 5-10 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

**Tabelle 5-10: Ergebnisübersicht der Toxizitätstests (Umströmungsversuche)**

Ökotoxizitätstest				
STAUBCO	Daphnientest GD	Leuchtbakterientest GL	Zellvermehrungshemmtest GLW	Algenwachstumshemmtest GA
Toxizitätsschwellen	> 4	> 8	> 2	> 4
Oberwasser	1	2	1,43	1
Unterwasser	1	2	1,43	1
Maximalphase	1	2	1,43	1
Abklingphase	1	2	1,43	1

Die Ergebnisse des letzten Umströmungsversuchs belegen, dass trotz einer Injektionsmenge von 5,2 l der ersten Komponente keine ökotoxischen Effekte bei ausreichender Verdünnung im Grundwasser zu erwarten sind.

Eine Überprüfung auf den aerob biologischen Abbau wurde bei den Eluaten nicht vorgenommen, da sich der TOC-Gehalt in weniger als 28 Tagen an die Konzentration des umströmenden Wassers anpasste. Die im DIBt-Merkblatt erwähnte 50 mg/l-Grenze konnte hier aus den oben beschriebenen Gründen ebenfalls nicht angewandt werden.<sup>25</sup>

### 5.6.2.2 Einlagerungsversuche

Die Analyse der Einlagerungsversuche wird am Beispiel der TUBOGEL-Sanierung vorgestellt. Die Ergebnisse des Sanierungsmaterials STAUBCO werden im Bericht des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft (Anhang) bewertet.

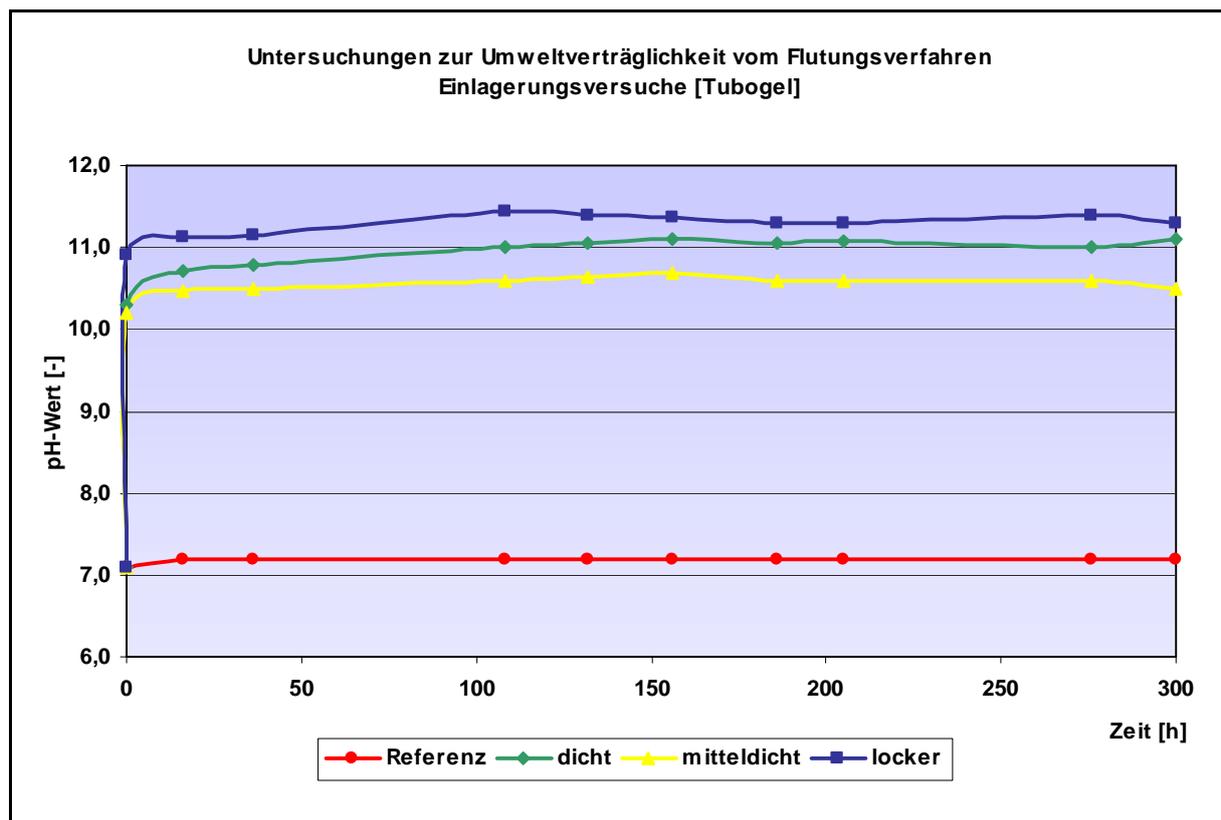
Ziel der Einlagerungsversuche war zum einen die Abbildung des unmittelbaren Kontaktbereiches zwischen Abdichtungskörper und Grundwasser und zum anderen die Beurteilung der

<sup>25</sup> Vgl. DIBt-Merkblatt, Entwurf 2005, Teil II Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte "Kanalsanierungsmittel", 2005, S. 6.

kontaminierenden Wirkung der Abdichtungskörper beim Ausbau nach der Sanierung. Aufgrund unterschiedlicher Lagerungsdichten des Bodens konnten verschieden große Abdichtungskörper hergestellt werden. Beim Ausbau des Abdichtungskörpers der mitteldichten Lagerung wurde das relativ lockere Injektionsmittel-Sand-Gemisch teilweise zerstört, so dass nur ein Teil des Abdichtungskörpers eingelagert wurde. Die Analyse erfolgte wieder nach dem Bewertungsschema des DIBt-Merkblattes.

### Stufe 2, 1. Schritt: Ermittlung der allgemeine Parameter:

Einen Tag nach der Sanierung wurden die produzierten Abdichtungskörper ausgebaut und in einen Behälter mit 5 l Leitungswasser über 300 Stunden (ca. 13 Tage) ohne Entfernen der äußeren Zone (Abbildung 5-1, Zone I) eingelagert. Am Überstandswasser der drei eingelagerten Proben und an einer unbelasteten Referenzprobe wurden der pH-Wert sowie die Leitfähigkeit in regelmäßigen Abständen bestimmt. Die Abbildung 5-16 stellt den Verlauf des pH-Werts in Abhängigkeit der Lagerungsart dar.



**Abbildung 5-16: Verlauf des pH-Wertes (Einlagerungsversuche)**

Unmittelbar nach Inkubation der Abdichtungskörper erfolgt ein signifikanter Anstieg des pH-Wertes. Der Ausgangs-pH-Wert lag bei 7,1. Innerhalb von 5 Minuten wird durch die Einlagerung bei den Lagerungsdichten mitteldicht und dicht eine pH-Wert-Zunahme auf 10,2 bzw.

10,3 bewirkt. Der infolge lockerster Lagerung entstandene und demnach mit einer höheren Injektionsmenge der ersten Komponente ausgestattete Körper erzwingt eine pH-Wert-Zunahme auf 10,9. Die Maximalwerte werden nach ca. 108 Stunden erreicht:

- lockerste Lagerung: 11,4
- mitteldichte Lagerung: 10,6
- dichteste Lagerung: 11,0

Mit leichten Schwankungen pendeln sich alle 3 Verläufe bis zum Versuchsende auf diesem Niveau ein.

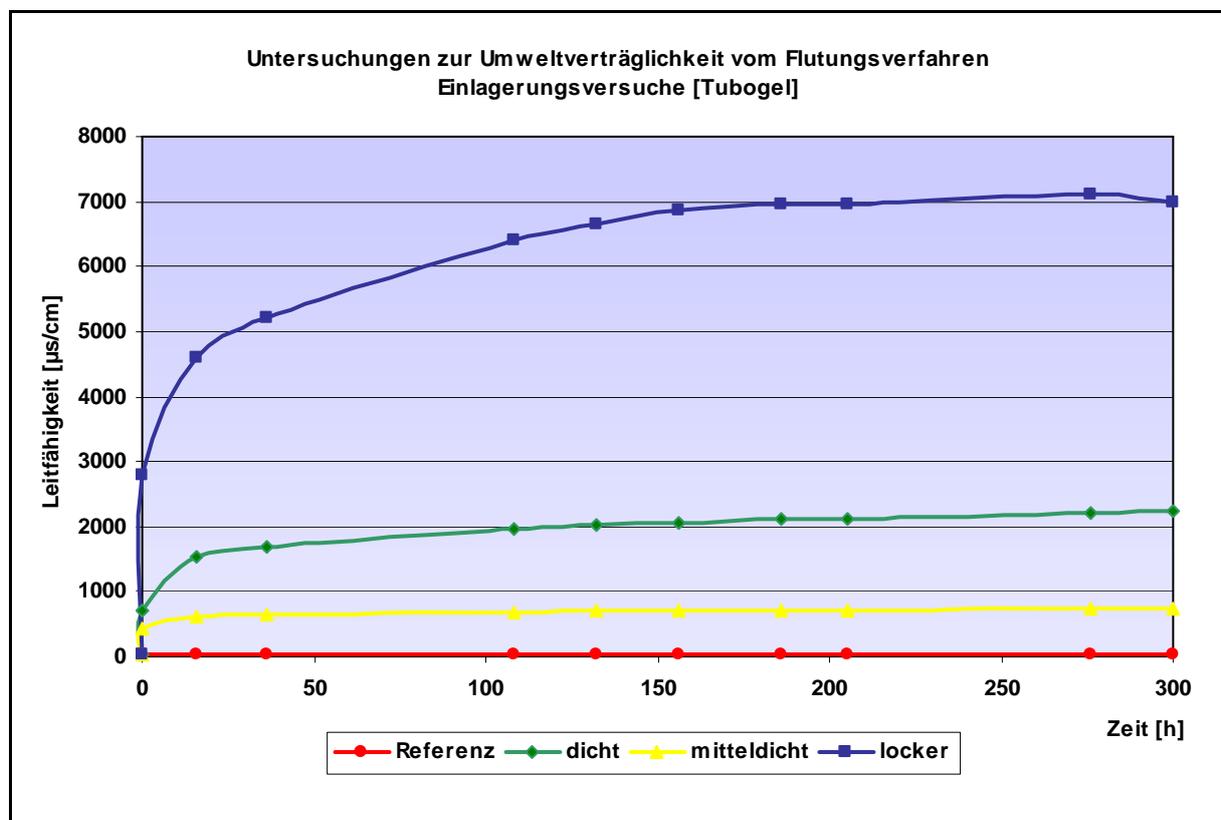


Abbildung 5-17: Leitfähigkeitsverläufe (Einlagerungsversuche)

Die Abbildung 5-17 stellt den zeitlichen Verlauf der Leitfähigkeit der drei Einlagerungsversuche über 300 Stunden dar. Es zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Anstieg der Werte unmittelbar nach Messbeginn. Die Zunahme der Leitfähigkeit in dem Einlagerungswasser mit dem Abdichtungskörper der lockersten Lagerung ist hierbei wieder am ausgeprägtesten.

Es werden folgende Werte angenommen:

- lockerste Lagerung: 2800  $\mu\text{s}/\text{cm}$
- mitteldichte Lagerung: 420  $\mu\text{s}/\text{cm}$
- dichteste Lagerung: 720  $\mu\text{s}/\text{cm}$

Anschließend zeigen alle Werte einen logarithmischen Anstieg. Das Einlagerungswasser bei mitteldichter Lagerung erreicht etwa nach 50 Stunden einen Wert von ca. 670  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , der bis zum Versuchsende mit leichten Veränderungen beibehalten wird. Die beiden anderen Einlagerungswässer (lockere und dichte Lagerung) erreichen ihre Maximalwerte (lockere Lagerung: ca. 7000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ; dichte Lagerung: 2200  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) erst gegen Ende der Versuchsreihe. Das Versuchswasser (Frischwasser) hatte lediglich eine Leitfähigkeit von 36  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

Wie bei den Umströmungsversuchen wird durch den Kontakt des Wassers mit den Abdichtungskörpern aus der ungebundenen ersten Komponente die Natronlauge (NaOH) als dissoziierte  $\text{Na}^+$ -Ionen und  $\text{OH}^-$ -Ionen freigesetzt. Die ungebundenen  $\text{OH}^-$ -Ionen bewirken eine Gleichgewichtsstörung der Ionen  $\text{H}^+$  und  $\text{OH}^-$  im Wasser. Durch die Zunahme der freigesetzten  $\text{OH}^-$ -Ionen wird der pH-Wert des Einlagerungswassers stark ins alkalische Milieu verschoben und die Leitfähigkeit infolge des größeren Gesamtionenanteils erhöht. Es wird ungefähr der pH-Wert der ersten Komponente (pH 12) angenommen. Da keine Zufuhr von Frischwasser erfolgt, bleibt der pH-Wert über die gesamte Versuchsdauer auf diesem hohen Niveau. Die größere Zunahme des pH-Wertes bei der lockersten Lagerung resultiert aus der im Vergleich zu den beiden anderen Lagerungsarten größeren Menge der injizierten ersten Komponente. Dadurch entstand ein größerer Körper und somit eine den Auswaschungsprozessen zur Verfügung stehende größere Oberfläche.

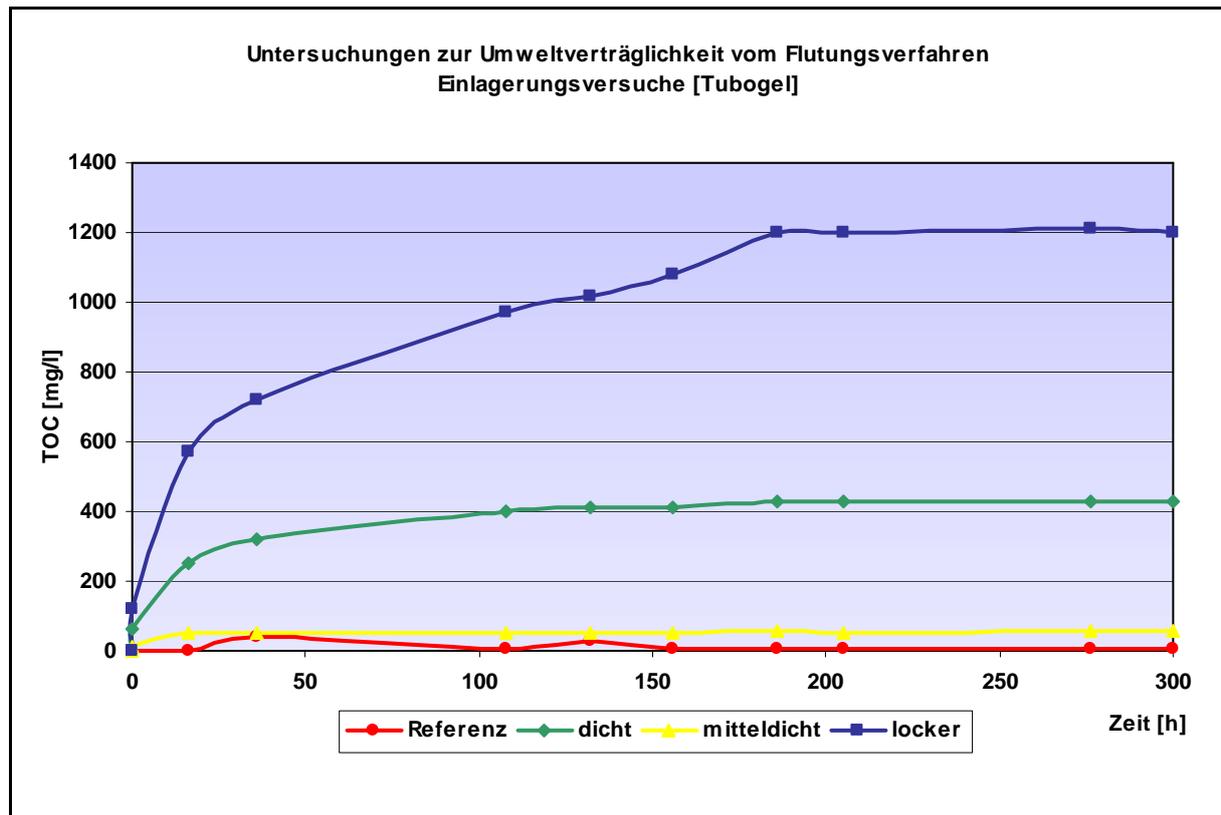
Entgegen der eigentlichen Erwartung wurde im Einlagerungsversuch „mitteldichte Lagerung“ die geringste pH-Wert Zunahme erreicht, obwohl hierbei das 3-fache der ersten Komponente im Vergleich zur dichtesten Lagerung injiziert wurde. Allerdings ist hier die eingangs erwähnte Beschädigung des Abdichtungskörpers zu berücksichtigen. Von dem Abdichtungskörper „mitteldichte Lagerung“ wurde nur ein Teil (125 g) in 5 l Wasser eingelagert. Der Abdichtungskörper „dichteste Lagerung“ wog mit 793 g mehr als das Sechsfache.

Die Änderung der Leitfähigkeit resultiert aus denselben Vorgängen, die auch den pH-Wert beeinflussen. Durch den Auswaschungseffekt der ersten Komponente erfährt das Einlagerungswasser eine Erhöhung des Ionengehaltes mit der Folge einer Leitfähigkeitszunahme. Die unterschiedliche Zunahme der Leitfähigkeit beruht wiederum auf den verschieden aus-

gebildeten Abdichtungskörper, die entsprechend ihres Volumens unterschiedlich große Oberflächen für den Auswaschungsprozess zur Verfügung stellen.

#### Stufe 2, Schritt 2: Ermittlung der stofflichen Parameter:

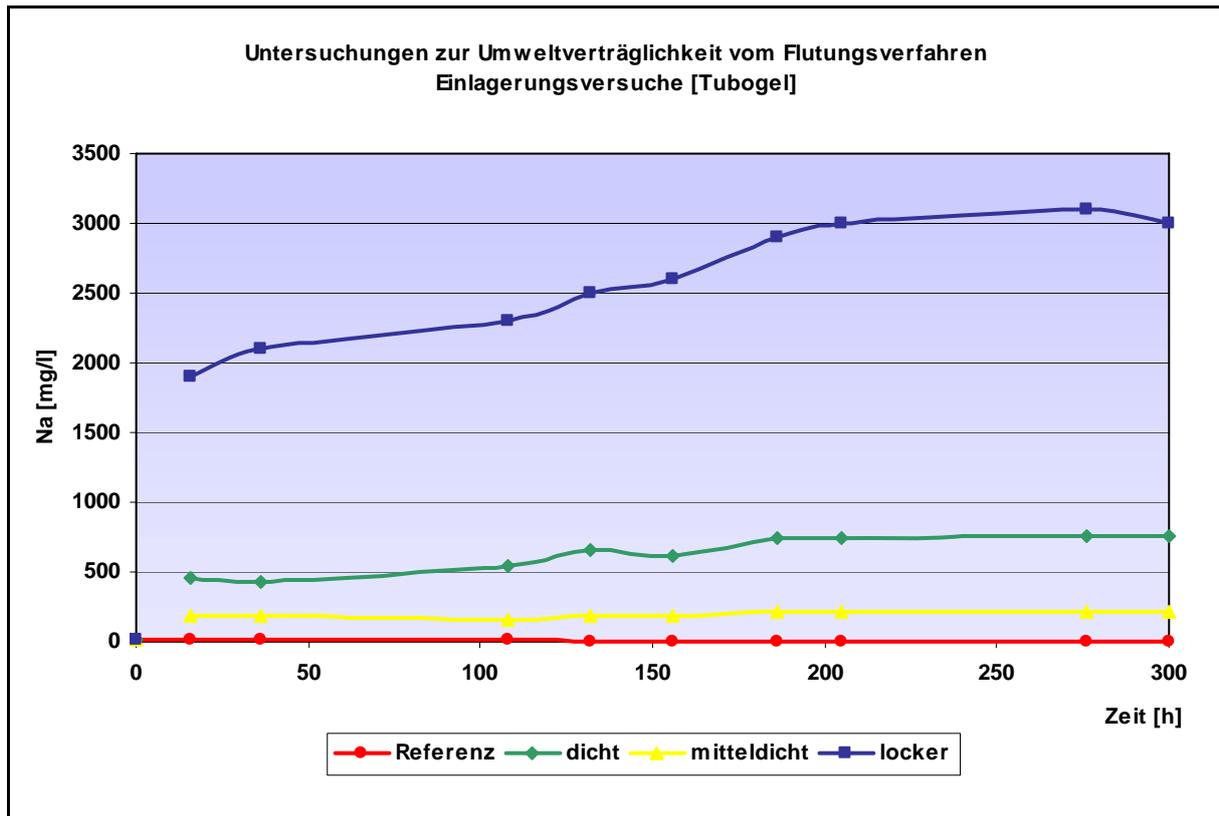
Neben pH-Wert und Leitfähigkeit wurden über die gesamte Einlagerungszeit die stofflichen Parameter TOC-Gehalt und Natriumgehalt bestimmt.



**Abbildung 5-18: Verlauf TOC [Einlagerungsversuche, Tubogel]**

Abbildung 5-18 zeigt einen gleichermaßen signifikanten Anstieg der TOC-Konzentration für die Lagerungsarten lockere und dichte Lagerung. Nach zwischenzeitlich jeweils unterschiedlichen Steigungen werden etwa nach 180 Stunden konstante Werte erreicht, die bis zum Versuchsende beibehalten werden. Als Maximalwerte sind folgende Werte festzuhalten:

- lockerste Lagerung: 1200 mg/l
- mitteldichte Lagerung: 56 mg/l
- dichteste Lagerung: 430 mg/l



**Abbildung 5-19: Verlauf Natriumkonzentration [Einlagerungsversuche, Tubogel]**

Die Ganglinien der Natriumkonzentration ähneln im Wesentlichen dem TOC-Verlauf. Bei einer gemäßigeren Steigerungsrate werden zum Ende hin folgende Maximalwerte angenommen:

- lockerste Lagerung: 3000 mg/l
- mitteldichte Lagerung: 220 mg/l
- dichteste Lagerung: 740 mg/l

Die Veränderungen beruhen, wie bei den allgemeinen Parametern, auf der Freisetzung von  $\text{Na}^+$  und  $\text{OH}^-$ -Ionen. Zum einen wird dadurch der Natriumgehalt erhöht und zum anderen der pH-Wert ins alkalische Milieu verschoben. Infolge des alkalischen Milieus werden Huminstoffe organischer Herkunft aus dem Boden ausgewaschen und teilweise auch niedermolekulare Kohlenstoffe abgebaut, die zu einer Erhöhung des TOC-Gehaltes führen.

Stufe 2, Schritt 3: Ermittlung der biologischen Parameter (Ökotoxizitätstests):

Zur Überprüfung der ökologischen Auswirkungen der Einlagerungsversuche wird im letzten Schritt des Merkblattes die Ökotoxizität in Form von biologischen Parametern anhand folgender genormter Wirkungstests durchgeführt:

- Daphnientest
- Leuchtbakterientest
- Zellvermehrungshemmtest
- Algenwachstumshemmtest

Es wurden gezielt Proben der Maximalbelastungsphase ausgewählt. Ausschlaggebende Kenngröße war der TOC-Gehalt der jeweiligen Eluate. Demnach würde bei der Probe mit dem Elutionsmaximum auch die potenzielle Ökotoxizität am höchsten sein. Die nachfolgende Tabelle 5-11 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

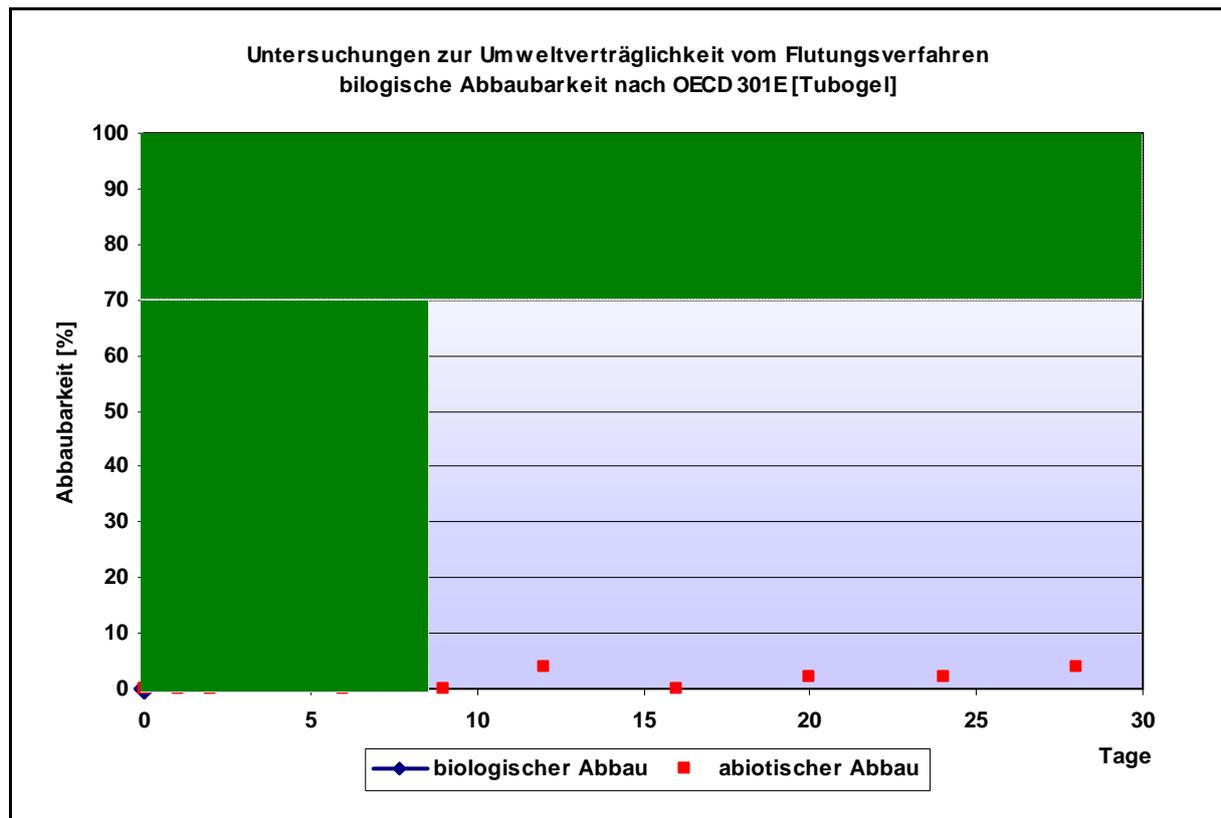
**Tabelle 5-11: Ergebnisübersicht der Toxizitätstests (Einlagerungsversuche)**

Ökotoxizitätstest Einlagerungsversuche				
STAUBCO	Daphnientest GD	Leuchtbakterientest GL	Zellvermehrungshemmtest GLW	Algenwachstumshemmtest GA
Toxizitätsschwellen	> 4	> 8	> 2	> 4
Referenzprobe	1	2	1,43	1
Maximalphase	40	6	1,43	12

Die Ergebnisse der Ökotoxizitätstests belegen, dass die Toxizitätsschwellen zum Teil deutlich überschritten werden. Da die TOC-Konzentrationen infolge der Inkubation erheblich angestiegen sind, muss der biologische Abbau der Eluate aus den Einlagerungsversuchen nachgewiesen werden.

Die biologische Abbaubarkeit einer Substanz wird durch die Zersetzungsgeschwindigkeit der organischen Bestandteile durch Mikroorganismen beschrieben. Neben der biologischen Abbaubarkeit können Stoffe auch chemisch und physikalisch umgewandelt werden. Als Endprodukte der Reaktionen entstehen nicht toxische Produkte (Metaboliten) z.B. im Falle einer vollständigen Mineralisierung unter anderem CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O.

Die nachfolgende Abbildung 5-20 stellt die biologische und die abiotische Abbaubarkeitskurve der Elutionsmaxima dar. Unter abiotischem Abbau sind alle chemischen Abbauprozesse auf molekularer Ebene, die nicht von Mikroorganismen ausgeführt werden können, zu verstehen.



**Abbildung 5-20: Abbaubarkeit der Einlagerungsversuche [Tubogel]**

Eine Probe gilt als biologisch schnell und gut abbaubar, wenn innerhalb der ersten 10 Tage eine biologische Abbaubarkeit von 70 % erreicht wird. Nach 10 Tagen ist bereits ein biologischer Abbau von knapp 90 % erreicht. Daher kann von einer guten Bioabbaubarkeit ausgegangen werden.

### 5.6.3 Ergebnisse der terrestrische Untersuchungen

Die terrestrischen Untersuchungen wurden mit ausgewählten Mischwasserproben durchgeführt, bei denen von einer hohen toxischen Wirkung für Bodenorganismen aufgrund einer starken Belastung mit mobilisierten Bestandteilen der Abdichtungskörper ausgegangen werden konnte. Die Eluate dieser so genannten „worst-case“-Szenarios ergaben sich bei den Einlagerungsversuchen, deren Abdichtungskörper bei einer lockeren Bodenlagerungsdichte mit TUBOGEL und STAUBCO hergestellt wurden. Die beiden Eluate werden durch die nachfolgende Tabelle 5-12 näher charakterisiert.

**Tabelle 5-12: Eluate der terrestrischen Untersuchungen**

Probe	Grundwasser	Tubogel	Staubco
pH	8,3	11,3	9,3
LF [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	191	7.000	99.000
TOC [mg/L]	< 20	1.200	2.600
Na [mg/L]	18	3.000	9.500
Ca [mg/L]	12	12	14.900
Gewicht der Probenkörper, die eluiert wurden	---	1178	15000
Einlagerungswassermenge [mL]	---	5.000	5.000
Verhältnis Probenkörper/Wassermenge	---	0,24	3

Die terrestrischen Toxizitätstests wurden vom Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (IME) in Schmallenberg durchgeführt. Sie umfassen eine kurzfristige direkte Untersuchung, sowie auch eine Wiederholung der Untersuchungen nach 3 Monaten, um langfristige Effekte abzuschätzen. Für detaillierte Ausführung des Untersuchungsprogramms, der Ergebnisse sowie der Aus- und Bewertung wird auf den Untersuchungsbericht des IME im Anhang hingewiesen.

Als Gesamtergebnis der terrestrischen Untersuchungen kann festgehalten werden, dass von der Sanierungsmaßnahme bei einer hohen Belastung des Kontaktwassers (STAUBCO-Eluat, Tabelle 5-12) auch eine nachhaltig toxische Wirkung auf die Bodenmikroorganismen ausgeht. Die Ergebnisse zeigen somit auch unter bodenspezifischen Gesichtspunkten einen Zusammenhang zwischen dem Injektionsmittelverbrauch und dem Grad der ökologischen Belastung.

## 5.7 Zusammenfassende Bewertung der ökologischen Auswirkungen

Die Ergebnisse der aquatischen und terrestrischen Untersuchungen werden nach dem DIBt-Merkblatt in zwei Schritten bewertet:

**Stufe 1:** Ermittlung und Bewertung aller relevanten Inhaltsstoffe des zu bewertenden Bauprodukts.

**Stufe 2:** Ermittlung und Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe des Bauprodukts. Hierzu sollen praxisnahe Eluate hergestellt werden. In drei Schritten sind folgende Parameter zu erfassen und zu beurteilen:

- allgemeine Parameter (pH-Wert, Leitfähigkeit, Geruch, Färbung, Trübung und Neigung zur Schaumbildung)
- stoffliche Parameter (TOC-Gehalt, Natriumgehalt)
- biologische Parameter (Daphnientest, Leuchtbakterientest, Zellvermehrungshemmtest, Algenwachstumshemmtest)

Die nachfolgende Tabelle 5-13 stellt die Kriterien zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser im Sinne des zitierten Merkblattes speziell für den hier vorliegenden Anwendungsfall dar.

Tabelle 5-13: Kriterien zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser

<b>Kriterien zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser</b>	
<b>Stufe 1</b>	
<b>Bewertung der Inhaltsstoffe</b>	
Für das Flutungsverfahren ist die Bewertung der Komponenten in Stufe 1 noch zu vereinbaren	
<b>Stufe 2</b>	
<b>Schritt 1</b>	<b>Bewertung der allgemeinen Parameter</b>
<b>pH-Wert, Leitfähigkeit</b>	Der pH-Wert im Eluat darf nicht größer als pH 10 sein. Ein dauerhafter pH-Wert von 10 ist nicht wünschenswert. Daher muss der pH-Wert innerhalb von 28 Tagen auf den pH-Wert des Ausgangswassers abklingen. Im Einzelfall kann ein pH-Wert von 11 bei einer Bewertung des Gesamtergebnisses akzeptiert werden.
	Der in der Trinkwasserverordnung vorgegebene Wert von 2000 µs/cm gilt als Richtwert. Höhere Leitfähigkeitswerte sind kein alleiniges Ausschlusskriterium.
<b>Färbung, Trübung, Geruch, Neigung zur Schaumbildung</b>	Innerhalb von 28 Tagen ist der Zustand des Ausgangswassers zu erreichen, wenn Auffälligkeiten auftreten. Eine nach 28 Tagen noch vorhandene geringe Änderung des Eluats stellt kein alleiniges Ausschlusskriterium.
<b>Schritt 2</b>	<b>Bewertung der stofflichen Parameter</b>
<b>TOC-Gehalt, Natriumgehalt</b>	Der TOC-Gehalt muss innerhalb von 28 Tagen auf den Gehalt des Ausgangswassers abklingen. Der Natriumgehalt sollte wie der pH-Wert verlaufen. Ist dies nicht der Fall, bedarf es eine Klärung des Vorganges.
<b>Schritt 3</b>	<b>Bewertung der biologischen Parameter</b>
<b>Daphnientest, Leuchtbakterientest, Zellvermehrungs- hemmtest, Alegenwachstums- hemmtest</b>	Die Prüfung der biologischen Tests muss ergeben, dass keine negativen Auswirkungen auf Boden und Grundwasser zu erwarten sind. Die Inhaltsstoffe der Eluate müssen biologisch abbaubar sein. Mangelnde Abbaubarkeit stellt kein alleiniges Ausschlusskriterium dar, sondern wird im Zusammenhang mit den Ergebnissen der biologischen Tests bewertet.

**Stufe 1:**

Für die Bewertung aller relevanten Inhaltsstoffe muss nach dem Entwurf des Merkblattes Teil II (Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte, Teil II "Kanalsanierungsmittel") eine Bewertung der Komponenten in Stufe 1 noch vereinbart werden. Daher werden die Anforderungen aus Stufe 1 als erfüllt betrachtet und nicht weiterverfolgt, da die einzelnen Verfahren bauaufsichtlich zugelassen sind und der Wassergefährdungsklasse 1 (schwach Wasser gefährdend) zuzuordnen sind.

**Stufe 2:**Schritt 1, allgemeine Parameter:

Die Umströmungsversuche zeigten, dass es zu Beginn zu einer signifikanten Erhöhung des pH-Werts und der Leitfähigkeit kommt. Danach fielen beide Parameter innerhalb von maximal 5 Tagen auf das Anfangsniveau des umströmenden Wassers ab. Nach dem Merkblatt des DIBt (vgl. Tabelle 7-1) wird dies erst innerhalb von 4 Wochen gefordert.

Bei den Einlagerungsversuchen wurden mit dem Einlegen der Abdichtungskörper deutliche pH-Wert- und Leitfähigkeitsveränderungen hervorgerufen. Über die gesamte Versuchsdauer von 300 Stunden konnten die Ausgangswerte nicht erreicht werden, da in der Versuchskonzeption keine Zufuhr von Frischwasser erfolgte.

Geruch, Färbung, Trübung sowie die Neigung zur Schaumbildung sind nur teilweise zu Beginn und in der Maximalphase zu beobachten. Spätestens nach der Abklingphase sind keine Hinweise auf Veränderungen ersichtlich.

Da keine schädlichen Veränderungen aufgrund der allgemeinen Parameter aufgetreten sind, sind auch zunächst keine Langzeitfolgen zu vermuten.

Schritt 2, stoffliche Parameter:

Der TOC-Gehalt und der pH-Wert weisen bei den Umströmungsversuchen einen ähnlichen Verlauf auf. Die maximalen TOC-Konzentrationen wurden nach etwa 10 Stunden erreicht. Innerhalb von wenigen Tagen (< 5 Tage) werden die Ausgangswerte des umströmenden Wassers angenommen, was mit den Anforderungen des DIBt im Einklang steht. Dort wird das Erreichen des Ausgangswertes wie beim pH-Wert innerhalb von 4 Wochen gefordert.

Für die Konzentrationen von Natrium und Calcium sind dem Merkblatt keine Grenzwerte zu entnehmen. Es wird nur gefordert, dass der zeitliche Verlauf des Natriums wie der pH-Wert verlaufen sollte. Diese Forderung wird bei allen Umströmungsversuchen eingehalten.

Die TOC-Konzentrationen im Einlagerungswasser erreichen etwa nach 180 Stunden ihre Maximalwerte, die ebenfalls bis zum Versuchsende beibehalten werden. Da kein Austausch des Einlagerungswassers erfolgte, bleiben die Konzentrationen in Bezug auf die Umströmungsversuche auf einem sehr hohen Niveau.

### Schritt 3, biologische Parameter:

Anhand von biologischer Testverfahren wurden das biologische Abbauverhalten sowie die ökotoxikologischen Auswirkungen der mobilisierbaren Inhaltsstoffe auf das Grundwasser untersucht. Das Elutionsmaximum sowohl aus den Umströmungsversuchen als auch aus den Einlagerungsversuchen wurde dem Daphnientest, dem Leuchtbakterientest, dem Zellvermehrungshemmtest und dem Algentest unterzogen. Keines der Eluate aus den Umströmungsversuchen zeigte dabei unter Berücksichtigung des Verdünnungseffektes im Unterwasserbehälter ökotoxikologische Auswirkungen auf die Prüforganismen. Die Eluate der Einlagerungsversuche überschritten zum Teil deutlich die Toxizitätsschwellen (Daphnientest und Algenwachstumshemmtest). Abschließend wurde die biologische Abbaubarkeit an diesen Eluate durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse lieferten eine gute biologische Abbaubarkeit.

### Bewertung:

Die mit den beiden Sanierungsmaterialien STAUBCO und TUBOGEL durchgeführten Umströmungsversuche konnten alle Stufen des DIBt-Bewertungsschemas ohne Eintreten eines Ausschlusskriteriums erfüllen. Insgesamt sind den nachgestellten Grundwasserszenarien hinsichtlich der Umweltverträglichkeit keine Einwände zu erheben. Beide Sanierungsmaterialien sind unter den durch die Zulassung geregelten Randbedingungen, wie Wasserverhältnisse, Lagerungsart des Bodens, Schadensart und Injektionsmittelmenge als umweltverträglich einzustufen.

Beim Einlagerungsversuch konnten nicht alle Stufen des DIBt-Bewertungsschemas ohne Eintreten eines Ausschlusskriteriums erfüllt werden. Die Bewertungen bezüglich der allgemeinen und stofflichen Parameter führten zu einem Ausschlusskriterium, da deutliche Abweichungen (Leitfähigkeitswerte und TOC-Gehalt) zu den Bewertungskriterien des DIBt vorhanden waren. Dem Merkblatt ist aber zu entnehmen, dass höhere Leitfähigkeitswerte zunächst kein alleiniges Ausschlusskriterium darstellen. Auch ein pH-Wert bis maximal 11 kann bei der Gesamtbewertung akzeptiert werden. Der TOC-Gehalt konnte unter den gegebenen Randbedingungen der Einlagerungsversuche nicht auf die Ausgangskonzentration zurückfallen, d.h. im Schritt der stofflichen Parameter führt dies zum sofortigen Ausschluss. Überdies würden unter Vernachlässigung der stofflichen Parameter auch die biologischen Parameter

zum sofortigen Ausschluss führen. Die Eluate zeigten zwar eine gute biologische Abbaubarkeit aber nach dem Merkblatt führt schon ein nicht Erfüllen eines einzelnen biologischen Tests zum sofortigen Ausschluss.

Zunächst ist also unter Berücksichtigung der Bewertungskriterien des DIBt aufgrund der Einlagerungsversuche die Umweltverträglichkeit nicht anzuerkennen. Allerdings bleibt zu klären, in wiefern dieses worst-case-Szenario der Einlagerungsversuche eintreten kann. Der Einlagerungsversuch spiegelt zwar den unmittelbaren Kontaktbereich Grundwasser/Abdichtungskörper wider, jedoch zeigen die Umströmungsversuche, dass schon nach einer relativ kurzen Strecke von 40 cm (Abstand Schadstelle Unterwasserbehälter) die Konzentrationen so stark abgebaut werden, dass keine ökologisch schädlichen Auswirkungen mehr vorliegen. Durch den Unterschied der beiden Versuchsergebnisse lässt sich ableiten, dass die Frage nach der ökologischen Unbedenklichkeit durch die Konzentration der auswaschbaren Bestandteile beantwortet wird. Die Belastung des Kontaktwassers steht wiederum im direkten Verhältnis zur auswaschbaren Oberfläche und damit zum Volumen des Abdichtungskörpers. Da durch die Auswaschung an der Oberfläche nachweislich nur Bestandteile der ersten Komponente mobilisiert werden, ist aus Sicht des Grundwasser- und Bodenschutzes eine Begrenzung der Mengenverbräuche der ersten Komponente pro Schadstelle vorzunehmen. Eine Beschränkung der zweiten Komponente ist nicht notwendig. Zum einen kann ein Kontakt mit umströmendem Grundwasser nahezu ausgeschlossen werden und zum anderen ist die injizierte Menge im Vergleich zur ersten Komponente um einiges geringer.

Anhand der Untersuchungsergebnisse wird im Folgenden versucht, die Injektionsmenge der ersten Komponente soweit zu begrenzen, dass keine bedenklichen ökologischen Auswirkungen von Sanierungen mit dem Flutungsverfahren ausgehen.

Nach dem Zulassungsbescheid des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBT) ist die Anwendung des Flutungsverfahrens bei einem Wasserverlust von weniger als 70% des Volumens der zu sanierenden Leitungsabschnitte empfehlenswert. Daher wird vor einer Sanierung eine Wasserdichtheitsprüfung vorgenommen und anschließend ohne jegliche Kenntnisse über mögliche Injektionsmengen und Anzahl der Schäden das Leitungssystem geflutet. Eine Injektionsmengenbegrenzung wird zum jetzigen Zeitpunkt von vorn herein nicht in Betracht gezogen. In situ Sanierungen zeigen jedoch, dass zum Teil sehr große Mengen der Injektionskomponenten verpresst werden. Anhand der durchgeführten Versuche ist es nicht möglich, die in situ injizierten Mengen ökologisch zu bewerten. Über eine Extrapolation der Versuchsergebnisse kann eine unbedenkliche Höchstgrenze der Injektionsmenge nicht sinn-

voll und ausreichend sicher abgeschätzt werden. Die nachfolgende Tabelle stellt die Injektionsmengen der Laborversuche mit in situ Injektionsmengen gegenüber.

**Tabelle 5-14: Vergleich der Injektionsmittelverbräuche**

	Umströmungsversuche / Einlagerungsversuche	Pilotprojekt Düsseldorf	Pilotprojekt Köln
Durchschnittliche Leitungslänge [m]	1	52	136
Durchschnittlicher Materialverbrauch			
Komponente 1	1,7 l	1160 l	1600 l
Komponente 2	0,425 l	350 l	730 l

Ausgehend von den zum Teil enormen Abweichungen zwischen den Versuchsverbräuchen und realen Injektionsmittelverbräuchen ist zunächst eine Modifizierung des Flutungsverfahrens vorzunehmen. Vor einer Sanierung ist das Leitungssystem so zu untersuchen, dass ein ausreichender Kenntnisstand über Art und Anzahl der Schäden erreicht wird. Untersuchungen am Institut für Baumaschinen und Baubetrieb (ibb) haben gezeigt, dass durch eine ausführliche Bestandaufnahme der Leitungsdaten sowie durch eine optische Inspektion ein ausreichend ausführlicher Wissenstand ermittelt werden kann. Trotz der hohen Verzweigungsgrade der Entwässerungsleitungen ermöglichen die Fortschritte in der Entwicklung der Kamertechnik einen hohen Inspektionsgrad.

Die Anzahl der Schäden sowie der Wasserverlust bei der Dichtheitsprüfung vor der Sanierung erlauben einen Rückschluss auf die Durchlässigkeit des Bodens und damit auf die zu erwartenden Injektionsmittelmengen. Weiterhin konnte an Sanierungsversuchen zur Wirksamkeit festgestellt werden, dass pro Schadstelle 1 Liter der ersten Komponente für eine erfolgreiche Abdichtung einer schadhaften Grundleitung (200x3 mm Längsriss) ausreichend ist. Durch die gezielte Steuerung der Injektion der Komponenten wurde die gleiche Abdichtungswirkung erzielt, wie bei herkömmlichen Sanierungsvorgängen.

Von diesen Wirksamkeitsuntersuchungen ausgehend wird eine Mengenabschätzung der ersten Komponente vorgenommen. Sowohl bei den Umströmungsversuchen als auch bei der Herstellung der Abdichtungskörper der Einlagerungsversuche wurden maximal 5 Liter der ersten Komponente zur Abdichtung einer Schadstelle injiziert. Unter den praxisnah vorgegebenen Grundwasserverhältnissen (Umströmungsversuche) konnte keine toxische Auswirkung nachgewiesen werden. Daher wird aufgrund dieser Maximalmengen eine Injekti-

onsmenge der ersten Komponente unter Einbeziehung etwaiger Nachfolgezyklen von maximal 5 Litern pro Schadstelle zur Abdichtung als ausreichend und im Hinblick des Grundwasser- und Bodenschutzes als Höchstgrenze eingestuft. Auch aus ökonomischer Sicht sollte eine Begrenzung der Injektionskomponenten vorgenommen werden.

Die Begrenzung der Injektionsmengen kann zum einen über den Injektionsdruck oder zum anderen über die Einwirkungszeit vorgenommen werden. Da bei den Untersuchungen zur Wirksamkeit ein Injektionsdruck von unter 0,05 bar als ungünstige Randbedingung eingestuft wurde, empfiehlt sich eine Mengenbegrenzung über die Einwirkungszeit. Die DIBt-Zulassungen schreiben zwar eine Injektionszeit von 45 min pro Komponente vor, jedoch zeigen die Untersuchungen, dass eine derartige verfahrenstechnische Vorgabe technisch nicht notwendig und ökologisch nicht sinnvoll ist.

## 6 Zusammenfassung

Die Sanierung der häuslichen Grundleitungsnetze ist eine umfangreiche und anspruchsvolle Bauaufgabe der nächsten Jahre, für die wegen der besonderen baulichen Merkmale gegenwärtig nur wenige Sanierungsverfahren in Frage kommen. Das Flutungsverfahren, das seit einigen Jahren hauptsächlich zur Sanierung öffentlicher und gewerblicher Entwässerungsanlagen eingesetzt wird, erscheint aufgrund seiner verfahrenstechnischen Merkmale auch für den häuslichen Anwendungsbereich besonders geeignet. Allerdings fehlten hier bislang fundierte Erkenntnisse über die Anwendung. Das Ziel des mehrteiligen Forschungsvorhabens war es daher, eine gesicherte Grundlage für den nachhaltigen Einsatz des Flutungsverfahrens bei Grundleitungsnetzen zu schaffen.

Zur Feststellung der Leistungsfähigkeit des Flutungsverfahrens in Grundleitungen wurde eine repräsentative *Sanierungsmaßnahme in situ* begleitet und wissenschaftlich ausgewertet. Besonders vorteilhaft sind die einfache Handhabung, die kurze Ausführungsdauer, die ganzheitliche Sanierung des kompletten Grundleitungsnetzes und die relativ niedrigen Sanierungskosten. Allerdings wurde festgestellt, dass die Sanierungen teilweise nur zu einer temporären Abdichtung der Schadstellen führten und in vielen Fällen eine dauerhafte Abdichtung der Grundleitungsnetze nicht erreicht werden konnte. Nach 3 bis 4 Jahren Leitungsbetrieb überschritten rund 90 % der Grundleitungsnetze das geforderte Dichtheitskriterium deutlich.

Durch weitergehende Untersuchungen sollte daher geklärt werden, welche Wirksamkeiten die Sanierungen mit dem Flutungsverfahren erreichen bzw. auf welche Ursachen der Verlust der Abdichtungswirkung zurückzuführen ist.

Im ersten Schritt dieser Untersuchungen, die in der Versuchshalle des ibb durchgeführt wurden, wurden die Kenngrößen maßgebender Materialeigenschaften (Druckfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit, Haftfestigkeit, etc.) ermittelt. Mit den Untersuchungen wurde festgestellt, dass homogene Boden-Gel-Körper stabil, wasserdicht und weitgehend widerstandsfähig gegenüber den üblichen exogenen chemischen, physikalischen und mechanischen Beanspruchungen sind. Probleme ergaben sich dagegen insbesondere bei inhomogenen Injektionskörpern, bei denen der Gelanteil vergleichsweise hoch war. In diesen Fällen führten materialspezifische, endogene Beanspruchungen im Zuge der Gelalterung zu einer deutlichen Kontraktion des Gelkörpers (Synärese). Die Synärese fiel umso stärker aus, je geringer der Bodenanteil am Prüfkörper war. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass wegen der Stützwirkung des Korngerüsts im Injektionskörper dem Boden bei den Sanierungen mit

dem Flutungsverfahren eine entscheidende Bedeutung für die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Abdichtung zukommt.

Zur realitätsnahen Erforschung von Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit wurden im zweiten Schritt Sanierungen unter gezielter Variation maßgebender Einflussgrößen (Bodenart, Lagerungsdichte, Schadensart, etc.) simuliert und im Hinblick auf den Abdichtungserfolg untersucht.

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass der langfristige Erfolg der Sanierungen maßgeblich von der Beschaffenheit der Abdichtungskörper abhängt. Für eine dauerhafte Wirksamkeit muss der Porenraum des Abdichtungskörpers vollständig durch das Silikatgel geschlossen sein und das Korngerüst des Bodens eine ausreichende Stützwirkung gegenüber der Synärese aufweisen. Entscheidende Beeinträchtigungen der Sanierungsqualität ergeben sich deshalb hauptsächlich aus problematischen Randbedingungen im Bereich der Leitungszone (Hohlräume, locker gelagerte Böden, wassergesättigte Böden, etc.), Schadstellen außerhalb der vorgegebenen Anwendungsgrenzen (Querrisse:  $b > 5$  mm, Längsrisse:  $b > 3$  mm, etc.) und verfahrenstechnischen Parametern (geringer Injektionsdruck, niedrige Temperaturen). In diesen Fällen ist die Ausbildung homogener Abdichtungskörper nicht gewährleistet.

Im dritten Untersuchungsschritt wurden die Auswirkungen von besonderen Beanspruchungen (Temperaturwechsel, Erschütterungen, Hochdruckspülungen) realitätsnah durchgeführter Sanierungen untersucht. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass der bei Hochdruckspülungen herrschende Wasserdruck (i. A.  $> 50$  bar) bei direkter Einwirkung die Struktur des Abdichtungskörpers wesentlich schädigen kann. Weiterhin zeigte sich, dass starke Erschütterungen die Haftwirkung des Abdichtungskörpers an der Rohrwandung beeinträchtigen können. Beide Belastungsfälle, die in der Praxis beispielsweise bei Reinigungsarbeiten am Grundleitungsnetz bzw. bei Bauarbeiten im Bereich sanierter Leitungen auftreten können, führten in den Versuchen zum Verlust der Abdichtungswirkung und sind deshalb im Nachgang an die Sanierungsmaßnahme zu vermeiden.

Im Hinblick auf einen zukünftig optimierten Einsatz des Flutungsverfahrens im häuslichen Anwendungsbereich führen die Untersuchungsergebnisse somit zu folgenden primären Verfahrensanforderungen:

Zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Erhöhung der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit, müssen die im Einzelfall vorliegenden Randbedingungen, insbesondere die Bodenverhältnisse in der Leitungszone, eingehend erfasst und bewertet werden. Weiterhin muss durch die Einhal-

tung der bauaufsichtlich festgelegten Injektionsdruckhöhe die Ausbildung homogener und damit dauerhaft wirksamer Abdichtungskörper sichergestellt werden. Darüber hinaus müssen die Einwirkungen schädlicher Beanspruchungen verhindert werden.

Die Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit wurden an verschiedenen Grundwasserszenarien in Anlehnung an das DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene praxisnahe Laborversuche vorgenommen, bei denen die Sanierungsmaterialien STAUBCO® der Fa. Staubco & Co. Chemiehandels-GmbH und TUBOGEL® der Fa. Geochemie Sanierungssysteme GmbH zum Einsatz kamen. Zum einen wurde der schadhafte Leitungsabschnitt während bzw. nach einer Sanierung einer Umströmung mit Wasser ausgesetzt und zum anderen wurde durch die Einlagerungsversuche der unmittelbare Kontaktbereich zwischen dem Grundwasser und der erste Injektionskomponente des Abdichtungskörpers abgebildet.

Die Versuche zeigten, dass während bzw. nach der Injektion Natrium als Natronlauge in Form von dissoziierten Ionen  $\text{Na}^+$  und  $\text{OH}^-$  freigesetzt wird und eine kurzzeitige Verschiebung des Bodenmilieus ins alkalische bewirkt. In diesem Zustand erfolgt eine Auswaschung der im Boden befindlichen organischen Bestandteile, die einen Anstieg des TOC-Gehaltes (gesamter organisch gebundener Kohlenstoff) hervorrufen. Durch das kontinuierliche Umströmen mit Frischwasser konnte bei den Umströmungsversuchen innerhalb von wenigen Tagen (< 5 d) in etwa die Ausgangssituation im Boden erreicht werden. Die Wasserproben der Einlagerungsversuche, die nach der chemischen Analytik und der toxischen Beprobung als worst-case-Szenario definiert wurden, konnten nicht alle Bewertungsstufen des DIBt-Merkblattes ohne Eintreten eines Ausschlusskriteriums durchlaufen.

Aus den unterschiedlichen Ergebnissen konnte geschlussfolgert werden, dass sich der direkteste und auch stärkste Einfluss während der Injektion und der jungen Gelbildungsphase ergibt. Das Injektionsgut weist zu diesem Zeitpunkt die größte Mobilität auf, die vor allem an der Oberfläche der Abdichtungskörper zu einer Vermischungszone und hohen Belastungen im Grundwasser führt. Daher führt eine große Oberfläche der Abdichtungskörper zu extremen Auswaschungen, die deshalb über eine Begrenzung der Injektionsmengen entgegen gesteuert werden muss. Untersuchungen zur optimierten Materialeinsatzplanung haben gezeigt, dass bereits 1 l der ersten Komponente bei guter Durchmischung mit der entsprechenden Menge der zweiten Komponente für eine dauerhaft wirksame Abdichtung ausreichend ist. Vor diesem Hintergrund wurde die ökologisch verträgliche Höchstmenge zu 5 l pro Schadstelle festgelegt. Eine Mengenbegrenzung der ersten Komponente sollte unter Beibe-

haltung des bauaufsichtlich vorgeschriebenen Injektionsdruckes von 0,2 bar über die Injektionszeit erfolgen.

## 7 Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine dauerhafte Abdichtungswirkung beim Flutungsverfahren nur bei Vorliegen bestimmter Randbedingungen (zulässige Schadensarten, geeignetes Injektionsmedium, etc.) erzielbar ist. Angesichts der aktuellen Untersuchungen zum Zustand der Grundleitungssysteme, bei denen allgemein ein erheblicher Schädigungsgrad festgestellt wird, kommt das Flutungsverfahren vor diesem Hintergrund nur in Einzelfällen als alleinige Sanierungslösung in Betracht. Bei stark geschädigten Grundleitungssystemen, die den Großteil der Sanierungsmenge ausmachen, ist eine nachhaltige Sanierung entweder nur mit einem anderen Verfahren (Abhängen der Leitungen, Neuverlegung) oder mit einer Kombination mehrerer Sanierungsverfahren möglich.

Neben der Einschränkung, dass das Flutungsverfahren nur bei bestimmten Schadensarten einsetzbar ist, stellen ungünstige Randbedingungen in der Leitungszone ein Ausschlusskriterium für das Flutungsverfahren dar. Die Feststellung dieser „ungünstigen Randbedingungen“ ist allerdings aufwändig und mit den bekannten Methoden noch nicht hinreichend genau möglich. Gerade hier fehlen weitergehende Erfahrungen, die nur in größeren Untersuchungen in der Praxis gewonnen werden können.

Insgesamt stellt sich somit für jeden Einzelfall die Frage nach der optimalen Sanierungslösung. In diesem Zuge gilt es zu klären, ob

- das Flutungsverfahren allein eingesetzt werden kann,
- das Flutungsverfahren mit anderen Sanierungsverfahren kombiniert werden kann,
- oder ob ausschließlich andere Sanierungsverfahren zum Einsatz kommen können.

Für die zukünftigen Sanierungsaufgaben bleibt festzuhalten, dass als Voraussetzung für eine umweltverträgliche sowie technisch und wirtschaftlich optimale Sanierungslösung eine intensive Zustandserfassung und eine darauf abgestimmte Sanierungsplanung und –ausführung durchzuführen ist. Die in dem Forschungsvorhaben zum Flutungsverfahren gewonnenen Erkenntnisse lassen es geboten erscheinen, den Einsatz des Flutungsverfahrens zur Sanierung von Grundleitungen vorab kritisch zu prüfen, die Verfahrensparameter sorgfältig auf die gegebenen Randbedingungen abzustimmen sowie den Erfolg der Sanierung nicht nur im direkten Anschluss an die Sanierungsmaßnahme sondern auch wiederholt zu einem spätem Zeitpunkt (2-3 Jahre) eingehend zu prüfen.

## 8 Literatur

*ATV M 143*: Merkblatt M 143, Teil 2: Optische Inspektion – Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen, Hrsg.: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV), Ausg. April 1999

*ATV M 149*: Merkblatt M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung und –bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Hrsg.: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV), Ausg. April 1999

*Cammann, Karl* [Instrumentelle Analytische Chemie, 2001]: Instrumentelle Analytische Chemie, Verfahren, Anwendungen und Qualitätssicherung, Heidelberg Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2001

*DIN 18126*, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung, Ausg. Nov. 1996

*DIN 19196*, Erd- und Grundbau, Bodenklassifikationen für bautechnische Zwecke, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung, Ausg. Mai. 1988

*DIN 38412-30*: Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L), Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Daphnien über Verdünnungsstufen (L30), Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1989

*DIN 38412-33*: Testverfahren mit Wasserorganismen, Bestimmung der nicht giftigen Abwasser gegenüber Grünanlagen, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1991

*DIN 38412-37*: Testverfahren mit Wasserorganismen, Bestimmung der Hemmwirkung von Wasser auf das Wachstum von Bakterien – Zellvermehrungshemmtest, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1999

*DIN EN 752*, Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung, Ausg. Nov. 1997

*DIN EN 1610*, Verlegung und Prüfung von Abwasserleitung und –kanälen, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung, Ausg. Nov. 1997

*DIN EN ISO 9000: 2000*, [Qualitätsmanagementsysteme, 2000]: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, Berlin: Beuth Verlag, 2000

*DIN EN ISO 11348-1*: Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von *Vibrio fischeri* (Leuchtbakterintest), Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1999

*Dornbusch, Johannes* [Integrale Sanierungen mit dem Flutungsverfahren, 2002]: Integrale Sanierungen von Abwasserkanälen und –leitungen mit dem Flutungsverfahren, Abschlussbericht, Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH-Aachen, 2002

*Dornbusch, Johannes* [Sanierung auf Chemischreinigungsstandorten, 2004]: Pilotprojekt; Dichtheitsprüfung und Sanierungen von Grundstücksentwässerungsleitungen auf Chemischreinigungsgrundstücken, Abschlussbericht, Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH-Aachen, 2004

*Eisenträger, Adolf*. [Ökotoxizität, 2002]: Ökotoxizität, Genotoxizität und Persistenz von Chemikalien und Umweltproben Ökotoxizität - methodisch-technische Optimierung und Applikation biologischer Testverfahren, Aachen: Habilitationsschrift RWTH, 2002

*Fiedler, Manfred* [TV-Untersuchungen in Hausanschlusskanälen, 1997]: TV-Untersuchungen in Hausanschlusskanälen, in: Korrespondenz Abwasser Nr.3, 1997

*Kipp, B., Möllers, K.* [Grundstücksentwässerungsleitungen - Projekterfahrung], 1992: Inspizierbarkeit von Grundstücksentwässerungsanlagen, Projekterfahrung, in: Korrespondenz Abwasser Nr.4, 1992

o. V. [Spezialgrundbau – Injektionen, 1998]: Spezialgrundbau – Injektionen, BUG Wuppertal, 1998

o. V. [DIBt-Merkblatt, 2000]: DIBt-Merkblatt: Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2000

*Schössner, Horst* [Umweltverträglichkeit, 1996]: Untersuchungen des TUBOGEL Sanierungssystems auf Wasserglasbasis zur Kanalsanierung unter dem Gesichtspunkt der Umweltverträglichkeit, Gelsenkirchen: Hygiene- Institut des Ruhrgebiets, 1996

*Sindermann, Thomas* [Sanierung mit dem Flutungsverfahren, 2006]: Sanierung von häuslichen Grundleitungsnetzen mit dem Flutungsverfahren, Aachen: Diss. RWTH, 2006

*Stein, Dietrich* [Kanalisation, 1998]: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 1998

*Thoma, Robert.* [Grundstücksentwässerungsanlagen, 2005]: Instandhaltung von Grundstücksentwässerungsanlagen, in: Korrespondenz Abwasser Nr.6, 2005

## **9 Anhang**